

Le Bup

Physique - Chimie



N° 1020 - 1021 - 1022
Janvier - Février - Mars
1^{er} trimestre 2020
114^e année



Sommaire du Bup n° 1020 (janvier 2020)

- 1 Sommaire
- 3 Éditorial
- 7 Articles scientifiques et pédagogiques
- 71 Astronomie
- 103 Concours « Mendeleïev 2019 »
- 115 Nous avons lu et testé
- 137 Vie de l'association



Sommaire du Bup n° 1021 (février 2020)

- 143 Sommaire
- 145 Articles scientifiques et pédagogiques
- 173 Articles expérimentaux
- 193 Collège
- 209 Concours « Mendeleïev 2019 »
- 215 Nous avons lu et testé
- 219 Vie de l'association
- I-VIII Publicitaires



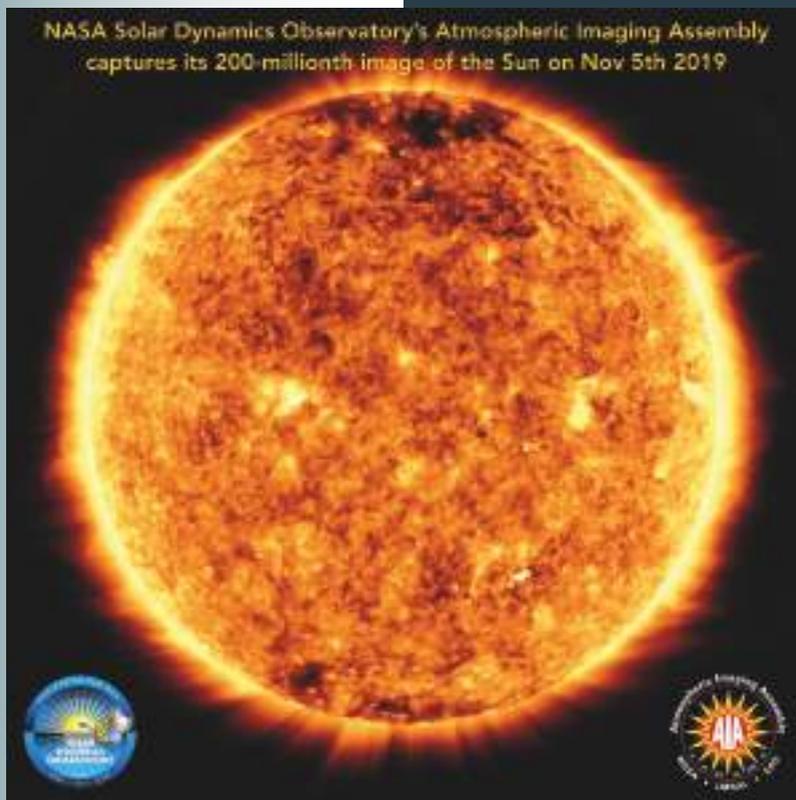
Sommaire du Bup n° 1022 (mars 2020)

- 229 Sommaire
- 231 Articles scientifiques et pédagogiques
- 261 Articles expérimentaux
- 287 Lycée
- 313 Concours « Mendeleïev 2019 »
- 331 Nous avons lu et testé
- 337 Informations
- 339 Vie de l'association
- I-XVII Renseignements utiles
- XIX-XXII Publicitaires



Le Bup

Physique - Chimie



Le ciel en 2020



N° 1020
Janvier 2020
Publication mensuelle
114^e année



Siège social

Union des professeurs de physique
et de chimie

42 rue Saint-Jacques - 75005 Paris

Tél. : 01 40 46 83 80 - Fax : 01 46 34 76 61

Adhésions à l'UdPPC et abonnements au Bup

Secrétariat des abonnements

Sabine ASSAL

abonnement@udppc.asso.fr

Serveur des adhésions et abonnements

<http://adhesion.udppc.asso.fr>

Le Bup physique-chimie

Directeur de la publication

Marie-Thérèse LEHOUCQ

presidence@udppc.asso.fr

Rédacteur en chef

Gérard DUPUIS

lebug.redaction@udppc.asso.fr

Secrétariat de la rédaction

Catherine FRANÇOIS

lebug.secretaire@udppc.asso.fr

Responsable des publicités

Guillaume MINIER

lebug.publicite@udppc.asso.fr

Comité de rédaction

Guy BOUYRIE, Jean DERVIEUX,

Luc DETTWILLER, Dominique DUCOURANT

et Dany LAUNER

Imprimeur

ALLIANCE PARTENAIRES GRAPHIQUES

26-30 rue du Docteur Schweitzer

51100 Reims

Commission paritaire : 0120 G 85898

Dépôt légal : 1^{er} trimestre 2020

ISSN (version papier) : 1770-1368

ISSN (version électronique) : 2491-830X



Éditorial

3 Quelle école voulons-nous ?

M.-Th. Lehoucq

Articles scientifiques et pédagogiques

7 L'expérience de Rutherford : une étude de cas

F. Beaubois

27 Systèmes de grandeurs

Partie 2 - Structure des théories et des systèmes d'unités

M. Melzani

Astronomie

71 Le ciel en 2020

J. Dervieux

Concours « Mendeleïev 2019 »

Académie de Rennes

103 Tabs'up

M. Chuto

Académie de Grenoble

107 Jeu de cartes « ATOMOS »

S. Hirel

Nous avons lu et testé

115 L'Actualité Chimique communique

S. Bléneau-Serdel

119 Table des matières de la 113^e année (2019)

S. Robert

Vie de l'association

137 Réunion des correspondants

« Enseignements technologiques »

P. Goutverg

141 Appel à candidatures

UdPPC rédaction

142 Sur votre agenda...

UdPPC rédaction

Photo de couverture : La 200 millionième image de la caméra AIA du satellite SDO (*Solar Dynamics Observatory*)... Ce nombre (astronomique bien sûr !) témoigne de la vertigineuse accélération de l'acquisition de données astronomiques depuis que l'astronomie spatiale permet d'observer hors atmosphère dans tout le domaine des ondes électromagnétiques (en attendant la détection des ondes gravitationnelles avec le projet eLISA). Lancé en 2010, le satellite SDO enregistre des images et spectres du Soleil depuis une orbite géosynchrone inclinée qui permet d'observer l'astre presque en continu, tout en transférant au fur et à mesure les données collectées. On trouvera sur le site dédié <https://sdo.gsfc.nasa.gov/> de nombreuses informations sur cette mission, dont la fin est prévue pour cette année 2020 ; mais peut-être sera-t-elle prolongée, comme c'est souvent le cas tant qu'un satellite peut se maintenir en position et continuer d'observer valablement. Les instruments embarqués utilisent treize longueurs d'ondes pour mettre en évidence l'activité de notre étoile (<https://www.nasa.gov/content/goddard/how-sdo-sees-the-sun>). Chaque longueur d'onde privilégie une ou deux transitions électroniques survenant dans des ions caractéristiques d'une plage de température, donc d'une zone de l'atmosphère solaire. L'image mise en valeur ici (colorisée en or), avec une longueur d'onde de 171 angströms émise par le fer-9 (Fe IX), correspond à une température de l'ordre de 600 000 K. Elle montre une région dite « de transition » entre la chromosphère et la couronne, zone dans laquelle l'hélium neutre s'ionise et où la température augmente brutalement. Cette image montre un Soleil calme, car nous sommes dans une période d'activité minimale (pas de taches en lumière visible). Dans les régions polaires, on repère des zones plus sombres, des « trous coronaux » par lesquels le vent solaire est éjecté dans l'espace (cf. *article de Jean Dervieux, p. 71-102*).

Quelle école voulons-nous ?



UNE FIN D'ANNÉE HARASSANTE

L'année 2019 s'achève. Il était temps. Les enseignants sont épuisés. Ils se sont battus sur tous les fronts : nouveaux programmes, nouvelle organisation du lycée, nouvelles missions, nouvelle identité professionnelle et nouveaux calculs des pensions. Avec courage, ils ont fait face à l'injonction de la nouveauté, apanage de la modernité souvent pressée d'exister.

L'école française est en crise. Les enquêtes PISA (Programme international pour le suivi des acquis des élèves) ne cessent de montrer que le système scolaire français est inégalitaire. Pour des spécialistes, il ne parvient pas à corriger les inégalités sociales dont il hérite, pour d'autres, le mal est plus profond, le système scolaire participerait à renforcer ces inégalités sans que les enseignants n'en soient toujours pleinement conscients. Quoi qu'il en soit, la réponse à cette crise peut-elle être le « new public management », un modèle de gestion publique néolibéral qui, transposé dans le champ éducatif, conduit à l'adoption des logiques de marché ? Et puis, une telle feuille de route peut-elle sereinement être appliquée sans que l'ensemble des enseignants y adhèrent ?

En fait, quelle école voulons-nous ? Une réponse censée serait : une école au service des apprentissages des élèves et en même temps, une école qui permette l'épanouissement professionnel de ses enseignants. Quant au moyen d'y parvenir, il devrait être recherché collectivement dans la négociation.

Une certitude, l'association fera tout, dans son bulletin, sur son site Internet, par l'organisation de journées académiques de formation et par son congrès hors temps scolaire, pour accompagner les collègues sur les nouveaux programmes.

L'ABANDON D'UNE SPÉCIALITÉ EN PREMIÈRE

Dans le cadre de la réforme du lycée, à l'entrée de la classe de terminale, l'abandon d'une des trois spécialités choisies en classe de première par l'élève et sa famille inquiète grandement l'association. Par exemple, quel choix feront les élèves se destinant à des études de médecine ? Mathématiques et Sciences de la vie et de la Terre (SVT), ou bien

Physique-chimie et Sciences de la vie et de la Terre avec l'option Mathématiques complémentaires ? Cette mise en concurrence des disciplines scientifiques déroutent les collègues. À l'avenir, devront-ils vendre leur discipline ? Par ailleurs, seront-ils tentés par la pratique d'une évaluation « séduction » afin de ne pas tarir le futur vivier d'élèves suivant leur spécialité en terminale ? Autant de questions qui interrogent directement l'avenir de la discipline physique-chimie.

Cerise sur le gâteau, le 18 décembre 2019, à l'Assemblée nationale, la mission flash sur la carte des spécialités en lycée a présenté un premier bilan⁽¹⁾ qui reconnaît le maintien des inégalités sociales et de genre dans le choix des spécialités. Les deux rapporteurs préconisent notamment le maintien de trois spécialités en terminale.

LES RENDEZ-VOUS DE L'UDPPC EN 2020

Le congrès des professeurs de physique et de chimie

L'équipe académique de Nancy s'est portée volontaire, il y a trois ans, pour organiser le congrès 2020. Ce congrès, intitulé « Place aux sciences », se déroulera du dimanche 25 au mercredi 28 octobre 2020.

C'est une occasion précieuse d'assister, sur quatre jours, à un grand nombre de conférences, d'ateliers et de visites scientifiques sur tout le technopôle nancéen. Sans oublier les visites touristiques qui sont toujours de bons moments de convivialité et de découverte.

La journée nationale Collège

La journée nationale Collège aura lieu cette année le samedi 21 mars 2020 dans les locaux de l'Université Paris-Diderot (Paris 7). Cette journée de formation et de réflexion est ouverte à tous les collègues, adhérents ou non, quel que soit le niveau auquel ils enseignent. Le thème retenu est l'étude macroscopique, microscopique de la matière et de ses transformations du cycle 3 au cycle 4 et au-delà.

L'adhésion et l'abonnement en année glissante

L'adhésion et l'abonnement en année glissante sont maintenant opérationnels. Par exemple, un abonné ayant payé son adhésion/abonnement pour 2020 avant le 31 décembre 2019, verra son adhésion/abonnement partir au 1^{er} janvier 2020, et ce

(1) <http://www2.assemblee-nationale.fr/content/download/183669/1841320/version/1/file/Communication+de+la+mission+flash+sur+la+carte+des+sp%C3%A9cialit%C3%A9s+au+lyc%C3%A9e+v+finale.pdf>

jusqu'au 31 décembre 2020. Si cet abonné se réabonne pour 2021 en cours d'abonnement, ce nouvel abonnement prendra effet au 1^{er} janvier 2021. N'hésitez pas à vous abonner ou à vous réabonner le plus tôt possible et, pour toutes questions concernant l'abonnement en année glissante, vous pouvez contacter le secrétariat de l'association.

*Le Bureau de l'UdPPC vous remercie de votre fidélité
et vous souhaite une très bonne année 2020 !*

*Marie-Thérèse LEHOUCQ
Présidente de l'UdPPC*

L'expérience de Rutherford

Une étude de cas

par Francis BEAUBOIS
Lycée Paul-Langevin - 60000 Beauvais
francis.beaubois@ac-amiens.fr

L'EXPÉRIENCE de Rutherford représente un moment charnière dans l'histoire de la physique. Encadré par le modèle de Joseph John Thomson et celui de Niels Bohr, le modèle de Rutherford a rapidement pris place dans les manuels pour illustrer l'évolution de la représentation de l'atome. Il est cependant regrettable que cette tranche d'histoire des sciences donne lieu à des descriptions et des interprétations erronées. Afin d'éviter ces écueils, il est nécessaire de revenir aux sources. L'histoire devient alors enchevêtrée, complexe, plus humaine aussi. Si l'on abandonne cette (fausse) simplicité trop souvent proposée, la richesse du tableau nous offre l'opportunité d'illustrer de nombreux points sur la nature de la science et de mettre nos élèves au contact de la science telle qu'elle se fait, et non d'une caricature d'elle-même.

INTRODUCTION

Dans un article paru en 2013 sur « L'esprit physicien en mutation », il est rapporté que « [L]a découverte de la structure de l'atome est due à un éminent physicien britannique, Ernest Rutherford (1871-1937) » et qu'en 1909 ce scientifique « eut l'idée d'utiliser les particules comme projectiles pour étudier la matière : pour cela il mesura leur diffusion à travers une feuille d'or. Par principe, il vérifia qu'il n'y en avait aucune diffusée vers l'arrière » et bien sûr il en fût autrement. « Il lui fallut un an pour interpréter ses résultats dont il publia les conclusions dans un article en 1911, dans lequel il montra que l'atome possède un noyau de charge positive et de très petite dimension comparativement, signant la naissance du modèle planétaire de l'atome » [1]. À première vue, cette description de « l'expérience de Rutherford » semble probante et pourrait même devenir le support d'une activité documentaire pour des élèves, le problème est qu'elle distord fortement la réalité historique. Est-ce important, peut-on rétorquer, si l'essentiel est là et que l'on fasse travailler les élèves sur les contenus du chapitre ? Mais que dirait-on si les professeurs d'histoire se contentaient d'une approche approximative des faits dans leur cours ou dans leurs manuels ? Rigueur d'un côté, superficialité de l'autre ? Nous sommes confrontés ici à la difficile introduction de l'histoire des sciences et la tension inévitable que cela induit avec l'enseignement purement disciplinaire de la physique-chimie. Nous sommes convaincus toutefois – c'est notre parti pris – qu'une meilleure perception de l'image de la nature de la science et de son histoire est une plus-value dans notre enseignement. Nous sommes

également conscients qu'une telle démarche ne peut être généralisée à l'ensemble des notions abordées en classe, mais qu'elle peut s'avérer bénéfique si elle est mobilisée avec profondeur sur quelques études de cas précis⁽¹⁾.

La manière dont est traitée l'expérience de Rutherford dans les manuels souffre malheureusement de multiples inexactitudes voir incohérences, et ce à plusieurs niveaux : historique, épistémologique, didactique⁽²⁾. Elle représente ce que laissait craindre l'utilisation de l'histoire des sciences dans l'enseignement par ses détracteurs, à savoir être une quasi-histoire des sciences, c'est-à-dire une reconstruction dans le seul but d'amener les élèves à des réponses convenues. Cette situation est problématique d'autant plus que, selon une enquête, les enseignants n'ayant reçu qu'une formation universitaire privilégient les manuels scolaires qui sont souvent la seule source [4]. Ce manque de recul sur sa propre discipline a pour conséquence de diffuser auprès des élèves et étudiants certains clichés, d'induire une vision caricaturale de la nature de la science, d'apporter des distorsions qui ont ensuite été recyclées ou amplifiées à différents niveaux et pour divers supports (manuels scolaires, livres de vulgarisation, articles de presse...). Selon l'historien Helge Kragh les manuels « *non seulement distordent la réalité historique, mais ils le font d'une manière systématique qui renforce la manière dont les scientifiques appréhendent leur discipline et leurs traditions* ».

Ces défauts sont le symptôme d'un manque de préparation des enseignants pendant leur cursus et à l'absence de documentation de qualité dans les manuels, des facteurs qui se renforcent mutuellement sachant que les auteurs des manuels sont eux-mêmes des enseignants.

Ce constat ne vise pas à incriminer les enseignants, mais bien plutôt à pointer une carence à notre avis préjudiciable dans leur formation initiale. Même si la situation s'est indéniablement améliorée [5], nous sommes toujours confrontés à l'absence de volonté pour proposer une formation systématique de cette discipline (certaines académies étant mieux loties que d'autres). La longévité des débats autour de l'articulation de l'histoire des sciences dans l'enseignement est à cet égard éloquente, et *Le Bup* y a contribué depuis les années 1980⁽³⁾.

- (1) Daniel Beaufls et Laurence Maurines soulignaient toutefois en 2011 que l'état actuel des recherches sur l'introduction explicite de l'histoire des sciences dans les cours de sciences ne permet pas quant à lui de conclure sur son apport à l'apprentissage de contenus scientifiques, les résultats étant contrastés ([2], p. 272).
- (2) À cet égard, les manuels français sont aussi mal lotis que ceux analysés par Mansoor Niaz dans son article [3].
- (3) À la suite de la grande réforme des lycées résultant des travaux de la commission Laguarrigue, il est proposé pour la première fois en 1979 de faire appel à l'histoire des sciences et des techniques dans l'enseignement des sciences physiques aux classes littéraires ; lors de la rédaction des programmes de 1993 sous l'impulsion de l'inspecteur

Nous n'aborderons pas ici les raisons pour lesquelles nous ne parvenons pas à briser ce cercle vicieux⁽⁴⁾ ; nous souhaitons seulement apporter une contribution à l'intégration de l'histoire des sciences dans la classe. L'objet de cet article rejoint dans une certaine mesure le travail engagé par Daniel Beaufiles et Laurence Maurines, publié dans *Le Bup* de l'été 2013. Les auteurs reconnaissent que « la place accordée à l'histoire des sciences dans les parties des programmes intitulées "contenus et compétences" reste bien en deçà de ce que les préambules pourraient laisser envisager : les thèmes scientifiques susceptibles de donner lieu à une telle introduction sont très rares, quasiment aucun objectif d'apprentissage n'est explicité, aucune méthode pédagogique n'est suggérée »⁽⁵⁾. Ce constat les a conduits à élaborer des ressources pédagogiques en direction des professeurs, une en particulier sur la spectroscopie, un thème apte à illustrer ce que le préambule du programme de seconde met en exergue : l'image de la nature de la (des) science(s) et de l'activité scientifique [6].

L'expérience de Rutherford nous offre des potentialités similaires que nous souhaitons mettre en avant ici. Pour cela, dans une première partie, nous examinerons brièvement la manière dont l'expérience de Rutherford est présentée dans les manuels de seconde de physique-chimie afin d'en révéler les distorsions les plus communes qui se sont cristallisées au fil du temps. Nous présentons ensuite, dans une seconde partie, une reconstruction historique de cette découverte.

1. L'EXPÉRIENCE DE RUTHERFORD DANS LES MANUELS SCOLAIRES

L'expérience de Rutherford figure parmi les épisodes qui ont marqué l'avancée des connaissances scientifiques. Son importance est attestée par sa présence dans une majorité des manuels de physique-chimie de seconde depuis au moins la fin des années 1980, dans la partie traitant de la structure de la matière. Elle se justifie pour des raisons tant historiques que pédagogiques : elle joue un rôle majeur dans l'évolution

général Hubert Gié, l'histoire des sciences et des techniques fait une apparition officielle en enseignement scientifique pour les élèves de section scientifique.

- (4) Daniel Beaufiles et Laurence Maurines nous expliquent à ce sujet que « [C]ette réduction de l'image de la nature des sciences et de l'activité scientifique est liée à la fois aux contraintes des programmes, mais plus globalement, à toute l'institution, c'est-à-dire aussi à la formation initiale des enseignants eux-mêmes qui a laissé s'installer des représentations réduites de l'épistémologie de leur discipline, tant du point de vue scientifique que pédagogique. Des enquêtes, réalisées pour la plupart à l'étranger, montrent que les enseignants de sciences n'ont en effet pas conscience qu'un des enjeux de l'apprentissage des sciences est de nature épistémologique. Même ceux pour lesquels cette dimension est importante tendent à privilégier l'acquisition de savoirs et savoir-faire. » ([2], p. 276).
- (5) Le programme d'enseignement scientifique de première rectifie quelque peu ce constat. Certaines compétences et savoir-faire relevant directement de l'histoire des sciences y sont intégrés pour la première fois.

du concept d'atome et elle incarne de manière magistrale la démarche scientifique que l'on cherche à inculquer aux élèves. Utiliser ou construire une activité autour de l'expérience de Rutherford prend en outre tout son sens en regard des préambules des nouveaux programmes de physique-chimie du lycée où la valeur éducative de l'histoire des sciences y est explicitement reconnue et son usage encouragé.

Nous allons analyser dans ce qui suit un certain nombre d'activités documentaires proposées dans les manuels de physique-chimie de niveau seconde, la plus ancienne datant de 1981⁽⁶⁾ et la plus récente de 2018, afin d'en saisir les biais les plus flagrants.

Ces activités possèdent plusieurs points communs. Elles donnent lieu à un questionnement portant essentiellement sur la compréhension du contenu scientifique figurant dans les programmes et non sur des questions épistémologiques ([2], p. 275)⁽⁷⁾. En somme, elles n'ont pas pour fonction d'aider à la construction des concepts en jeu ni à la compréhension du fonctionnement de la science et de son évolution. Le formatage éditorial, contraignant les activités à ne pas dépasser une page, oblige les encadrés textuels à la concision. Aucune source primaire n'est en outre exploitée (par exemple une traduction d'un passage d'un article de Rutherford) et très peu reposent sur des sources secondaires (compris comme un extrait d'un livre ou d'un article rédigé par un historien ou un ouvrage de vulgarisation)⁽⁸⁾. Dans ce cadre étroit, comment la découverte du noyau est-elle relatée ?

La conduite de l'expérience est très souvent attribuée à Rutherford, qui porte alors à lui seul tout le mérite de la découverte du noyau de l'atome. Celle-ci est globalement résumée par une séquence où Rutherford a l'idée de bombarder une feuille d'or avec des particules α , sans plus de précision quant à ses motivations ni ses préconceptions. Puis, à la suite des observations effectuées, émerge l'idée que l'atome possède un noyau de charge positive, concentrant l'essentiel de la masse : la dimension temporelle de la découverte est quelquefois suggérée avec des expressions comme « *après plusieurs mois de réflexion* » ou « *au bout d'un an* ». Cette expérience semble être unique et suffisante pour assoir définitivement le modèle planétaire de l'atome. Ce type de reconstruction, par sa trop grande simplicité, efface complètement le contexte de découverte. Rarement

(6) Nous avons repéré une activité documentaire dans un manuel de 1993, basée sur un extrait d'un ouvrage de Bernadette Beausaude-Vincent et Isabelle Stengers (1993) [7], mais dont le sujet est la découverte de radioactivité et la compétition entre les deux disciplines, la physique et la chimie, pour se l'accaparer. L'expérience de Rutherford n'y est fait mention qu'en passant. Ce texte est très intéressant, et nous ne pouvons qu'inciter à lire l'ouvrage dans sa totalité, voire à l'utiliser.

(7) Les trois premiers points sont valables en fait pour toutes les activités documentaires portant sur l'histoire des sciences.

(8) L'activité documentaire proposée dans le manuel Hachette de 1997 est l'un des rares à emprunter une source indirecte, en l'occurrence un livre d'Étienne Klein.

est évoqué l'aspect collaboratif impliquant d'autres scientifiques, notamment le binôme Hans Geiger (1882-1945) et Ernest Marsden (1889-1970). Jamais il n'est question d'invoquer d'autres expérimentateurs chargés d'aider à concevoir et construire les dispositifs expérimentaux ; le rapport aux problèmes d'ordre technique inhérents à toute expérience de laboratoire est éludé. Dans son ouvrage *The Electron*, publié en 1918, le physicien anglais Robert Millikan (1868-1953) blâmait déjà cette conception simpliste de la nature de la science : « *In popular writing it seems to be necessary to link every great discovery, every new theory, every important principle, with the name of a single individual. But it is an almost universal rule that developments in physics actually come about in a very different way. A science, like a planet, grows in the main by a process of infinitesimal accretion. Each research is usually a modification of a preceding one; each new theory is built like a cathedral through the addition by many builders of many different elements.* » ([8], p. 5).

Le dispositif expérimental proprement dit est, dans les activités proposées dans les livres scolaires, décliné selon deux variantes :

- ◆ Le dispositif est analogue à un tube cathodique où la source d'électrons est remplacée par une substance radioactive émettant les particules α . Le faisceau étant ensuite focalisé sur la feuille d'or puis les particules sont détectées par la minuscule fluorescence émise lorsqu'elles heurtent un écran de sulfure de zinc. Il semblerait que l'expérience soit réalisée sous vide, mais rien n'est indiqué dans ce sens (cf. figure 1).
- ◆ Le dispositif est représenté selon un schéma désormais classique, plus proche de la réalité, où le faisceau est toujours issu d'une source radioactive puis dirigé vers une feuille d'or, l'écran quant à lui forme une bande entourant presque totalement celle-ci, l'ensemble semblant être à l'air libre (cf. figure 2)⁽⁹⁾.

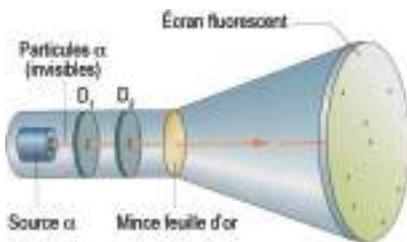


Figure 1

© Source : Hachette, seconde, 2014.



Figure 2 - D'après

https://www.youtube.com/watch?v=_e7U-48nltA

Ces schémas, identifiés à « l'expérience de Rutherford », laissent entendre que celle-ci est la seule à avoir été réalisée. Ces deux présentations posent différents pro-

(9) Ce schéma apparaît à partir de 2004 et se retrouve dans un tiers des cas.

blèmes :

◆ D'abord la date

En 1909, l'expérience initiale, dont le schéma est inclus dans l'article de Geiger et Marsden (cf. sous-paragraphe 2.3.), ne correspond en rien à ce qui est proposé. Le dispositif expérimental auquel se réfèrent implicitement les auteurs des manuels est celui de 1913 dont une représentation assez fidèle peut se trouver par exemple dans le manuel Bordas (*Physique-chimie seconde*, programme 2010) ou mieux encore selon une animation disponible sur Internet⁽¹⁰⁾. Un aspect non traité également concerne les techniques pour observer et dénombrer les points brillants dus aux impacts : de plus, il n'est jamais spécifié si le fait de réaliser l'expérience sous vide ou non a une importance et une incidence sur le résultat.

◆ Puis, plus problématique

L'exposition de la séquence expérience / observation / validation ou rejet d'un modèle, implicitement suivie, mais bien trop simpliste – nous y reviendrons – met dans l'embarras le lecteur quant à savoir ce qui ressort de l'anomalie ou de l'observation attendue. Il est rapporté par exemple dans une activité que « Rutherford constate alors que la grande majorité d'entre elles traversent la feuille d'or sans être déviées [...]. Quelques impacts excentrés montrent que seules quelques-unes sont déviées. D'autres (1 sur 20 000 à 30 000) semblent renvoyées vers l'arrière ». Il est difficile dans ce cadre de savoir si l'anomalie qui laisse perplexe Rutherford est de constater que les particules passent en majorité sans être déviées ou si au contraire certaines subissent une diffusion plus ou moins importante. La reconstruction *a posteriori* amène même dans certains cas à une inversion de la réalité historique, comme lorsqu'il est expliqué que « A contrario des théories récentes de l'époque sur l'atome, E. Rutherford et ses collaborateurs observent que l'essentiel des particules α traversent la feuille d'or sans déviation⁽¹¹⁾ ». Il est donc ici suggéré que la théorie prévoyait, dans le cadre du modèle de l'atome « plein », la déviation de pratiquement toutes les particules. Cette reconstruction tronquée conduit en outre à gommer l'aspect hypothétique et forcément incomplet du premier modèle de Rutherford. Lorsqu'il est demandé par exemple de déduire le signe du noyau par la déviation des particules, un schéma montrant des trajectoires individuelles au sein même de la feuille d'or (alors que les expérimentateurs sont dans l'incapacité de les « voir ») et/ou un vocabulaire explicite (repoussé, répulsif) sont alors mobilisés pour guider la réponse de l'élève. Or le traitement théorique proposé par Rutherford en 1911 est tout à fait indépendant de la charge du noyau, une déviation de la particule α peut se comprendre si le noyau est repoussé ou attiré, comme cela est le cas dans la déviation d'un corps par l'attraction gravitationnelle.

(10) Cette animation est disponible à l'adresse :

http://bertrand.kieffer.pagesperso-orange.fr/Animations/Exp_Rutherford.htm

(11) Nathan, *Physique-chimie*, collection Sirius, p. 154, 2010.

Cette analyse des lacunes ou distorsions historiques dans la présentation de l'expérience de Rutherford véhicule implicitement une vision de la nature de la science très altérée. Nous sommes conscients toutefois qu'une activité documentaire exige certaines simplifications et/ou reformulations de manière à la rendre intelligible (transposition didactique) et abordable pour les élèves, et cet effort est à ajuster selon le niveau des élèves. Cependant, comme le font remarquer les auteurs d'un article sur l'exposition de l'expérience de Rutherford dans les manuels scolaires, « *bien qu'inclure de l'histoire de la physique de manière simplifiée dans l'enseignement de la physique, en particulier pour les élèves du secondaire, a quelques mérites au niveau métacognitif et est de fait presque indispensable, une "pseudo-histoire" fallacieuse dessert les élèves puisqu'elle n'exploite que superficiellement la puissance de l'histoire à développer les compétences clés dans les programmes* » ([9], p. 9). On peut d'une manière plus générale regretter que les élèves et étudiants soient trop souvent mis en contact d'une science dans sa forme finale dans laquelle les connaissances sont présentées comme une « rhétorique de la conclusion ».

2. L'EXPÉRIENCE DE RUTHERFORD : RETOUR AUX SOURCES

Dans ce paragraphe, nous souhaitons apporter certains éléments historiques afin de mieux situer le contexte dans lequel Rutherford a effectué ses recherches ainsi que les étapes principales qui ont conduit à la découverte du noyau, de manière à servir de support à toute activité ayant trait à ce sujet.

Cet épisode s'avère potentiellement très riche pour discuter avec les élèves de l'image de la nature de la science, comme la relation entre théorie et expérience, le rôle de l'imagination dans la démarche scientifique ou encore la démarcation entre chimie et physique, des sujets à caractères épistémologiques qu'il est envisageable de reprendre de manière plus approfondie en classe de terminale en collaboration avec le professeur de philosophie.

2.1. La physique à la fin du XIX^e siècle

Lorsque le jeune Ernest Rutherford arrive en 1895 au laboratoire Cavendish à l'Université de Cambridge pour ses études postdoctorales, le physicien allemand Wilhelm Röntgen (1845-1923) vient de découvrir les rayons X, stupéfiant le monde par les propriétés de ce nouveau rayonnement. Cette découverte n'est que la première d'une série révolutionnant notre compréhension de la matière, ouvrant une période singulière qui se distingue par le rythme et l'importance des innovations théoriques et expérimentales.

Rutherford évoque rétrospectivement, en 1923, ce sentiment d'avoir été témoin autant qu'acteur d'une période exceptionnelle dans l'histoire de la physique. Il se rappelle ainsi sa première occasion de participer à un meeting de *l'Association Britannique*

pour l'Avancement des Sciences à Liverpool en 1896, une année en tout point « mémorable » pour lui, car, outre la présentation de ses travaux en tant que jeune chercheur, c'est l'année où le physicien français Henri Becquerel découvre le phénomène de radioactivité. « [O]n looking back with some sense of perspective we cannot fail to recognise that the last Liverpool meeting marked the beginning of what has been aptly termed the heroic age of physical science. Never before in the history of physics has there been witnessed such a period of intense activity when discoveries of fundamental importance have followed one another with such bewildering rapidity. » ([10], p. 409).

Un an plus tard, Joseph John Thomson (1856-1940) publie son premier article apportant des preuves indubitables de l'existence d'un corpuscule d'électricité – qui sera nommé électron par George Stoney (1826-1911) en 1891 – et qui corrélativement prouve que l'atome est un édifice composite. Les années 1895-1897 sont donc trois années charnières dans l'histoire de la physique.

En évoquant la carrière de Rutherford, il ne viendrait à personne l'idée qu'il ait pu suivre des études de physique (ou de chimie) à l'université sans se frotter à la pratique expérimentale dans un laboratoire. L'émergence du laboratoire comme lieu de recherche et de formation est pourtant un autre aspect caractéristique du dernier tiers du XIX^e siècle, qui a permis d'une certaine manière cette floraison de découvertes.

Le premier laboratoire universitaire ouvert aux étudiants pour des travaux pratiques ne remonte qu'aux années 1870, à Glasgow, grâce à William Thomson (Lord Kelvin) (1824-1907). L'évolution de la physique expérimentale et ses liens avec le monde de l'industrie conduisent à la création des grands laboratoires nationaux, comme le Cavendish Laboratory (1874) à Cambridge ou la Physikalisch-Technische Reichsanstalt à Berlin (1887). D'une manière générale, le laboratoire devient graduellement, pendant cette période, l'instance garante de la scientificité des savoirs. La formation et la carrière d'un physicien ou d'un chimiste se déroulent dorénavant dans ces laboratoires, et les plus doués espèrent intégrer les mieux équipés et dirigés par les scientifiques de renommée internationale.

Le parcours de Rutherford est exemplaire à cet égard et est attaché à l'avant-garde de la physique contemporaine. En effet, après l'obtention de son doctorat de physique à l'Université de Canterbury, Nouvelle-Zélande, il se voit décerner une bourse pour rejoindre le laboratoire Cavendish à Cambridge, sous la direction du découvreur de l'électron, Joseph John Thomson (1856-1940). Après ces trois premières années, il part en septembre 1898 pour l'Université McGill à Montréal, devenu l'un des centres les plus actifs en recherche sur la radioactivité. Il revient ensuite au Royaume-Uni pour cinq ans à Manchester, sous la direction de Arthur Schuster (1851-1934). Il finira sa carrière au Cavendish, mais cette fois en temps que directeur du laboratoire, initiant l'âge d'or de la physique nucléaire.

2.2. Le prix Nobel de chimie à un physicien

À l'Université McGill, Rutherford découvre que les radiations émises spontanément par l'uranium sont de nature complexe, et nomme les deux principales composantes ionisantes α et β . En collaboration avec Frederic Soddy (1877-1956), ils établissent les lois de désintégrations des éléments radioactifs et prouvent que les radiations α sont des particules chargées positivement et parviennent à démontrer qu'il s'agit d'atomes d'hélium ionisés deux fois : la radiation α devient la « particule α ». Très rapidement, il devient l'un des leaders dans ce domaine en pleine expansion, en concurrence directe avec les Curie en France. Pour ses travaux, il est sélectionné en 1908 par le comité Nobel pour obtenir le prix, mais la question est de savoir s'il revient à la section de physique ou de chimie. La décision d'attribuer en 1903 le prix de Physique conjointement à Henri Becquerel (1852-1908) ainsi qu'à Pierre (1859-1906) et Marie Curie (1867-1934) influença d'une certaine manière la nomination de Rutherford. L'inclusion des Curie avait été la cause de la première dispute juridictionnelle entre les comités de physique et de chimie.

Dans l'opinion des chimistes, la découverte des premiers éléments radioactifs – polonium et radium – devait revenir au domaine de la chimie et aurait dû en conséquence être couronnée par leur prix. Ces premières années de l'Institut Nobel coïncident avec le dernier épisode des débats entre les physiciens et les chimistes sur la validité de l'hypothèse atomique, qui en sort gagnante et légitimée. En 1908, Rutherford reçoit finalement le huitième prix Nobel de chimie, celui de physique étant accordé à Max Planck (1858-1947). Rutherford aurait préféré recevoir cette récompense dans son domaine de prédilection, la physique, mais cela aura quand même un effet appréciable : l'étude de l'atome, autrefois considérée comme appartenant au domaine de la chimie, revient maintenant aux physiciens. Lorsque Rutherford reviendra en Angleterre, auréolé de son prix Nobel, il utilisera son autorité pour promouvoir une physique « moderne » réductionniste.

2.3. La période Manchester

Rutherford reçoit une proposition de la part du physicien Arthur Schuster, alors directeur du laboratoire de physique de l'Université de Manchester depuis sa création en 1900, pour lui succéder. Séduit, il accepte et s'installe en juin 1907. Ce laboratoire, dont les activités sont principalement axées vers les domaines de l'optique, de la spectroscopie et de la métrologie, va devenir grâce aux travaux de Rutherford et son équipe de brillants expérimentateurs, un nœud essentiel dans le réseau international de la recherche sur la radioactivité et un « aimant » pour ceux intéressés par la physique atomique. Il constituera un supplément, voire une alternative, à Cambridge puis, comme conséquence de cette nouvelle orientation, le lieu de naissance de la physique nucléaire.

La visibilité et la réputation de l'école de Manchester en sortirent clairement

renforcées par l'obtention du prix Nobel de chimie en 1908 par Rutherford et sa participation aux congrès Solvay de 1911 et de 1913, qui le plaça dans le groupe de l'élite internationale des physiciens spécifiquement impliqués dans la physique de l'atome et des quanta. Cette période de sa carrière est associée à la découverte du noyau de l'atome, mais contrairement à l'idée que les récits des manuels nous en donnent, cette découverte est une conséquence indirecte d'un programme de recherche engagé à Montréal sur les propriétés des particules α ⁽¹²⁾. Il convient donc ici d'évoquer avec quelques détails cet épisode afin d'apprécier l'évolution des dispositifs expérimentaux et leur articulation avec la théorie ainsi que l'aspect collaboratif du travail réalisé.

Les recherches à Montréal ont permis à Rutherford de maîtriser les techniques nécessaires pour manipuler et utiliser les échantillons radioactifs dans différents dispositifs afin d'étudier les propriétés des particules α (sa particule favorite) et β . Il a par exemple noté en 1906 que les particules α pouvaient subir des diffusions (« scattering ») lorsqu'elles traversaient un milieu, jusqu'à un angle de 2° en traversant une fenêtre de mica, certaines pouvant même subir des déviations plus importantes.

Une déviation d'un angle de 2° , calcula-t-il, requiert un champ électrique transverse moyen d'environ 100 millions V/cm dans les 0,003 cm d'épaisseur du mica recouvrant la fente, un résultat qui indiquait clairement le fait que l'atome était le siège d'un très intense champ électrique. Cette déduction était toutefois en accord avec l'image de l'atome alors en vigueur à cette époque⁽¹³⁾ et n'impliquait donc aucune modification de la théorie.

Dorénavant installé dans une pièce sous le toit du bâtiment de physique, Rutherford souhaite obtenir de meilleures valeurs du rapport e/m pour la particule α . Il s'associe pour l'occasion au jeune physicien allemand Hans Geiger, avec lequel il engage une collaboration fructueuse. Ensemble, ils mettent au point en 1907 un détecteur basé sur l'ionisation d'un gaz par le passage des ions hélium, dont une forme améliorée deviendra bientôt le célèbre compteur Geiger.

Les particules α , émises à une vitesse de l'ordre de $1,5 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, sont produites par un véritable « canon à particules » constitué d'un très fin tube de verre conique rempli de radon (filiation du radium, produit par les Curie à Paris) et hermétiquement scellé. C'est un procédé délicat à maîtriser, car si le radon s'échappe il diffuse rapidement dans tout le bâtiment, son activité radioactive empêchant alors toute expérience

(12) Une partie de son travail était également consacrée à l'étude de certaines substances radioactives, comme d'identifier l'origine du radium ou les propriétés du radon.

(13) Selon le modèle de Thomson, que l'on examinera plus loin, l'atome est considéré comme un assemblage d'une multitude d'électrons immergés dans une matrice de charges positives. Par analogie avec un célèbre gâteau anglais, ce modèle est surnommé « plum-pudding ».

pendant des heures. Dans les premiers essais, le comptage précis des particules est affecté par un défaut du montage. Après plusieurs expériences, nos expérimentateurs peuvent identifier le coupable : « *the scattering is the devil* ». De « désagrément curieux », la diffusion est devenue « un problème expérimental diabolique ».

Si, après de multiples améliorations, ils obtiennent enfin des valeurs de e en accord avec la structure de la particule α ou atome d'hélium ionisé deux fois, ainsi qu'avec d'autres constantes radioactives, force est d'admettre qu'il convient de mieux quantifier l'étendue de ce phénomène de diffusion des particules α dans la matière. En parallèle de ses expériences de comptage, Geiger utilise alors un dispositif équipé d'un canon à particules à l'une des extrémités et fermé à l'autre par un écran recouvert de sulfure de zinc, ayant la propriété de produire une petite scintillation lorsqu'une particule α le percute.

Une comparaison préalable avec la méthode de détection par compteur électrique avait prouvé que chaque particule α produisait une scintillation sur l'écran de sulfure de zinc : une conséquence immédiate est de pouvoir établir le nombre de particules α émises par gramme de radium. Ces scintillations sont observées de nuit grâce à un microscope grossissant cinquante fois et la distance et l'intensité de la source sont ajustées de manière à obtenir entre vingt et soixante scintillations par minute. Le comptage ne peut s'effectuer plus de deux minutes à cause de la fatigue de l'œil ([11], p. 174).

Muni de ce dispositif, Geiger peut explorer le phénomène de diffusion des particules α . Lorsque le dispositif est vidé de son air, les scintillations produites par les particules percutant l'écran reproduisent l'image géométrique de la fente disposée sur la trajectoire du faisceau, mais quand l'air est admis dans l'enceinte de l'appareil, ou lorsque des feuilles de métal recouvrent la fente, alors des scintillations apparaissent bien au-delà de la région initialement affectée, trahissant une diffusion « notable » des particules traversant la matière, gazeuse ou solide. Geiger trouve en particulier que l'or diffuse plus que l'aluminium. Mais il n'est pas question dans ces expériences de tester si certaines particules rebondissent littéralement sur l'obstacle. Or, un jour, selon Marsden, Rutherford entra dans leur laboratoire, se tourna vers Marsden et dit « *Voyez si vous pouvez mettre en évidence la réflexion directe d'une particule α sur une surface de métal.* » ([12], p. 123).

Grâce à un dispositif très simple (cf. figure 3), consistant en une source radioactive A , une feuille de métal R (platine) et un écran d'observation S , Marsden réussit rapidement à mettre en évidence le phénomène de réflexion des particules α . « [...] À ma surprise, rapportera-t-il, j'ai réussi à observer l'effet recherché et j'ai réalisé des mesures comparatives avec différentes surfaces métalliques, depuis l'aluminium

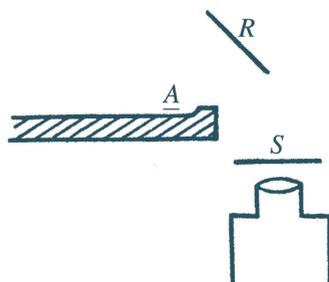


Figure 3

jusqu'au platine. »

Avec Geiger, ils améliorent le dispositif expérimental pour étudier plus en détail la quantité relative de réflexion sur différents métaux et l'effet de l'épaisseur. Ils soumettent leurs résultats dans un article publié le 19 mai 1909 [13]. Le dispositif (cf. figure 4) consiste en un tube conique en verre AB contenant du radon et fermé à son extrémité par une fine feuille de mica, S un écran recouvert de sulfure de zinc, RR une feuille de métal disposée sur la trajectoire du faisceau, M un objectif de microscope et P un épais écran en plomb positionné de manière à ce qu'aucune scintillation n'apparaisse sans la feuille de métal. En présence de celle-ci, certaines particules α sont alors diffusées à des angles supérieurs à 90° (considérée donc comme une réflexion), terminant leur course sur la feuille S et produisant une étincelle observée au microscope.

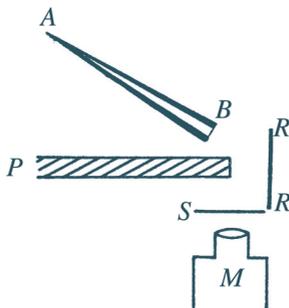


Figure 4

Il apparaît que la diffusion n'est pas un effet de surface, mais de volume, mais sur une épaisseur relativement faible, comme ils le notent : « Si l'on prend en compte la vitesse élevée et la masse de la particule α , il semble surprenant que quelques particules α , comme le montre l'expérience, soient détournées par une couche de 6×10^{-5} cm d'or d'un angle de 90° , voire plus. » ([13], p. 409). Ce nombre s'élève à une particule sur huit mille.

En 1910, Geiger continue ses investigations pour quantifier ce phénomène en déterminant l'angle le plus probable pour lequel une particule α est diffusée par une épaisseur donnée de matière. L'or est le plus efficace pour ce type de mesures, car son pouvoir de diffusion est élevé et il est aisé de la façonner en une feuille de très faible épaisseur uniforme (jusqu'à 0,038 cm pour la plus fine). Connaissant l'épaisseur de la feuille d'or et le diamètre d'un atome (2×10^{-10} m)⁽¹⁴⁾, la particule franchit alors une

(14) En 1865 Joseph Loschmidt calcula l'ordre de grandeur d'une molécule présente dans l'air grâce à la théorie cinétique des gaz, et trouva 10^{-9} m. D'autres méthodes furent employées par la suite pour évaluer la taille d'une molécule ou d'un atome, comme l'exploitation du phénomène de mouvement brownien par Einstein en 1905.

épaisseur d'environ 160 diamètres d'atomes.

À cette époque, la déflexion totale d'une particule α est toujours considérée comme la conséquence d'une multitude de diffusions par les atomes de la feuille. En utilisant la loi de probabilité ordinaire pour ce type de processus aléatoire, Geiger est alors capable d'estimer grâce à ses mesures l'angle le plus probable de diffusion par un seul atome qui est proportionnel à sa masse atomique : pour l'or, il est de l'ordre de 0,005 degré !

Seulement les mesures précédentes conduites avec Marsden en 1909 avaient conclu que seule une particule sur huit mille était réfléchiée, un nombre totalement incompatible avec l'hypothèse d'une diffusion multiple. L'anomalie est maintenant bien circonscrite, mais Geiger ne formule aucune hypothèse pour rendre compte de cette différence, ce sera le travail de Rutherford.

2.4. L'anomalie devient le cœur d'un nouveau programme de recherche

Pour Rutherford, il y a indubitablement une anomalie, entendue comme un conflit entre les résultats d'expériences et le cadre conceptuel dans lequel ils sont initialement interprétés. Ce cadre repose sur le modèle de Thomson, selon lequel la déviation d'une particule provient de son interaction avec le champ électrique de l'atome, ce qui n'est possible que si elle passe à travers lui. Du point de vue de Thomson l'atome est poreux et il est important de ne pas identifier le modèle de l'atome plein avec celui de l'atome comme une bille dure, comme on le rencontre dans certaines activités. Ce modèle contredit donc l'analogie communément adoptée entre l'atome et une sphère solide, une représentation à la base de la théorie cinétique des gaz. Ajoutons toutefois qu'un certain nombre de spéculations à l'époque accordaient à l'atome une constitution interne, basées sur l'existence d'une particule primordiale, comme l'hypothèse de Joseph Prout (1754-1826) ou celle du protyl de William Crookes (1832-1919), cependant très peu d'évidences expérimentales convaincantes venaient les soutenir⁽¹⁵⁾.

Dans le modèle de Thomson, la collision entre une particule α et un atome d'or peut donc être visualisée comme celle de deux essaims d'électrons [14]. Les résultats des premières expériences de Geiger montrant la diffusion à petit angle des particules alpha sont parfaitement interprétables dans ce cadre, d'autant plus, comme nous l'explique l'historien John Heilbron, que « *Rutherford avait l'habitude de se représenter la particule α comme une structure de la taille d'un atome α pas une fièle chose comme l'électron, qui peut être facilement ballotée par un léger champ électromagnétique.* » ([15, p. 65]).

(15) Une des premières expériences venant contredire la représentation de l'atome comme une sphère pleine et solide est exécutée en 1903 par Philip Lenard, au cours de laquelle il montre que l'absorption des électrons accélérés sous un grand potentiel est tellement faible que la seule explication est d'imaginer l'atome comme constitué essentiellement de vide.

L'argument crucial qui a orienté le travail de Rutherford n'était pas la déflexion à grand angle des particules α (une découverte importante), mais bien plutôt que celle-ci n'affectait qu'un nombre extraordinairement faible de projectiles !

Rutherford pose très clairement les termes du problème dans son introduction de son fameux article en 1911 : « *les observations de Geiger et Marsden sur la diffusion des rayons α indiquent que certaines des particules α , approximativement 1 sur 20 000, sont déviées d'un angle de 90 degrés en traversant une feuille d'or d'environ 0,000 04 cm⁽¹⁶⁾. [...] La distribution des particules α pour divers angles de déflexion de grandes valeurs ne suit pas la loi de probabilité attendue si ces déflexions sont le résultat d'un grand nombre de petites déviations. Il semble raisonnable de supposer que la déflexion à grand angle est due à une seule collision atomique [...]. Un calcul simple montre que l'atome doit alors être le siège d'un intense champ électrique de manière à produire de telles déflexions en une seule collision.* » ([16], p. 669). L'innovation majeure réside donc dans l'hypothèse d'une « collision entre un projectile et une cible unique » qui traduit l'existence d'une interaction entre la particule α et la cible, source d'un champ électrique très intense.

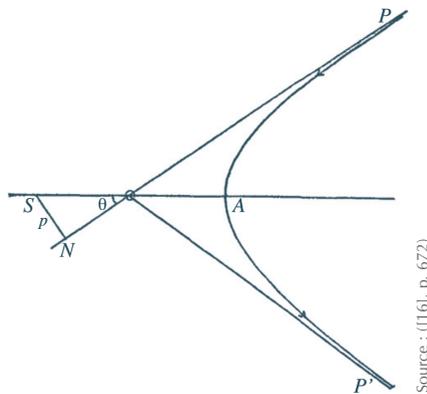
Il propose alors ce qu'il nomme une « hypothèse de travail », une nouvelle représentation de l'atome consistant en une charge électrique condensée au centre de l'atome, dans un volume très petit comparé à celui de l'atome, et la charge électrique contraire étant disséminée autour. Grâce à un traitement mathématique semblable à celui que font les astronomes, dans le problème à deux corps pour lequel un petit objet animé d'une vitesse donnée frôle à une distance minimale d'approche b un corps massif qui joue le rôle de centre « attracteur », source d'un champ de type newtonien. Il arrive ainsi à exprimer le nombre γ de particules α frappant par unité de temps une surface unité de l'écran de sulfure de zinc, situé à une distance r de la feuille métallique, dans une direction faisant un angle Φ avec le faisceau incident :

$$\gamma = \frac{Q n t b^2}{\sin^4(\Phi/2)} \times \frac{1}{16 r^2}.$$

Dans cette formule Q est le nombre total de particules incidentes, n le nombre d'atomes par unité de volume, t l'épaisseur du matériau et b la distance minimale d'approche si la collision était frontale (ce paramètre dépendant de la vitesse initiale des particules α , de leur charge et de la charge centrale de l'atome cible). Grâce à cette formule Rutherford est capable de calculer en particulier la distribution angulaire des particules α diffusées, distribution qui, dans les limites des erreurs expérimentales, est compatible avec celle obtenue par Geiger sur une très fine feuille d'or pour des angles compris entre 30° et 150°.

Il est à noter que ses calculs sont indépendants du signe de la charge électrique

(16) Cette valeur de l'épaisseur de la feuille d'or rapportée ici par Rutherford renvoie à celle de Geiger cité dans son article de 1909 (qui est d'ailleurs de $6 \cdot 10^{-5}$ cm).



Source : ([16], p. 672)

Figure 5 - Schéma montrant la déviation d'une particule en s'approchant de la charge centrale d'un atome situé en S. p est le paramètre d'impact et SA est la distance minimale d'approche.

centrale, la déviation de la particule α peut être le résultat d'une attraction ou d'une répulsion. Rutherford écrit : « *Les déductions théoriques exposées jusqu'ici sont indépendantes du signe de la charge centrale, et il n'a pas été possible d'obtenir une preuve définitive pour savoir si elle est positive ou négative* ». Même s'il considère le cas avec une charge positive au centre et les électrons en périphérie, il subsiste une certaine ambivalence que seules de nouvelles expériences pourront lever.

Réaliser que l'on est en présence d'une anomalie n'est pas un acte trivial comme l'expliquera un proche collaborateur de Rutherford : « *Le fait expérimental qui mena à la conception globale de l'atome nucléaire fut que très peu de particules α étaient diffusées à de très grands angles, 90° ou plus, par de minces feuilles. Une autre personne, et une bonne personne, aurait pu n'y voir rien de très important – plein de bricoles inexpliquées adviennent dans le cours d'une recherche expérimentale. Les effets observés auraient pu, d'une certaine manière, être attribués à une contamination. [...] La caractéristique d'un génie est de distinguer ce qui est significatif de ce qui est de moindre importance et à cet égard Rutherford était un génie immense.* » ([17], p. 444).

Marsden racontera également l'épisode de son point de vue dans son Rutherford Memorial Lecture en 1948 : « *Je ne crois pas qu'il s'attendait à un tel résultat, mais c'était l'un de ces "pressentiments" que peut-être quelques effets pourraient être observés, et que dans tous les cas il fallait partir en reconnaissance pour explorer ce territoire voisin. Rutherford était toujours prêt à rencontrer l'imprévu et à l'exploiter, quand l'occasion était favorable, mais il savait aussi quand s'arrêter dans de telles excursions.* » ([18], p. 317). Cette intuition (ou sérendipité) est souvent à l'origine des grandes découvertes, celle-là même qui a poussé Becquerel à développer sa plaque photographique alors que rien normalement ne le pressait à le faire.

Ainsi en 1908 la diffusion des particules alpha était un problème technique à « éliminer » : après 1909 et les expériences de Geiger et Marsden, c'est le cadre théorique, le modèle de Thomson, qui semble incapable d'interpréter ces nouveaux résultats. L'anomalie a changé de camp. À quel moment la bascule a-t-elle opéré entre le modèle de Thomson et celui de l'atome nucléaire ? Cette nouvelle idée semble avoir été évoquée pour la première fois dans une conversation tenue lors d'une soirée à la résidence de Rutherford, juste avant Noël 1910. « *Après dîner, la théorie nucléaire surgit* », se remémorera Charles Galton Darwin, qui était présent à cet événement. Rutherford annonça son hypothèse publiquement pour la première fois le 7 mars 1911 au meeting de la Manchester Literary and Philosophical Society, puis fut soumis plus tard en avril et publié dans le *Philosophical Magazine* en mai 1911. Il est clair que l'irruption de cette idée heureuse ne découle pas d'une accumulation de données par simple induction, elle engage plutôt un mode de raisonnement qui conduit à la formulation d'une hypothèse plausible que Rutherford nomme une « hypothèse de travail »⁽¹⁷⁾.

Cette stratégie cognitive peut mobiliser différents outils, comme l'analogie, les expériences de pensée et les représentations par l'image. Le rôle de la créativité et le caractère hypothétique des concepts scientifiques font d'ailleurs partie des aspects de la nature de la science à enseigner, selon un consensus établi parmi les chercheurs en didactique des disciplines scientifiques et techniques. Nous devons donc enrichir notre vision de ce qu'est la « méthode scientifique » telle qu'elle est souvent présentée et accepter d'y inclure des stratégies de raisonnement, ou des principes heuristiques, plutôt qu'un procédé mobilisant mécaniquement une logique inductive ou déductive à un ensemble de propositions ou de faits.

2.5. Valider la théorie par de nouvelles expériences

Une fois les calculs effectués d'après la nouvelle théorie de l'atome planétaire⁽¹⁸⁾, et

- (17) Il est proche d'un mode soutenu par certains épistémologues et nommé mode « abductif ». Ce mode de raisonnement conduisant à des hypothèses plausibles (dans des représentations verbales ou non verbales) est conceptualisé comme une inférence basée des données, ou, plus spécifiquement, sur des phénomènes jugés comme surprenants ou anormaux. De ce point de vue, la découverte est initialement un processus d'explication de ces données non conformes aux anticipations. Le raisonnement abductif procède ainsi depuis une anomalie jusqu'à une hypothèse exploratoire à la lumière de laquelle les phénomènes perdront leur caractère de surprise ou d'anomalie.
- (18) Comme l'arrangement des électrons autour du noyau n'est pas discuté, il est impropre d'appeler ce modèle « planétaire » ; c'est le physicien français Jean Perrin qui, en 1901, le proposa. Le physicien japonais Hantaro Nagaoka a imaginé, en 1904, un atome « saturnien », dans lequel les électrons sont confinés dans un disque. Tous partagent donc l'analogie générale d'un centre (Soleil/planète/noyau) autour duquel des particules sont

non d'après celui de Thomson, de nouvelles expériences sont nécessaires pour la valider. Celles-ci seront menées toujours par Geiger et Marsden en 1912 grâce à un dispositif dont la conception est celle rappelée de loin dans les manuels (cf. figure 6).

Dans leur article paru l'année suivante dans le *Philosophical Magazine*, Geiger et Marsden reviennent sur ces nouvelles expériences de diffusion des particules α sur des feuilles de métal. Ils rappellent que les diffusions à petit angle sont bien expliquées par un processus de diffusions multiples. Cependant, les résultats des réflexions sont difficiles à interpréter dans ce cadre. « *Le nombre de réflexions, bien que faible, est, cependant, trop important pour être expliqué par la simple théorie de la diffusion.* » ([19], p. 605).

En conséquence de ces résultats, « *le Professeur Rutherford a récemment développé une théorie pour rendre compte de la diffusion des particules α pour ces grands angles, l'hypothèse étant que ces déflexions soient la conséquence d'une rencontre intime entre une particule α avec un seul atome de la matière traversée. Dans cette théorie un atome est supposé consister en une forte charge centrale positive ou négative concentrée dans une sphère de rayon plus petit que 3×10^{-12} cm, et entourée par de l'électricité de signe opposée distribuée dans l'espace restant de l'atome de rayon environ 10^{-8} cm* ». Geiger et Marsden soulignent que les résultats de leurs investigations sont en bon accord avec les déductions théoriques de Rutherford, et corroborent l'exactitude du nouveau modèle de l'atome.

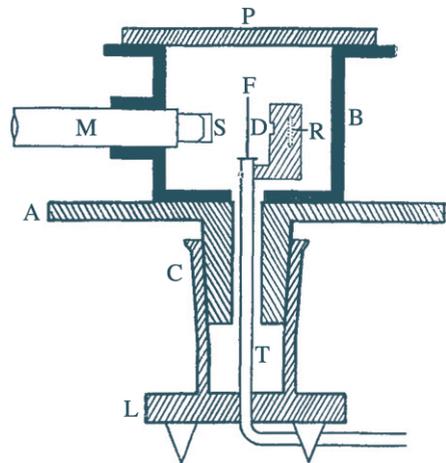


Figure 6 - Dispositif expérimental de Geiger et Marsden. Il est constitué d'une boîte métallique cylindrique B fermée par un couvercle en verre dépoli P. Cette boîte contient la source R de particules α munie d'un diaphragme D, d'une feuille métallique diffuseuse F et d'un microscope M auquel est rigidement fixé un écran de sulfure de zinc S. La boîte est fixée sur un support circulaire gradué A, pouvant être tourné au moyen d'un joint conique hermétique C. La boîte B et le microscope M étant solidaires du support A, tous deux peuvent tourner tandis que la feuille métallique et la source de radiation restent dans la même position, fixés à l'armature du dispositif par sa base L. Le vide est effectué par l'intermédiaire du tube T (Source : [19], p. 607).

en mouvement (planètes/astéroïdes/électrons) : ce sont donc des modèles « nucléaires ». La première occurrence du mot « noyau » se trouve dans un article de J.W. Nicholson, en 1911, dans le sens adopté par Rutherford. Ce dernier l'utilise pour la première fois en 1913 dans *Radioactive substances and their radiations*.

CONCLUSION

Cet épisode possède de multiples attraits pour étudier la nature de la science et les enjeux épistémologiques mobilisés dans les découvertes scientifiques. « *L'expérience, déclarée Rutherford, dirigée par l'imagination disciplinée d'un individu ou, mieux encore, par un groupe d'individus aux mentalités variées, est capable d'attendre des résultats qui transcendent de loin la seule imagination du plus grand philosophe.* » ([20], Frontmatter). L'expérience s'articule avec l'imagination et la pensée rationnelle, nous rappelle-t-il, et la science est une entreprise collective. Voilà des thèmes que l'on se doit d'exposer aux élèves pour leur présenter la science telle qu'elle se fait réellement, et non telle qu'elle est codifiée dans les manuels.

L'expérience de Rutherford nous invite donc à remettre à leur juste place les acteurs de l'un des événements fondateurs de la physique moderne, à nous plonger dans les arcanes de la découverte scientifique, et aussi à nous faire prendre conscience du va-et-vient permanent entre théorie et expérience.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] G. Nihoul, « L'esprit physicien en mutation », Akademos, *Revue de la Conférence nationale des Académies des sciences, lettres et arts*, p. 127-131, 2013.
- [2] D. Beaufils et L. Maurines, « Un enjeu de l'histoire des sciences dans l'enseignement : l'image de la nature des sciences et de l'activité scientifique », *RDST*, **3**, p. 271-305, 2011.
- [3] M. Niaz, "A Reconstruction of Structure of the Atom and Its Implications for General Physics Textbooks", *Journal of Science Education and Technology*, **13**, p. 409-424, 2004.
- [4] D. Beaufils, L. Maurines et C. Chapuis, « Compte-rendu d'enquête sur l'histoire des sciences auprès d'enseignants de physique et chimie », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 104, n° 924, p. 581-598, mai 2010.
- [5] D. Fauque, « La "longue marche" d'un enseignement de l'histoire des sciences et des techniques », Tréma (Édition électronique), **26**, p. 1-13, 2006.
- [6] D. Beaufils et L. Maurines, « L'image de la physique au travers de l'enseignement de la spectroscopie : proposition didactiques », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 107, n° 956, p. 657-679, juin-juillet-août-septembre 2013.
- [7] B. Beausaude-Vincent et I. Stengers, *Histoire de la chimie*, Paris : La Découverte, 1993.
- [8] R. Millikan, *The Electron*, The University Of Chicago Press, 1918.

- [9] M. Leone, N. Robotti and G. Verna, “‘Rutherford’s experiment’ on alpha particles scattering: the experiment that never was”, *Physics Education*, 53, p. 1-10, 2018.
- [10] E. Rutherford, “The Electrical Structure of Matter”, *Nature*, 112, p. 409-419, 1923.
- [11] H. Geiger, “On the Scattering of the α -Particles by Matter”, *Proc. R. Soc. Lond. A*, 81, p. 174-177, 1908.
- [12] A. Pais, *Niels Bohr’s Times, in Physics, Philosophy, and Polity*, Oxford University Press, 1991.
- [13] H. Geiger and E. Marsden, “On a Diffuse Reflection of the α -particles”, *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 82, p. 495-500, 1909.
- [14] N. Kipnis, “Scientific Analogies and Their Use in Teaching Science”, *Science & Education*, 14, p. 199-233, 2005.
- [15] J. Heilbron, *Ernest Rutherford And the Explosion of Atoms*, Oxford University Press, 2004.
- [16] E. Rutherford, “The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom”, *Philosophical Magazine*, 21, p. 669-688, 1911.
- [17] E. N. da C. Andrade, “The Rutherford Memorial Lecture, 1957. The Birth of the Nuclear Atom”, *Proc. R. Soc. Lond. A*, 244, p. 437-455, 1958.
- [18] E. Marsden, “4th Rutherford Memorial Lecture, delivered 14th December 1949”, *Proceeding of the Physical Society*, 63, p. 305-322, 1950.
- [19] H. Geiger and E. Marsden, “The laws of deflexion of a particles through large angles”, *Philosophical Magazine*, 25, p. 604-623, 1913.
- [20] A. S. Eve, *Rutherford: Being the Life and Letters of the Rt Hon. Lord Rutherford*, Cambridge University Press, 2013.



Francis BEAUBOIS

Professeur de physique-chimie

Lycée Paul Langevin - Beauvais (Oise)

Chercheur associé au Laboratoire Histoire des sciences mathématiques (HSM)

Institut des mathématiques de Jussieu (IMJ)

Université Pierre-et-Marie Curie (Paris 6)

Systèmes de grandeurs

Partie 2 - Structure des théories et des systèmes d'unités

par Mickaël MELZANI
Lycée Raoul Follereau - 90000 Belfort
mickael.melzani@gmail.com
www.mmelzani.fr

NOUS SAVONS QUE LES DÉFINITIONS des unités sont arbitraires et affaire de conventions. Mais en amont du choix des unités, il vient celui de la structure du système d'unités. Cette structure consiste d'une part à fixer le cadre dimensionnel de la théorie, via le choix d'un jeu de grandeurs de base dont les dimensions servent à exprimer toutes les autres. Par exemple, le SI (Système international) comprend sept grandeurs de base, les autres étant dites dérivées. Pourquoi sept ? Comment choisir ? Quelle utilité ? Nous répondons à ces questions. D'autre part, ce sont les unités qui permettent la connexion entre la théorie et le réel, et la structure du système consiste également à choisir les grandeurs qui sont directement mesurées et celles dont les mesures sont déduites de formules issues de la théorie. Ceci sépare les grandeurs en grandeurs primaires et secondaires, et nous étudions cette partition et ses conséquences. Ainsi le temps et la quantité de matière sont les seules grandeurs de base primaires du SI d'après 2019, si bien que toutes les mesures de la physique peuvent se ramener à celle d'un temps ou à un comptage !

"All knowledge of reality starts from experience and ends in it."

Albert Einstein [1]

INTRODUCTION

L'objectif des sciences physiques est d'interpréter les phénomènes naturels observés, de prédire leur évolution, ou encore de les reproduire de façon contrôlée. Ceci se fait à travers une démarche assez systématique que nous détaillerons dans la suite. Pour l'instant, il suffit de souligner sans surprise qu'une des étapes clés de cette démarche est la réalisation de mesures. Car en effet, les mesures sont l'étape qui permet d'attribuer des valeurs chiffrées aux grandeurs nécessaires à toute théorie physique (masse, vitesse...), et donc tout simplement de vérifier et d'utiliser la théorie. Une mesure est la comparaison d'une grandeur à une autre grandeur de même nature et servant de référence. Dans le paradigme actuel, cette grandeur de référence est universellement partagée par la communauté scientifique et est dénommée unité. L'unité « mètre » est ainsi précisément définie et sert à exprimer de façon univoque toute mesure de longueur par comparaison à cet étalon. Les unités tiennent donc une place centrale dans

le fonctionnement même des sciences physiques, en ce qu'elles assurent la connexion entre les concepts théoriques et le monde matériel. Structures des théories et des systèmes d'unités vont ainsi de pair.

Le système d'unités en vigueur à l'échelle mondiale est le Système international d'unités (SI). Il comporte sept grandeurs de base, les autres étant des grandeurs dérivées. Pourquoi sept, pourquoi celles-ci, et avant tout, que signifie « grandeur de base » et « dérivée » ? Comment et où exactement la connexion avec le réel est-elle effectuée ? Nous allons voir que répondre à ces questions nécessite de décortiquer la structure d'une théorie physique et d'analyser la manière dont elle opère sur le réel. Nous faisons ceci dans la partie 1. Nous y définissons rigoureusement des termes comme théorie, modèle, grandeur physique, nature de grandeur, mesure, dimension, homogénéité. La partie 2 s'intéresse ensuite aux grandeurs de base et aux grandeurs dérivées et présente en détail ce dont il s'agit. Nous montrons comment il est possible de choisir le nombre de grandeurs de base du système. Nous verrons cependant que si cette dichotomie base/dérivée est pertinente pour l'analyse dimensionnelle, elle ne suffit pas à distinguer les grandeurs mesurées directement dans le monde matériel de celles déduites de l'application de formules et que l'étude de la connexion avec le réel impose d'introduire une nouvelle partition : celle entre grandeurs primaires et grandeurs secondaires, étudiée dans la partie 3. Nous montrerons qu'il est nécessaire qu'un système d'unités possède des grandeurs primaires avec certaines contraintes pour pouvoir réaliser des mesures, et nous étudierons l'exemple du SI d'après 2019 en montrant que toute mesure peut se ramener à celle d'un temps ou à un comptage.

Cet article comporte des définitions d'un certain nombre de termes centraux, dont nous donnons un index dans le tableau 1. Les termes en question apparaissent en gras dans le texte lorsqu'il s'agit de les définir.

Terme	Page	Terme	Page
Théorie	29 et 34	Homogénéité	40
Modèle	30	Unité cohérente	44
Grandeur physique ou grandeur	31	Grandeur de base	45
Nature d'une grandeur	33	Grandeur dérivée	44
Unité de mesure	35	Constante de conversion	51
Étalon	36	Système de grandeurs	51
Échelle de valeurs	37	Système d'unités	52
Mesure	37	Grandeur primaire	53
Dimension	39 et 44	Grandeur secondaire	54

Tableau 1 - Notions définies dans cet article.

Enfin, ce travail s'appuie principalement sur deux sources : la brochure «Vocabulaire international de la métrologie» (VIM) éditée par le Bureau international des poids et mesures (BIPM) [2], et qui contient les définitions recommandées de nombreux termes (lorsque les termes que nous définissons sont présents dans le VIM, notre définition est alors en accord avec celle du VIM) ; et l'ouvrage de Percy Williams Bridgman [3] qui dans les années 1920 fonde de façon rigoureuse l'analyse dimensionnelle et qui présente les notions – absentes du document du VIM – de grandeurs primaires et secondaires. Pour une reprise moderne de l'ouvrage de P. W. Bridgman, on pourra aussi consulter un cours du MIT donné par Andrei A. Sonin [4].

1. STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT DES SCIENCES PHYSIQUES

1.1. Théorie, modèle, monde réel et rôle des unités

Nous commençons par prendre du recul sur la façon dont fonctionnent les sciences physiques, notamment en distinguant des concepts comme théorie, modèle et observations. Ceci sera nécessaire à une discussion précise dans la suite. Nous avons décrit dans un article précédent ([5] et site Internet de l'auteur) une proposition de cadre général qui permet de synthétiser la façon dont fonctionnent les sciences physiques. Nous résumons ce cadre ici. Commençons par donner deux définitions.

- ◆ **Théorie** : une théorie physique est un ensemble de concepts inventés, reliés entre eux par des lois, certaines étant postulées, d'autres déduites de celles postulées. Une théorie possède toujours un domaine de validité restreint. Une « bonne » théorie permet, avec des postulats peu nombreux et « raisonnables », d'expliquer une grande classe de phénomènes avec une bonne précision.

Exemples : la théorie de la mécanique et de la gravitation de Newton (ou théorie de la mécanique classique), la théorie de la relativité restreinte, la théorie de la relativité générale, la théorie de la thermodynamique, la théorie de l'optique géométrique, la théorie de l'optique ondulatoire, la théorie de l'électrostatique, la théorie de la magnétostatique, la théorie de l'électromagnétisme de Maxwell, la théorie de l'électrocinétique, la théorie de la mécanique quantique, la théorie de l'hydrodynamique...

Ainsi dans la suite de cet article nous emploierons les termes « la théorie utilisée » ou « la théorie » dans le sens bien précis détaillé ci-dessus. Il s'agira donc à chaque fois de la théorie utilisée (ou des théories utilisées conjointement) pour traiter le problème physique en jeu, c'est-à-dire d'un ensemble de concepts, de postulats (et de résultats qui en découlent) bien identifiés. Des exemples des théories les plus courantes ont été donnés ci-dessus.

Ajoutons que cette définition de « théorie » se rapproche de la définition du terme

« système de grandeurs » donné par le VIM [2] : « ensemble de grandeurs associé à un ensemble de relations non contradictoires entre ces grandeurs ». Nous verrons toutefois qu'un système de grandeurs est un peu plus qu'une théorie, car il faut en plus avoir choisi un ensemble de grandeurs de base indépendantes dimensionnellement.

- ◆ **Modèle** : traduction d'une situation observée en des termes physiques (qui appartiennent à une théorie choisie), accompagnée d'une simplification.

Prenons le temps d'un exemple pour illustrer ceci. Nous souhaitons décrire la chute d'un objet d'une certaine hauteur.

- ◆ Les mesures effectuées sont une durée (le temps de chute) et une longueur (la hauteur de chute), pour divers objets lâchés sans vitesse initiale.
- ◆ Pour décrire cette situation, il faut d'abord choisir une théorie. Ici, la *théorie* de la mécanique et de la gravitation de Newton semble appropriée. Il faut ensuite effectuer un *modèle* de la situation étudiée, c'est-à-dire traduire la situation dans le langage de la théorie. Nous décrivons l'objet comme une masse ponctuelle (ce qui est bien un concept propre à la théorie), prenons un repère cartésien avec l'axe z vers le bas, un champ de pesanteur uniforme $\mathbf{g} = g \mathbf{e}_z$, choisissons de négliger les frottements, supposons le référentiel terrestre galiléen (étape de modélisation dans la figure 1).

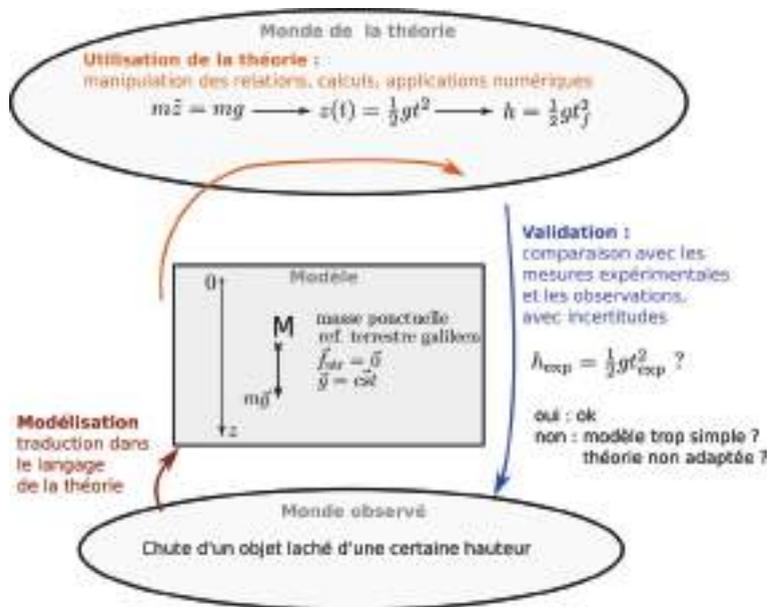


Figure 1 - Illustration avec le diagramme des deux mondes de la démarche de modélisation d'une situation physique.

- ◆ Le problème est alors devenu mathématique. Il faut utiliser les lois de la théorie et manipuler les expressions mathématiques. Par exemple, nous utilisons la seconde loi de Newton, nous l'intégrons, pour aboutir simplement à la prédiction de la relation $h = gt^2/2$ entre la hauteur de chute h et le temps de chute t (étape d'utilisation de la théorie dans la figure 1, page ci-contre).
- ◆ La promenade dans le monde de la théorie étant terminée, il faut confronter cette prédiction à des mesures. Celles-ci sont accompagnées d'incertitudes. Les hypothèses de modélisation et la capacité de la théorie à décrire la situation sont validées si les prédictions théoriques et les valeurs expérimentales sont compatibles aux incertitudes près (étape de validation dans la figure 1, page ci-contre).

Toute cette démarche est résumée dans le « diagramme des deux mondes » de la figure 1 (cf. page ci-contre). Ce qui nous intéresse ici est de comprendre à quel endroit précisément les unités interviennent : au moment d'attribuer une valeur numérique extraite de l'expérience aux grandeurs utilisées par la théorie. Dans notre exemple au moment des mesures de durée et de longueur. Les unités jouent donc un rôle essentiel en permettant de préciser l'étalon utilisé (le mètre, la seconde), et donc de donner un sens aux valeurs numériques. Les unités et leurs définitions sont donc nécessaires pour effectuer des mesures, et ainsi pour réaliser la connexion entre la théorie et le réel⁽¹⁾.

De manière plus large, le diagramme des deux mondes peut également servir de schéma récapitulatif d'une part pour les concepts et les lois utilisés par une théorie, et d'autre part pour l'étendue du domaine de validité de la théorie. Nous donnons l'exemple de la théorie de la mécanique et de la gravitation de Newton (ou théorie de la mécanique classique) dans la figure 2 (cf. page ci-après). D'autres diagrammes sont disponibles sur le site Internet de l'auteur.

Parmi les concepts qui constituent le monde de la théorie figurent les grandeurs physiques. On peut préciser la définition de ce terme :

- ◆ **Grandeur physique** (ou grandeur chimique, ou biologique, ou grandeur tout court...) : propriété d'un phénomène, d'un évènement, d'un corps ou d'une substance, que l'on peut exprimer quantitativement sous forme d'un nombre (la valeur numérique) et d'une référence (par exemple l'unité).

Exemples : longueur d'une tige, masse d'un mobile, énergie cinétique d'une voiture, concentration d'une solution, charge d'un électron... On peut également parler de longueur, masse, concentration pour désigner une grandeur sans préciser d'objet particulier.

(1) Nous nuancerons ceci en annexe dans une perspective plus historique : c'est de façon plus générale les protocoles de mesure qui réalisent cette connexion, et dans le paradigme actuel des sciences ces protocoles passent par l'utilisation d'unités. Cela n'a pas toujours été le cas.

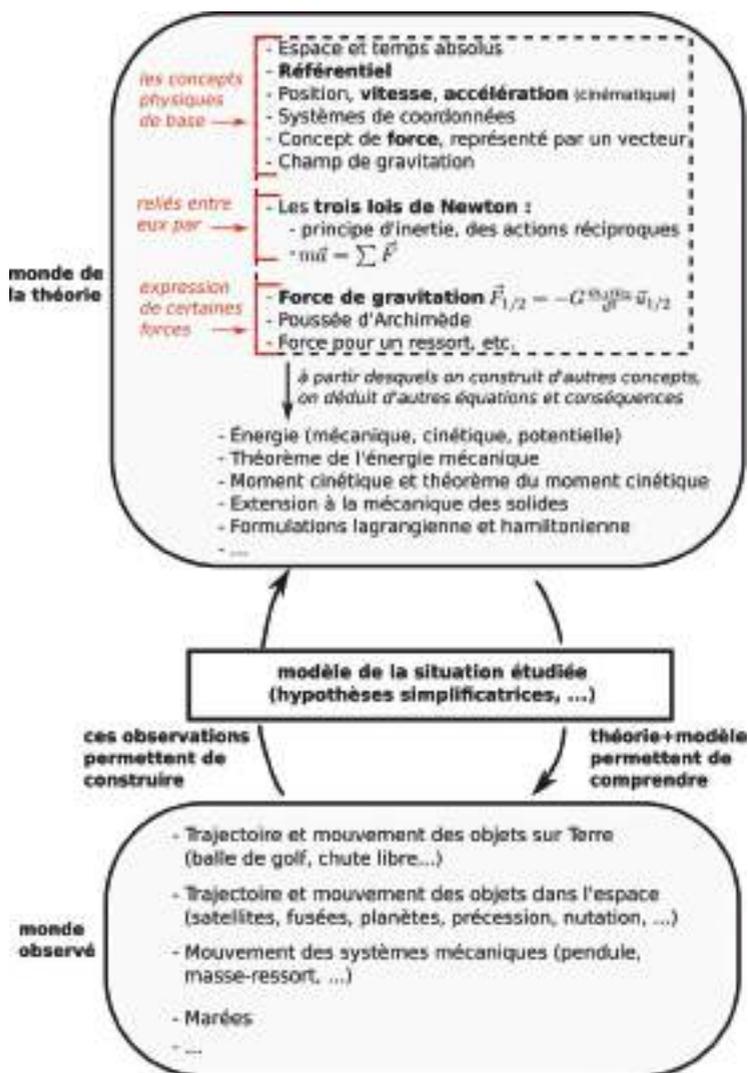


Figure 2 - Diagramme des deux mondes de la théorie de la mécanique et de la gravitation de Newton, qui illustre les concepts de cette théorie et son domaine de validité.

- Cette définition indique qu'une grandeur n'est pas quelque chose en soi, mais une propriété rattachée à un objet (sa masse, sa vitesse) ou à un événement (sa position, le temps associé).
- C'est la théorie utilisée qui donne la définition des grandeurs. Une grandeur donnée est définie dans une théorie donnée par une relation de définition (« le travail d'une force lors d'un déplacement élémentaire est défini comme $\delta W = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l}$ », ou encore par une définition axiomatique (« il existe une grandeur U appelée énergie interne qui vérifie... »). Souvent, il ne suffit pas de donner juste une formule, mais d'accompagner celle-ci d'explications sur l'utilisation et la signification de la grandeur.
- La propriété en question doit être exprimable quantitativement sous forme d'un nombre et d'une référence, ce qui est synonyme de « être mesurable ». La référence peut être de divers types, voir page 37 dans la définition de mesure.
- Le fait de pouvoir être mesuré quantitativement exclut certaines propriétés (la couleur, la forme d'un objet...) qui n'en restent pas moins des attributs physiques ou propriétés qualitatives (dénomination du VIM) auxquels on peut attribuer une valeur ou une dénomination. Pour ces grandeurs, il est possible d'effectuer un test d'égalité, mais il n'existe pas toujours d'opération de comparaison, d'addition, de rapport ou de définition du zéro.

Un concept fondamental associé aux grandeurs est celui de leur nature.

- ◆ **Nature d'une grandeur** : elle correspond au statut de la grandeur dans la théorie. Ainsi dans la théorie de la mécanique classique (cf. figure 2, page ci-contre) une masse a la nature d'une masse, une énergie cinétique ou potentielle ou le travail d'une force ont la nature d'une énergie, un couple ou le moment d'une force ont la nature d'un moment... C'est la théorie utilisée qui indique, à l'aide d'explications textuelles ou *via* ses équations fondamentales, la nature des grandeurs.
 - Deux grandeurs de même nature peuvent être comparées, additionnées : c'est-à-dire soit que la théorie définit un moyen opératoire direct pour le faire (ajouter deux masses consiste à les considérer ensemble, ajouter deux longueurs consiste à placer les objets correspondants bout à bout...), soit qu'elle dispose de lois qui permettent de le faire (ajouter deux vitesses est parfaitement légal dans la théorie de la mécanique classique, ajouter une vitesse et une masse n'a aucun sens donné par cette même théorie). Ces deux options sont souvent toutes deux réalisables.
 - Une théorie ne donne aucun sens à la comparaison ou à l'addition de grandeurs de natures différentes.
 - Deux grandeurs de même nature ont nécessairement même dimension.
 - En revanche, deux grandeurs de même dimension n'ont pas nécessairement la même nature. Par exemple dans le SI, un couple et une énergie cinétique ont

même dimension⁽²⁾, $M \cdot L^2 \cdot T^{-2}$, mais ne sont pas de même nature et ne peuvent être ni comparés ni additionnés. Il en est de même pour une entropie et une capacité thermique, ou pour un nombre d'entités et un indice optique.

Les deux points précédents montrent que la nature des grandeurs est plus fondamentale que leur dimension. Ceci sera précisé lors de la définition de « dimension » page 39.

Ces définitions étant posées, nous pouvons dégager des traits généraux à la structure d'une théorie :

- ◆ Présence d'un certain nombre de concepts (référentiel, objet ponctuel, centre de masse...), dont des grandeurs physiques (distance, temps, vitesse, masse, force, énergie...).
- ◆ Présence de relations mathématiques entre les grandeurs physiques, valables sous des hypothèses données par la théorie et expliquées par des phrases.

Ces relations, lois ou formules, n'ont pas toutes le même statut :

- (a) Certaines sont postulées sans démonstration mathématique. Pour la mécanique, il s'agirait des trois lois de Newton. Elles ne sont certes pas postulées au hasard, le cheminement intellectuel qui a mené à leur construction est basé sur des motivations expérimentales, théoriques ou esthétiques... et leur validation passe ultimement par le pouvoir que possède l'édifice théorique à prédire un ensemble d'expériences. Mais elles ont le caractère de postulat, car elles ne peuvent pas être démontrées par des manipulations mathématiques au sein de la théorie elle-même.
- (b) D'autres sont déduites des postulats par des démonstrations au sein du cadre de la théorie. Ainsi on démontre à partir des trois lois de Newton la conservation de $E_c + E_p$ pour un mouvement conservatif, E_c et E_p étant définies par des relations de type (c) ci-dessous.
- (c) Enfin, certaines relations ne sont pas des lois comme en (a) et (b), mais de simples définitions. Par exemple la définition $E_c = m v^2/2$ de l'énergie cinétique, ou encore celle $v = dx/dt$ de la vitesse. Nous verrons le rôle particulier de ces relations vis-à-vis de la mesure dans la partie 3.

Y a-t-il besoin d'un système d'unités propre attaché à chaque théorie ? Non, car les théories ne sont pas isolées les unes des autres, mais sont reliées par des concepts communs. Elles peuvent alors fonctionner conjointement dans les situations où leurs domaines de validité se recoupent. Ces concepts communs peuvent être très généraux, comme l'espace, le temps, l'énergie, ou plus restreints comme par exemple la pression (celle de la théorie de la mécanique classique et celle de la thermodynamique s'identifient), la température (en thermodynamique, cinétique et physique statistique)... C'est

(2) M pour masse, L pour longueur, T pour temps.

pourquoi il est possible de faire fonctionner l'ensemble de l'édifice des sciences physiques avec un nombre restreint d'unités de base communes.

1.2. Autour de la mesure : étalon, unités...

Avant de poursuivre avec les concepts de grandeurs de base et dérivée dans la partie 2, il est nécessaire de préciser un certain nombre de définitions relatives à la mesure. Donnons d'abord trois définitions, celles d'unité de mesure, d'étalon, et de mesure.

- ◆ **Unité de mesure** : grandeur scalaire réelle, définie et adoptée par convention, à laquelle on peut comparer toute autre grandeur de même nature pour exprimer le rapport des deux grandeurs sous la forme d'un nombre.
- Préciser l'unité revient donc à indiquer avec quelle grandeur on effectue le rapport : $l = 2,2 \text{ m}$ signifie que l est 2,2 fois plus long que l'étalon qui réalise le mètre.

Exemples

- Dans le SI, les mesures de longueur, de durée, de masse, de température thermodynamique, de courant électrique, de quantité de matière, sont toutes des comparaisons à une unité. Écrire par exemple $T = 300 \text{ K}$ signifie que T est trois cents fois la température 1 K.
- Dans le SI, l'unité d'énergie cinétique est le joule. Un joule correspond à l'énergie cinétique que possède une masse de 1 kg ayant une vitesse de 1 m/s. Une énergie cinétique de huit joules correspond à huit fois cette unité.
- Dans le SI, l'unité de force est le newton. Un newton est la force nécessaire pour provoquer une accélération de 1 m/s^2 sur une masse de 1 kg.

Remarquons bien qu'il faut pour cela que la théorie utilisée permette de réaliser une opération de rapport entre les deux grandeurs de même nature afin que la comparaison à l'unité ait un sens. Ceci peut se faire *via* les lois de la théorie, et/ou à travers un protocole expérimental permis par la théorie (voir partie 3). Ceci implique aussi automatiquement l'existence d'un zéro défini de façon univoque par la théorie, indépendant de l'unité choisie (c'est pourquoi on ne précise par l'unité lorsqu'on écrit par exemple $l = 0$). Nous précisons ceci dans les sous-paragraphes 3.2.1. et 3.2.2.

- Avec les exemples ci-dessus, on peut écrire de façon formelle $1 \text{ J} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, ou encore $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$, et on peut effectuer des opérations en traitant les unités comme des entités mathématiques.
- Même si elle s'exprime en fonction d'autres unités, l'unité d'énergie est avant tout le joule, et celle de force le newton, avec les définitions ci-dessus et les égalités qui en découlent.

- Nous verrons que le SI fait le choix d'utiliser des unités cohérentes pour toutes les grandeurs dérivées (page 42).
- Rappelons qu'une unité est définie en fixant la valeur numérique d'une grandeur physique à une valeur conventionnelle, lorsqu'exprimée dans l'unité ainsi définie (cf. article 1.1. paru dans *Le Bup* n° 1017 d'octobre 2019).
- ◆ **Étalon** : réalisation pratique d'une unité. Il s'agit donc d'un objet ou d'une expérience dont une des propriétés sert de référence lors de la mesure d'une grandeur de même nature.

Exemples

- La longueur du prototype du mètre en platine iridié était à la fois la définition de l'unité et sa réalisation pratique, donc un étalon de longueur.
- La masse du prototype international du kilogramme servait jusqu'en 2019 à définir l'unité kilogramme, et servait également d'étalon de masse.
- Si le mètre est défini par rapport à la longueur d'onde d'une radiation atomique, alors on peut dire de façon abusive que cette longueur d'onde est l'étalon de longueur, même si on confond ainsi définition (1 m est tel que $\lambda_{\text{réf}} = \{\lambda_{\text{réf}}\} \text{ m}$) et réalisation pratique (un étalon qui serait une matérialisation opératoire d'une longueur de référence dans une expérience).
- La distance parcourue par la lumière dans le vide en une durée fixée est la définition actuelle de l'unité mètre. Cette distance peut être qualifiée d'étalon de longueur, même si là encore on confond définition et réalisation pratique.
- Dans le SI d'après 2019, le kilogramme est défini en fixant la valeur numérique de la constante de Planck. Un étalon de masse associé est une réalisation pratique de cette définition, par exemple la masse d'un objet calibré par une expérience avec une balance de Kibble (voir article 1.1)⁽³⁾.
- Pour la température thermodynamique, avant 2019 l'unité kelvin est définie en prenant l'objet (non unique, mais précisément défini) réalisé par de l'eau à l'équilibre liquide-vapeur-solide. Cet objet ainsi fabriqué possède une température $T_{\text{réf}}$ bien définie (résultat théorique du point triple) à laquelle on attribue la valeur numérique 273,16 pour définir l'unité kelvin. Le VIM parle d'étalon pour qualifier une telle réalisation. Les autres valeurs numériques sont obtenues à partir de celle-ci, *via* une formule de la théorie (la température de la théorie thermodynamique vérifie par exemple la relation $T = T_{\text{réf}} p/p_{\text{réf}}$ pour un gaz parfait dans un volume fermé constant, ce qui permet par mesure de p de mesurer T).

Le VIM définit un étalon de façon plus large comme la réalisation pratique d'une

(3) cf. *Le Bup* n° 1017, octobre 2019, p. 1037-1071.

grandeur physique, qu'elle soit associée à la définition d'une unité ou non. De notre côté, nous parlerons toujours d'étalon comme réalisation pratique d'une unité.

Nous avons suivi ci-dessus la définition d'une unité telle que donnée par le VIM. Elle exclut des cas qui sont habituellement nommés unité dans le langage courant :

- ◆ Les mesures utilisant une **échelle de valeurs**, sans comparaison à une grandeur de même nature. L'échelle de valeurs et la procédure de mesure associée sont décrites de façon à être reproductibles, et la valeur numérique correspond à une graduation sur cette échelle.

Exemple : prenons l'échelle de température en degrés Celsius ($^{\circ}\text{C}$). Si l'on considère cette température comme la grandeur physique $\theta_{\text{C}} = aT + b$ avec $a = 1^{\circ}\text{C}/\text{K}$ et $b = -273,15^{\circ}\text{C}$ (échelle Celsius), alors on a une échelle décrite par une procédure : « mesurer la température thermodynamique T , puis effectuer l'opération $aT + b$ pour obtenir la valeur de θ_{C} sur l'échelle Celsius ». Ou alternativement, si on considère cette température comme l'indication d'un thermomètre à dilatation de liquide (échelle dite centigrade), on a également une échelle dont la description est celle du thermomètre utilisé. Ainsi au sens du VIM, $^{\circ}\text{C}$ n'est pas une unité, mais indique la référence à une échelle de valeurs.

Les opérations mathématiques sur les valeurs numériques ainsi obtenues n'ont pas toutes un sens donné par la théorie (l'addition ou la soustraction de températures Celsius a bien un sens, mais pas la multiplication ni la division). Le zéro de l'échelle est également arbitraire.

- ◆ Enfin, une mesure peut également être par référence à une échelle dite **ordinaire**, qui est moins quantitative, comme l'échelle de dureté de Mohs ou l'échelle d'intensité sismique de Mercalli. L'échelle est décrite et mène à des mesures reproductibles. Mais les valeurs numériques associées ne peuvent pas être raffinées à loisir, et des opérations comme l'addition ou la soustraction n'ont pas de sens. Là encore au sens du VIM on ne peut pas parler d'unités.

Une des raisons de ces restrictions du terme « unité » est que la notion de dimension n'a de sens que pour une unité de mesure telle que définie ici, et pas pour une échelle de valeurs ou ordinaire. Nous en dirons plus lors de la discussion sur la dimension d'une grandeur page 39. Enfin, une définition possible de « mesure » est donnée ci-dessous.

- ◆ **Mesure** : procédure d'attribution, à une grandeur physique, d'une valeur numérique et d'une référence. Elle est accompagnée d'une estimation de l'incertitude sur la valeur numérique. La référence est nécessaire, car seul le couple valeur numérique/référence permet de donner une signification absolue à la mesure. La référence peut être de différents types, qui définissent des façons de mesurer qui ne sont pas toutes également « intéressantes ». On peut en distinguer trois :

- (i) Une mesure par comparaison à une unité de mesure (voir la définition de « unité de mesure »). Ce type de mesure possède des propriétés intéressantes : test d'égalité de deux grandeurs, comparaison (plus petit, plus grand), sens donné à l'addition et à la soustraction de deux grandeurs, rapport de deux grandeurs défini et invariant par changement de l'unité (on parle de signification absolue du rapport de deux instances) et donc sens d'une expression comme « deux fois plus », existence automatique d'un zéro fixé par la théorie (cf. sous-paragraphes 3.2.1. et 3.2.2.). Il est également possible de mener des analyses dimensionnelles uniquement si les grandeurs manipulées sont mesurées par référence à une unité.
- (ii) Une mesure par référence à une échelle de valeurs (revoir plus haut) est tout à fait opératoire, car elle permet un test d'égalité et de comparaison (plus grand ou plus petit), et peut être utilisée dans la théorie pour additionner ou soustraire des grandeurs lorsque cela a un sens. Cependant, elle ne possède pas toutes les propriétés précédentes : le rapport de deux instances varie si l'échelle change, « deux fois plus » ne veut rien dire, le zéro n'est pas nécessairement fixé par la théorie, mais peut être choisi arbitrairement. Ce type de référence ne permet pas l'analyse dimensionnelle. Les notions de dimension et d'homogénéité ne sont pas non plus bien définies.
- (iii) Une mesure par référence à une échelle ordinale (revoir ci-dessus).

1.3. Dimension et homogénéité

Nous nous tournons maintenant vers un exemple simple qui permet d'illustrer la construction et l'utilisation d'une théorie physique, le rôle de la mesure et l'apparition des concepts de dimension et d'homogénéité.

Un physicien étudie la chute des corps et, pour cela, mesure le temps de chute t de tous les corps dont il dispose pour diverses hauteurs de chute h . Il obtient ainsi une série de nombres. L'étude de cette série révèle la relation numérique suivante entre les valeurs numériques de h et de t , valable à une certaine incertitude près :

$$h = 4,2 \times t^2. \quad (1)$$

Les hauteurs sont mesurées à l'aide d'un bâton étalon et les temps à l'aide des oscillations d'un pendule particulier⁽⁴⁾. Les nombres h et t ont donc des dimensions (une longueur pour h , une durée pour t) et une unité (appelons-les « le bâton » (bt) et « le battement de pendule » (pend), et par exemple $h = 3$ bt signifie que h est une longueur obtenue en mettant bout à bout trois étalons du bâton.

(4) On peut penser à Galilée, qui n'a pas du tout procédé ainsi pour ses mesures, les pendules n'étant pas assez précis. Cet exemple est fictif.

La relation (1) est une loi de la physique, tout à fait remarquable et utile, même si elle n'est pas écrite sous une forme homogène. L'homogénéité peut être retrouvée formellement si on l'écrit sous la forme $\{h\} = 4,2 \times \{t\}^2$, où $\{x\}$ signifie valeur numérique de x , tout étant alors des valeurs numériques. Mais ceci ne solutionne pas les problèmes qui vont venir. Imaginons en effet un autre physicien souhaitant reproduire ces observations. Il mesure les hauteurs avec son propre bâton, et les temps avec son propre pendule. L'exploitation de sa série de nombres mène à la relation $h = C t^2$ avec une constante C différente de 4,2. Nous nous y attendions, puisque cette constante dépend évidemment du choix des unités de mesure.

Comment alors comparer les mesures ? La solution est simple : il faut expliquer comment doit changer la constante 4,2 si on change les unités utilisées. Ainsi, si on prend un bâton deux fois plus long, alors la valeur numérique de h sera deux fois plus petite, et donc la constante C doit être deux fois plus petite pour que la relation $h = C t^2$ entre valeurs numériques tienne encore. Si on prend un pendule battant deux fois plus lentement, alors la valeur numérique de t sera deux fois plus petite, et la constante C doit être quatre fois plus grande pour que la relation $h = C t^2$ entre valeurs numériques tienne encore.

Nous résumons ces règles en indiquant que la constante C a pour dimension une longueur divisée par une durée au carré. Cela signifie que si l'étalon de longueur est multiplié par n , alors la valeur numérique de C est divisée par n , et que si l'étalon de temps est multiplié par n , alors la valeur numérique de C est multipliée par n^2 . La signification était la même pour les dimensions de h ou de t : par exemple h a pour dimension une longueur, ce qui signifie que si l'étalon de longueur est multiplié par n , la valeur numérique de h est divisée par n . Ceci mène à la définition suivante :

◆ **Dimension** : expression de la façon dont la valeur numérique d'une grandeur physique change lorsque les unités de mesure sont modifiées.

Nous compléterons cette définition dans la partie 2.2.1. page 44 en introduisant les grandeurs de base.

La notion de dimension, et donc par suite d'homogénéité, a un sens uniquement lors de l'utilisation de grandeurs mesurées par référence à une unité. Les cas de mesures par référence à une échelle de valeurs comme °C ou °F, ou à une échelle ordinale, ne rentrent pas dans ce cadre. Et en effet, la loi de passage d'une telle échelle à une autre n'est pas une simple loi de proportionnalité, la simple mention de la dimension ne peut donc pas indiquer comment change la valeur numérique si l'échelle est modifiée : il faut pour cela connaître toute la description de l'échelle. Cette non-proportionnalité, et en fait cette absence de sens donné à un rapport, est la raison pour laquelle ces échelles sont moins pratiques. Elles ne permettent pas l'analyse dimensionnelle (au sens de l'utilisation de lois d'échelles ou du théorème de Vaschy-

Buckingham⁽⁵⁾).

Par ailleurs, ceci permet de comprendre une propriété importante : le rapport de deux instances d'une grandeur mesurée par référence à une unité est indépendant des unités choisies, puisque numérateur et dénominateur de ce rapport ont même dimension et changent donc d'un même facteur.

Retournons à notre exemple. Nous ajoutons que la valeur numérique de C est de 4,2 pour notre choix particulier d'unités, et résumons ceci avec l'écriture formelle $C = 4,2 \text{ bt} \cdot \text{pend}^{-2}$, puis nous décrivons ces unités afin que nos collègues puissent comparer les leurs aux nôtres et, avec les règles ci-dessus de variation de C , puissent déterminer la valeur attendue de leur constante.

En attribuant une dimension à C , la loi $h = C t^2$ devient une équation homogène.

Toute relation qui traduit une égalité numérique entre données issues de mesures fera apparaître des constantes numériques, et une dimension peut être attribuée à ces constantes afin que l'équation finale soit mise sous une forme homogène. L'homogénéité est donc toujours possible.

- ◆ **Homogénéité** : une relation est dite homogène lorsque tous les termes ont la même dimension. L'intérêt de l'homogénéité est multiple :
 - Toutes les valeurs numériques changent de la même façon suite à un changement des unités de mesure, les relations homogènes sont donc utilisables, quelles que soient les unités choisies pour exprimer les valeurs numériques, sans modifier la forme de la relation.
 - Ceci permet de construire des théories (utilisant ces relations homogènes) qui mènent à des prédictions qui ne dépendent pas du choix des unités de mesure.
 - C'est un outil pratique de vérification des calculs : une relation non homogène obtenue en partant de relations homogènes est le signe d'une erreur de calcul.
 - Les relations homogènes permettent l'utilisation de l'analyse dimensionnelle, des lois d'échelles, et par exemple du théorème Π .

Soulignons que si elle est tout à fait utile, l'homogénéité des relations n'est cependant pas nécessaire. Pourquoi alors dit-on aux étudiants qu'une équation non homogène est une équation fautive ? Simplement parce que les équations de base des théories présentées aux étudiants (la mécanique, l'optique, la thermodynamique...) sont des équations écrites sous forme homogène, avec des constantes dimensionnées. Et

(5) Ce théorème, aussi nommé théorème Π , indique que si un problème physique implique une relation entre n grandeurs dont les dimensions s'expriment *via* k dimensions de base, alors il est possible d'écrire une relation équivalente qui met en jeu $n - k$ grandeurs sans dimension construites à partir des n grandeurs initiales. Voir [3-4] pour un énoncé, une démonstration et des exemples.

cette propriété d'homogénéité se conserve à travers les manipulations mathématiques : aboutir à une équation non homogène en partant d'un jeu d'équations homogènes est donc le signe d'une faute de calcul.

2. GRANDEURS DE BASE ET GRANDEURS DÉRIVÉES

Nous disposons maintenant des outils nécessaires pour étudier la structure d'un système d'unités, et en particulier dans cette partie 2 la partition entre grandeurs de base et grandeurs dérivées.

2.1. Exemple introductif

Reprenons un instant l'exemple du physicien étudiant la chute des corps. Imaginons qu'il mette maintenant au point une théorie de la dynamique, en introduisant le concept de force et de masse : la synthèse de ses expériences lui fait poser en loi que le changement de vitesse d'un objet est proportionnel à la force exercée sur lui et inversement proportionnel à la masse de cet objet, soit $\frac{dv}{dt} \propto \frac{F}{m}$. Deux choix s'offrent au physicien pour traiter la force :

- ◆ La mesurer sur une échelle indépendante, par exemple par action de la force à mesurer sur un ressort étalon (principe du dynamomètre). Il est alors possible de prendre une dimension pour la force qui est indépendante de celles de longueur, masse et temps. Ce choix revient à faire de la force une grandeur de base.

La loi de la dynamique s'écrit alors $F = C m dv/dt$ avec C une constante dimensionnée (de dimension celle de la force divisée par $M \cdot L \cdot T^{-2}$), dont la valeur numérique dépend des définitions des unités de masse, de longueur, de temps et de force et qui sera déterminée expérimentalement par mesure de la force à appliquer à un objet de masse donnée pour lui faire subir une accélération donnée.

- ◆ La mesurer par ses effets dynamiques, en posant par définition $F = m \frac{dv}{dt} = m \frac{d^2 x}{dt^2}$ (ou encore $F = C m dv/dt$ avec C constante sans dimension choisie arbitrairement). Il faut donc effectuer des mesures de position, de temps et de masse, puis utiliser cette formule pour en déduire la valeur de la force. La dimension de la force est alors fonction des dimensions masse, longueur et temps : $\dim(F) = M \cdot L \cdot T^{-2}$. L'unité de force est définie par la relation de définition $F = m dv/dt$: une unité de force provoque une accélération de 1 m/s^2 sur une masse de 1 kg. Ce choix revient à faire de la force une grandeur dérivée.

Remarquons enfin qu'une discussion similaire serait à tenir pour la masse nouvellement introduite par notre physicien (et qui est *a priori* de nature différente de celle de la masse grave) : grandeur de base ou dérivée ?

Quoi qu'il en soit, cet exemple introductif permet d'entrevoir la signification de « de base » ou de « dérivée », qui a trait au caractère dimensionnel de la grandeur⁽⁶⁾. Il permet également d'entrevoir qu'une même loi peut être utilisée avec différentes écritures selon le caractère « de base » ou non de la grandeur qui y intervient, avec le rôle clé tenu par la dimension de la constante C .

2.2. Définitions des grandeurs de base et dérivées

Nous nous tournons maintenant vers le SI actuel. Il est bien connu qu'il définit *sept grandeurs de base*, puis pour chacune d'elles une *unité de base* (nous prendrons bien soin de distinguer grandeur et unité dans cet article), telles que résumées dans le tableau 2 (cf. page ci-contre). Toutes les grandeurs qui ne sont pas dans ce tableau sont des *grandeurs dérivées*.

2.2.1. Grandeurs dérivées et unités dérivées

Dans cette partie, nous prenons surtout des exemples utilisant des concepts et relations issus de la théorie de la mécanique classique (cf. figure 2, pages précédentes) munie du SI. Être une **grandeur dérivée** implique trois choses :

- ◆ Il existe une relation donnée par la théorie qui définit la grandeur dérivée en fonction de grandeurs de base. Par exemple, la vitesse est définie par la formule $v = dx/dt$, l'accélération par $a = dv/dt = d^2x/dt^2$, l'énergie cinétique par $E_c = m v^2/2 = m(dx/dt)^2/2$, la force par $F = ma = m d^2x/dt^2 \dots$ Nous constatons sur ces exemples que ces formules peuvent avoir deux statuts différents :
 - soit être de simples définitions qui seront utilisées par la suite dans la théorie en intervenant par exemple dans des théorèmes (ici pour v , a et E_c) ;
 - soit être issues de la synthèse de résultats expérimentaux et/ou d'une série d'arguments théoriques, et être un postulat de la théorie (cas de $F = ma$ ici, des expressions pour F étant connues par ailleurs pour la pesanteur, un ressort idéal...).
- ◆ La formule de définition de la grandeur dérivée permet de connaître la façon dont varie la valeur numérique de la grandeur lors d'un changement des unités de base, c'est-à-dire que ceci donne la dimension de la grandeur dérivée. Ainsi la vitesse a pour dimension $L \cdot T^{-1}$, la force $M \cdot L \cdot T^{-2}$, l'énergie $M \cdot L^2 \cdot T^{-2} \dots$

(6) Nous avons présenté une dichotomie qui porte sur la façon de mesurer la force, mais il n'y a en fait pas de lien systématique entre ceci et son caractère de base ou dérivée. Par exemple, on peut choisir de mesurer la force par ses effets dynamiques en posant $F = C m dv/dt$ avec une valeur numérique de C choisie arbitrairement et, à la différence du second cas, une dimension égale à celle de la force divisée par $M \cdot L \cdot T^{-2}$. Ainsi bien que mesurée par ses effets dynamiques, la force reste une grandeur dimensionnellement indépendante, donc une grandeur de base. La suite précisera ceci.

Grandeur de base	Dimension	Unité de base	Définition de l'unité de base
Durée (ou temps)	T	seconde (s)	$\{\Delta\nu_{Cs}\} = 9\,192\,631\,770$ si exprimée en s^{-1}
Longueur	L	mètre (m)	$\{c\} = 299\,792\,458$ si exprimée en $m \cdot s^{-1}$
Masse	M	kilogramme (kg)	$\{h\} = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ si exprimée en $kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$
Intensité électrique	I	ampère (A)	$\{e\} = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ si exprimée en $A \cdot s$
Température thermodynamique	Θ	kelvin (K)	$\{k_B\} = 1,380\,649 \times 10^{-23}$ si exprimée en $kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
Quantité de matière	N	mole (mol)	$\{N_A\} = 6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ si exprimée en mol^{-1}
Intensité lumineuse	J	candela (cd)	$\{K_{cd}\} = 683$ si exprimée en $cd \cdot sr \cdot kg^{-1} \cdot m^{-2} \cdot s^3$

Tableau 2 - Les sept grandeurs de base du SI, leurs dimensions, leurs unités de base, et les grandeurs physiques dont on fixe la valeur numérique pour les définir (voir article 1). Nous ne parlerons pas de l'intensité lumineuse et de la candela dans cet article.

- ◆ L'unité d'une grandeur dérivée est automatiquement donnée par la formule de définition, car le SI fait le choix d'être un système **cohérent** d'unités. Ceci signifie que l'unité est définie à partir de la formule et des unités de base, sans facteur numérique. Par exemple l'unité de la force définie par $F = ma$, dans le SI, est une force produisant une augmentation de vitesse de 0 à $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, en une seconde, d'une masse de 1 kg. Il s'agit du $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$, aussi appelé newton. Une unité non cohérente de mesure de la force serait par exemple le $\text{g} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$, ou encore le $3 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ où apparaît un facteur numérique 3.

Ceci nous mène à la définition suivante :

- ◆ **Grandeurs dérivées** : grandeurs issues de la théorie autres que les grandeurs de base. Cela signifie que la théorie fournit une relation de définition de chaque grandeur dérivée en fonction de grandeurs de base. La grandeur dérivée est dite du premier type si la relation de définition est une définition simple (qui sera mobilisée par la suite dans d'autres relations de la théorie), et du second type s'il s'agit d'une relation postulée par la théorie (motivée par son pouvoir explicatif et prédictif). Les dimensions des grandeurs dérivées s'expriment en fonction de celles des grandeurs de base. Il faut pour cela que les relations les définissant soient homogènes (par exemple définir $Z = l + m$ est interdit). Dans un système d'unités cohérent, l'unité des grandeurs dérivées est automatiquement connue.

Exemples : on se place dans le cadre du SI et des théories de la mécanique et de la thermodynamique.

- Grandeurs dérivées du premier type : $E_c = m v^2/2$, $H = U + pV$, $\delta W = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l}$, $p = F/S \dots$
- Grandeurs dérivées du second type : $\mathbf{F} = m \mathbf{a}$ définit la force, $Q = \Delta U - W$ définit la chaleur (comme tout transfert d'énergie qui n'est pas un travail mécanique au sens large)...

Enfin, ceci permet de compléter la définition de dimension.

- ◆ **Dimension** (suite) : la dimension d'une grandeur de base est notée par une lettre majuscule. Dans le cas du SI ces lettres sont données dans le tableau 2 (cf. page précédente). Quant à la dimension d'une grandeur dérivée, elle est obtenue à partir de sa formule de définition, et elle traduit la dépendance de cette grandeur en fonction des grandeurs de base du système d'unités choisi. On la note sous la forme d'un produit de puissance des dimensions des grandeurs de base : $L^\alpha T^\beta \dots$ Dans les deux cas, la dimension reste avant tout l'indication de la façon dont la valeur numérique change lors d'un changement des définitions des unités de base. Une grandeur sans dimension est une grandeur dont la valeur numérique ne dépend pas des définitions des unités de base. Sa dimension est notée 1.

En conclusion, soulignons qu'il ne faut pas attribuer de signification physique à la dimension d'une grandeur, car elle peut changer en fonction du système de grandeurs de base choisi. Par exemple, la dimension du courant est l'ampère (ou A) dans le SI, $M^{1/2} \cdot L^{1/2} \cdot T^{-1}$ dans le système CGS électromagnétique, et $M^{1/2} \cdot L^{3/2} \cdot T^{-2}$ dans le système CGS électrostatique, ou encore peut être 1 dans un autre système. Nous avons également vu que deux grandeurs physiques de natures différentes peuvent avoir la même dimension dans un système donné (par exemple l'entropie et la capacité calorifique dans le SI). Tout ceci montre le caractère relatif de la dimension.

De même, l'unité qui accompagne la valeur numérique attribuée à une grandeur permet de donner un sens à cette valeur et n'a, tout comme la dimension, absolument aucune signification physique quant à la nature de la grandeur.

Ce qui prime est bien la nature des grandeurs, qui est indépendante du choix des grandeurs de base ou des unités de base et qui est définie une fois pour toutes par la théorie.

2.2.2. Grandeurs de base et unités de base

- ◆ **Grandeurs de base** : c'est un ensemble de grandeurs, donné de façon à ce qu'aucune grandeur de l'ensemble ne puisse être exprimée (par une relation théorique) en fonction des autres grandeurs de l'ensemble, sauf s'il s'agit d'une relation utilisant une constante dimensionnée en conséquence (comme la constante C dans l'exemple introductif du sous-paragraphe 2.1., voir également les exemples ci-dessous). On attribue une dimension d'ordre 1 à chacune des grandeurs de base, par exemple T, M, L... Les grandeurs de base forment alors un ensemble dimensionnellement indépendant, car aucune relation issue de la ou des théories utilisées ne permet d'exprimer une de ces dimensions en fonction des autres.

Exemples : on se place dans le cadre du SI et de la théorie de la mécanique classique.

- L'énergie cinétique E_c s'exprime en fonction d'une masse, d'une longueur et d'un temps, sans autre constante dimensionnée, et n'est donc pas une grandeur de base.
- Position et durée sont liées par des relations dans des cas particuliers. Par exemple $x = ct$ pour un objet se déplaçant à la vitesse c . Mais la constante c qui apparaît dans la relation a pour dimension $L \cdot T^{-1}$, ce qui fait que longueur et durée ne sont pas liées dimensionnellement par ce type de loi. Elles ne le sont en fait par aucune et sont donc dimensionnellement indépendantes.
- Il existe une relation générale reliant masse, longueur et durée : $ma = Gm \cdot m/d^2$. Mais elle fait intervenir la constante dimensionnée G . Cette relation ne rend donc pas dépendant dimensionnellement masse, longueur et durée.

- La surface ou le volume sont définis par des intégrations spatiales et sont, *via* ces formules, des grandeurs dérivées.

Les constantes dimensionnées comme G ou c sont nommées dans ce cadre des constantes de conversion. Leur présence fait que les relations où elles apparaissent ne rendent pas dépendantes les dimensions qui y interviennent. Nous verrons au sous-paragraphe 2.3. que le jeu des constantes de conversion permet de choisir l'ensemble des grandeurs de base relativement librement.

2.2.3. Bilan et questions

Pour une théorie munie d'un système d'unités, toutes les grandeurs dérivées s'expriment en fonction des grandeurs de base. La mesure d'une grandeur dérivée peut donc toujours être effectuée par la mesure des grandeurs de base puis par l'utilisation d'une formule issue de la théorie (c'est-à-dire la formule de la définition de la grandeur dérivée ou un théorème où elle intervient)⁽⁷⁾.

Ainsi toute mesure, de n'importe quelle grandeur physique (de base ou dérivée), peut se ramener ultimement à un protocole de mesure – dans le cas du SI – d'une durée, d'une longueur, d'une masse, d'un courant électrique, d'une température, d'une quantité de matière ou d'une intensité lumineuse, en accord avec la définition des unités de base associée à chacune. Si le BIPM a la possibilité de coordonner toutes les mesures à travers le globe, c'est précisément pour cette raison.

Comme pour tout système d'unités, le SI est donc d'abord un choix particulier de grandeurs de base dimensionnellement indépendantes (durée, longueur, masse, intensité, température, quantité de matière, intensité lumineuse), puis dans un second temps un choix particulier d'unités de base pour chacune de ces grandeurs de base (seconde, mètre, kilogramme, ampère, kelvin, mole, candela, et les définitions associées). Nous avons discuté de cette seconde étape (le choix des unités) dans le premier article. Nous allons maintenant explorer la première étape : celle du choix des grandeurs de base. Faut-il nécessairement ces sept-là ? Peut-on prendre la force à la place de la masse ? Peut-on en avoir plus de sept ? Moins de sept ? Une seule ? Aucune ?

2.3. Exemples de choix des grandeurs de base

Le choix des grandeurs de base est en partie libre. Nous illustrons ceci dans cette sous-partie en partant du SI, et en échangeant, ajoutant ou supprimant des grandeurs de base. Nous nous restreignons à la théorie de la mécanique classique, pour laquelle

(7) S'il est ainsi toujours possible de se ramener aux grandeurs de base, nous verrons partie 3 que ce n'est pas toujours nécessaire et que certaines grandeurs dérivées peuvent être mesurées directement. C'est le caractère primaire/secondaire qui caractérise la façon de mesurer.

le SI fait le choix de trois grandeurs de base : la durée, la longueur et la masse. Nous oublions donc l'intensité, la température, la quantité de matière ou l'intensité lumineuse dans cette sous-partie.

2.3.1. Changement de grandeurs de base à cardinal constant

Il est facile de voir que les grandeurs de base peuvent être échangées. Par exemple à la place du triplet {masse, longueur, durée}, il est possible de choisir le triplet {force, longueur, durée}. La masse devient alors grandeur dérivée, définie par la relation $F = ma$, sa dimension étant $F \cdot L^{-1} \cdot T^2$ où F est la dimension de la force. Certains anciens systèmes mécaniques fonctionnaient ainsi. De façon similaire on peut choisir le triplet {masse, vitesse, durée}... Ce type de changement n'a rien de compliqué et n'est pas celui qui nous intéresse le plus.

2.3.2. Davantage de grandeurs de base : introduction de constantes de conversion

2.3.2.1. Surface

La surface est obtenue à partir d'une relation de la géométrie plane :

$$\Sigma = \iint dx dy. \quad (2)$$

Via cette relation, la surface est une grandeur dérivée, et sa dimension est une longueur au carré. Son unité (cohérente) est le mètre carré (m^2), et $1 m^2$ correspond à la surface délimitée par un carré de un mètre de côté. Mais il est possible de décréter que la surface est une grandeur de base, dimensionnellement indépendante de la longueur. Notons « Surf » la dimension surface, et σ une unité de surface. Cette unité peut être définie de diverses façons, par exemple en fabriquant un rectangle de référence en platine irridié auquel on attribue la surface 1σ . Bien sûr, la surface du rectangle étalon de platine peut être mesurée en termes de longueurs grâce à la formule intégrale. Supposons par exemple que ce rectangle étalon soit de surface $1 cm^2$. Supposons que nous mesurions une surface Σ et trouvions 3σ . Elle mesure alors aussi $3 cm^2$. Ces considérations basiques montrent que la relation liant surface et longueurs est, dans ce système :

$$\Sigma = C \iint dx dy. \quad (3)$$

avec C une constante de conversion dont la dimension est le Surf $\cdot L^{-2}$ et dont la valeur est $C = 1 \sigma \cdot cm^{-2}$ dans l'exemple choisi. Le fait que C ait cette dimension fait que surface et longueur restent dimensionnellement indépendants.

Nous voyons donc qu'il est possible de faire de la surface une grandeur de base, indépendante dimensionnellement de la grandeur longueur. Il est possible de faire exactement la même chose avec le volume. Notons qu'avant la Révolution, volumes et surfaces étaient bel et bien mesurés sans aucune référence à une longueur. Par exemple, un volume de graines était mesuré par comparaison à un certain baril étalon : volumes et surfaces étaient des grandeurs de base.

2.3.2.2. Vitesse

La vitesse peut subir le même traitement.

1. Lorsqu'elle est grandeur dérivée, la vitesse est définie par la relation $v = dx/dt$, ce qui définit automatiquement sa dimension et son unité.
2. Notons V la dimension de la vitesse et cheval une unité associée (par exemple définie par la vitesse d'un cheval bien particulier lancé au galop, ou par toute autre chose). La vitesse s'exprime alors comme $v = C dx/dt$, avec C une constante de conversion dont la dimension est $V \cdot m^{-1} \cdot s$, une unité le cheval $\cdot s \cdot m^{-1}$, et dont la valeur numérique dans cette unité dépend du cheval étalon choisi. La vitesse est alors une grandeur de base, indépendante dimensionnellement de la longueur et de la durée.

2.3.2.3. Force

1. Lorsqu'elle est grandeur dérivée, la force est définie par la relation $F = m a$, ce qui définit automatiquement sa dimension et son unité.
2. Notons F la dimension de la force et N' une unité associée (définie par exemple comme la force exercée par un allongement donné d'un ressort de référence en platine iridié). La force s'exprime alors comme $F = C m a$, avec C une constante de conversion dont la dimension est $F \cdot M^{-1} \cdot L^{-1} \cdot T^2$ et dont la valeur dépend de la définition de l'unité N' . La force est alors grandeur de base, indépendante dimensionnellement de T , L et M .

Dans ces trois exemples (surface, vitesse puis force), dans les cas où la grandeur est de base, nous avons défini l'unité par un choix d'étalon de référence, si bien que la mesure directe (par comparaison à l'étalon) d'une surface, d'une vitesse ou d'une force est possible. La définition de l'étalon (le choix du rectangle, du cheval, du ressort) détermine alors la valeur de C . Ceci n'est pas nécessaire pour définir une grandeur de base : la valeur numérique de la constante de conversion peut en effet être choisie arbitrairement sans rapport à un étalon. On peut dans l'exemple de la force poser $C = 1 N' \cdot kg^{-1} \cdot m^{-1} \cdot s^2$ (ou toute autre valeur numérique que 1) et définir $F = C m a$. La force est alors grandeur de base, et l'unité de la force correspond à une force produisant une accélération de $1 m/s^2$ d'une masse de 1 kg. Ceci éclaire l'exemple introductif du sous-paragraphe 2.1.

2.3.2.4. Généralisation

Il apparaît à la lumière de ces exemples qu'il est possible de transformer une grandeur dérivée en une grandeur de base (donc indépendante dimensionnellement des autres grandeurs de base) à condition d'introduire dans sa formule de définition une constante de conversion dimensionnée en conséquence. Il est ainsi possible de rendre dimensionnellement indépendants la surface, le volume, la vitesse, la force, l'accéléra-

tion, l'énergie, la masse grave et la masse inertielle... Le nombre de grandeurs de base peut ainsi être très grand.

2.3.3. Moins de grandeurs de base : suppression de constantes de conversion

La démarche qui précède permet de comprendre comment changer une grandeur de base en une grandeur dérivée : il faut faire le chemin inverse. Si l'on repart de l'exemple ci-dessus où la vitesse grandeur de base est définie comme $v = C dx/dt$, alors nous voyons que pour la changer en grandeur dérivée il faut supprimer la constante de conversion C et définir $v = dx/dt$. Ceci donne la démarche générale de suppression des grandeurs de base : il faut supprimer les constantes de conversion, ou plus précisément supprimer leur dimension.

2.3.3.1. La masse comme grandeur dérivée

Repartons donc de la théorie de la mécanique classique munie du SI. Y a-t-il des constantes de conversion que l'on peut supprimer ? Écrivons la loi de Newton pour la force d'attraction entre deux masses m_1 et m_2 :

$$\mathbf{F} = -\frac{Gm_1m_2}{d^2} \mathbf{u}_{1 \rightarrow 2}. \quad (4)$$

La constante G peut être vue comme une constante de conversion, et il est possible de faire de la masse une grandeur dérivée en supprimant la dimension de cette constante. Ceci revient à redéfinir ce qu'est la masse.

Posons ainsi :

$$\mathbf{F} = -\frac{m_1m_2}{d^2} \mathbf{u}_{1 \rightarrow 2}. \quad (5)$$

La loi de Newton appliquée à une masse m_1 , d'accélération \mathbf{a}_{m_1} , qui évolue dans le champ de gravité d'une masse m_2 s'écrit alors :

$$\mathbf{a}_{m_1} = -\frac{m_2}{d^2} \mathbf{u}_{1 \rightarrow 2} \quad (6)$$

ce qui définit la dimension de la masse comme une accélération multipliée par une longueur au carrée, soit donc $L^3 \cdot T^{-2}$. Notons kg' l'unité cohérente associée. Cette unité est définie de la façon suivante : une masse m_2 de $1 kg'$ est telle qu'elle produit par interaction gravitationnelle sur un objet test situé à une distance de $1 m$ de celle-ci une accélération de $1 m/s^2$. Ceci permet de mesurer des masses à partir de mesures de longueurs et de durées seulement. Il reste la seconde loi de Newton, $\mathbf{F} = m \mathbf{a}$, qui sert à définir la force comme grandeur dérivée comme d'habitude, fixe sa dimension et son unité, et en permet des mesures. Ainsi dans ce système atypique, il n'y a que deux grandeurs de base : la longueur et la durée. La masse est une grandeur dérivée. Toute mesure se ramène à une mesure de longueur et de durée. On a $1 kg' = 1 m^3 \cdot s^{-2}$ et on peut vérifier que $1 N' = m^4 \cdot s^{-4}$ (obtenu via $F = m a$), et que $1 J' = m^5 \cdot s^{-4}$ (obtenu via $E_c = mv^2/2$).

Si on considère une autre force, exercée par un ressort par exemple, la loi sera $\mathbf{F} = -k \cdot (l - l_0) \mathbf{u}_{\text{ext}}$ où k devra être exprimé en N'/m . Toute trace de l'ancienne définition de la masse comme grandeur de base a disparu, il n'y en a plus besoin, nous avons là un système de grandeurs tout à fait autonome avec lequel il est possible de faire fonctionner toute théorie de la mécanique classique.

Remarques

Notons bien que $1 \text{ kg}'$ ne correspond pas à 1 kg , puisque l'unité de masse kg' a une définition différente de celle du SI. Il s'en suit qu'une force de $1 \text{ N}'$ correspond à une force différente de 1 N , car l'unité N' dépend de par sa définition $F = m a$ de l'unité de masse kg' , qui est différente du kg . Il est toutefois possible d'écrire l'équation (5) plutôt sous la forme $\mathbf{F} = -\tilde{G} \frac{m_1 m_2}{d^2} \mathbf{u}_{1-2}$ avec $\tilde{G} = 6,67408 \times 10^{-11}$ sans dimension. La masse reste alors une grandeur dérivée comme dans le cas où $\tilde{G} = 1$, mais cette fois $1 \text{ kg}'$ et 1 kg du SI représentent la même masse, et par suite une force de $1 \text{ N}'$ et de 1 N sont également identiques.

Notons pour finir que cet exemple n'a rien de fantaisiste. Les systèmes d'unités électrostatiques du type CGS écrivent précisément la loi de Coulomb sans constante ϵ_0 dimensionnée pour définir la charge électrique comme unité dérivée. Nous en reparlerons dans la définition de « constante de conversion » ci-dessous.

2.4. Bilan

Les manipulations effectuées pour changer le type d'une grandeur sont bien différentes de simples changements d'unités. En particulier, une création ou une suppression de grandeur de base entraîne un changement dans l'écriture des équations de la théorie *via* la disparition ou l'apparition d'une constante de conversion. Le nombre de grandeurs de base peut ainsi être choisi arbitrairement, et il est en fait possible de ne garder qu'une seule grandeur de base (par exemple la durée, toutes les grandeurs ont alors pour dimension une puissance d'un temps), voire même aucune (toutes les grandeurs sont alors sans dimension, mais il faut prendre garde à ce que les mesures restent possibles, voir sous-paragraphe 3.5.). Ces exemples sont détaillés dans une annexe sur le site Internet de l'auteur.

Les grandeurs de base sont les grandeurs pertinentes pour tout ce qui concerne la dimension des grandeurs considérées, et jouer sur le nombre de grandeurs de base peut être utile pour simplifier l'analyse dimensionnelle d'un problème, typiquement lors de l'utilisation du théorème Π de Vaschy-Buckingham [3-4]. Nous concluons ici par des définitions.

◆ **Constante de conversion** : constante dimensionnée qui apparaît ou non dans les relations d'une théorie en fonction du choix de la répartition entre grandeurs de base

et grandeurs dérivées. Il s'agit d'une grandeur physique, car elle est attribuée au phénomène décrit par la relation et peut être mesurée. Les équations d'une même théorie ont donc des écritures différentes en fonction du choix des grandeurs de base.

Exemples

- La loi de Coulomb s'écrit de diverses manières en fonction du choix des grandeurs de base, en faisant intervenir différentes constantes de conversion :

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 d^2} \quad \text{ou} \quad F = \frac{q_1 q_2}{d^2} \quad \text{ou} \quad F = \frac{q_1 q_2}{4\pi d^2} \quad \text{ou} \quad F = c^2 \frac{q_1 q_2}{d^2} \quad (7)$$

Le premier cas est celui du SI, où le courant électrique est grandeur de base, car ϵ_0 est dimensionnée en conséquence. Les trois cas suivants sont ceux de différents systèmes CGS, où le courant électrique et la charge sont grandeurs dérivées. La charge est alors définie *via* la loi de Coulomb, et a pour dimension $M^{1/2} \cdot L^{3/2} \cdot T^{-3}$ dans les deux premiers cas et $M^{1/2} \cdot L^{1/2} \cdot T^{-1}$ dans le dernier (voir article 1.2., et annexe sur le site Internet de l'auteur).

- L'énergie mécanique et le transfert thermique sont longtemps restés mesurés dans des unités différentes : en joule pour le premier et en calorie pour le second. Le premier principe s'écrivait alors $\Delta U = W + Q/J$, avec $J = 4,1868 \text{ cal/J}$ une constante de conversion. Le transfert thermique était alors une grandeur de base indépendante des autres (et d'ailleurs mesurée indépendamment, par calorimétrie). La suppression de la constante J en a fait une grandeur dérivée de même dimension et unité que l'énergie ou le travail, définie par la relation $Q = \Delta U - W$ et donc mesurée ainsi.

- ◆ **Système de grandeurs** : c'est une « théorie » (au sens défini partie 1.1., ou un ensemble de théories pouvant fonctionner conjointement) pour laquelle le choix des grandeurs de base a été effectué. Ce choix des grandeurs de base fixe l'utilisation des constantes de conversion dans les équations et leurs valeurs, et ce n'est donc qu'une fois ce choix effectué que les équations de la théorie prennent leurs expressions mathématiques définitives et deviennent opérationnelles.

Exemple : le Système international de grandeurs est défini par le BIPM et consiste en l'utilisation des théories usuelles (mécanique classique, quantique, thermodynamique, électromagnétisme...), avec le choix des sept grandeurs de base du tableau 2.

Le choix des unités vient dans un second temps, et ne change pas la forme des équations (pourvue que celles-ci soient homogènes). Une théorie dans un système de grandeurs donné peut donc être utilisée avec différents systèmes d'unités.

- ◆ **Système d'unités** : pour un système de grandeurs donné, il s'agit du choix des définitions des unités associées aux grandeurs de base, et du choix des unités des grandeurs dérivées. Ces dernières sont souvent choisies de façon cohérente, c'est-à-

dire automatiquement en fonction de la relation de définition de la grandeur dérivée (revoir page 44). Sont également précisés les noms et définitions des multiples et sous-multiples des unités.

Exemple : le Système international d'unités (SI) est fondé sur le Système international de grandeurs, et il définit les unités de base des grandeurs de base comme dans le tableau 2. C'est un système d'unités cohérent, car toutes les unités dérivées sont cohérentes.

3. GRANDEURS PRIMAIRES ET GRANDEURS SECONDAIRES

La partition entre grandeurs de base et grandeurs dérivées présentée dans la partie précédente est un trait important des systèmes de grandeurs et caractérise le formalisme dimensionnel du système. Nous constatons toutefois que toutes les grandeurs de base n'ont pas le même statut vis-à-vis de la mesure : ainsi dans le SI, la durée est associée à une unité qui implique qu'une mesure de temps se fait directement par comparaison avec un nombre d'oscillations produit par un phénomène naturel (un atome de césium), alors que la longueur est associée à une unité qui ramène toujours une mesure de longueur à une mesure de durée (par exemple durée du temps de vol de la lumière). Ainsi certaines grandeurs sont mesurées directement (par comparaison directe à une autre grandeur de même nature), alors que d'autres le sont par l'intermédiaire de la mesure d'une grandeur d'une autre nature et l'utilisation d'une formule. Ce rapport à la mesure n'est pas lié au type de base ou dérivée, et c'est ceci que nous explorons dans cette partie.

3.1. Comment sont définies les grandeurs d'une théorie ?

Les grandeurs physiques intervenant dans un cadre théorique doivent évidemment être bien définies. Comment ? Nous avons déjà évoqué la question page 32 :

- ◆ La première possibilité est de les définir par une formule, c'est le cas des grandeurs dérivées comme $E_c = mv^2/2$ ou $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$, ou de certaines grandeurs de base comme par exemple $F = Cma$ ou $\Sigma = C \iint dx dy$ (ce sont des exemples du sous-paragraphe 2.3.2.) avec C constante de conversion choisie conventionnellement (nous avons respectivement $C = 1 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^2$ et $C = 1 \text{ } \sigma \cdot \text{cm}^{-2}$). De telles grandeurs, mesurées indirectement par l'utilisation d'une formule et la mesure d'autres grandeurs, sont dites *secondaires*. Par exemple pour mesurer une force il faut mesurer $m\mathbf{a}$, puis utiliser la relation $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$.
- ◆ Toutes les grandeurs ne peuvent pas être définies par une formule en fonction d'autres grandeurs, car nous tournerions en rond... Il faut garder à l'esprit que ce qui importe est la possibilité de mesurer toutes les grandeurs. Il faut donc que certaines grandeurs

présentes dans une théorie ne soient pas définies par une formule, mais par la manière de les mesurer. Il s'agit alors de définir leur unité de façon opératoire. Tourignons-nous d'abord vers les **grandeurs de base**, pour lesquelles apparaissent deux possibilités :

- L'unité de mesure implique la mesure de grandeurs d'une autre nature et l'utilisation d'une formule. C'est le cas par exemple du mètre dans le SI actuel : pour mesurer une longueur en mètres il faut mesurer un temps et appliquer une formule qui fait intervenir la vitesse de la lumière c ; de telles grandeurs sont dans les faits encore définies par une formule en fonction d'autres grandeurs : elles sont dites *secondaires* ;
- L'unité de mesure est définie par référence à un étalon de même nature et consiste en une comparaison directe à cet étalon. La mesure ne fait ainsi intervenir aucune grandeur de nature différente. C'est le cas par exemple de la définition du mètre de 1889 qui consiste en une comparaison à la longueur d'un étalon en platine iridié, ou de celle de 1960 qui consiste à comparer la longueur à mesurer à la longueur d'onde d'une radiation du krypton. C'est le cas également de la seconde telle que définie actuellement, puisqu'il s'agit d'une comparaison à la période d'un phénomène naturel. De telles grandeurs sont dites *primaires*.

Revenons enfin vers les **grandeurs dérivées**. Elles peuvent toujours être mesurées de façon secondaire, mais certaines peuvent l'être aussi de façon primaire. C'est le cas par exemple de la charge électrique dans le SI d'après 2019 qui peut être mesurée directement par comparaison à la charge de l'électron e , ou encore de la vitesse (comparaison à c) et de la résistance électrique. Nous y reviendrons au sous-paragraphe 3.3.

Il apparaît donc deux catégories de grandeurs : celles qui peuvent être mesurées directement par comparaison avec une grandeur de référence de même nature, et celles qui sont mesurées indirectement. La partition de base/dérivée ne rend pas compte de ceci, puisqu'une grandeur de base peut être primaire ou secondaire, et de même pour une grandeur dérivée. Nous pouvons donner les définitions suivantes :

- ◆ **Grandeur primaire** : c'est une grandeur pour laquelle il existe un protocole opératoire concret de mesure par comparaison directe à un étalon de même nature. Il s'agit donc d'une mesure par référence à une unité de mesure. L'unité est définie sans référence à des *mesures* de grandeurs d'autres natures. Le caractère primaire d'une grandeur vaut dans un système de grandeurs et d'unités donné. Pour que cette mesure directe par comparaison soit possible, il faut qu'il existe des procédures expérimentales de comparaison et d'addition de deux grandeurs. Par suite, on peut alors définir la soustraction de deux grandeurs, la multiplication ou division par un nombre pur rationnel puis réel, le rapport de deux grandeurs, et l'existence univoque d'un zéro. On peut alternativement partir d'une procédure opératoire d'estimation du rapport. Tout ceci est détaillé au sous-paragraphe 3.2.1.

- ◆ **Grandeurs secondaires** : toute grandeur qui, pour être mesurée, nécessite la mesure d'une grandeur d'une autre nature et l'utilisation d'une formule théorique. Ainsi si la durée est une grandeur primaire, t^2 est une grandeur secondaire. D'autres exemples sont donnés au sous-paragraphe 3.3.

Ce sont donc les grandeurs primaires qui assurent seules la connexion avec le réel : toute attribution d'une valeur numérique à une grandeur secondaire se ramène à une mesure de grandeurs primaires.

La figure 3 résume la situation.

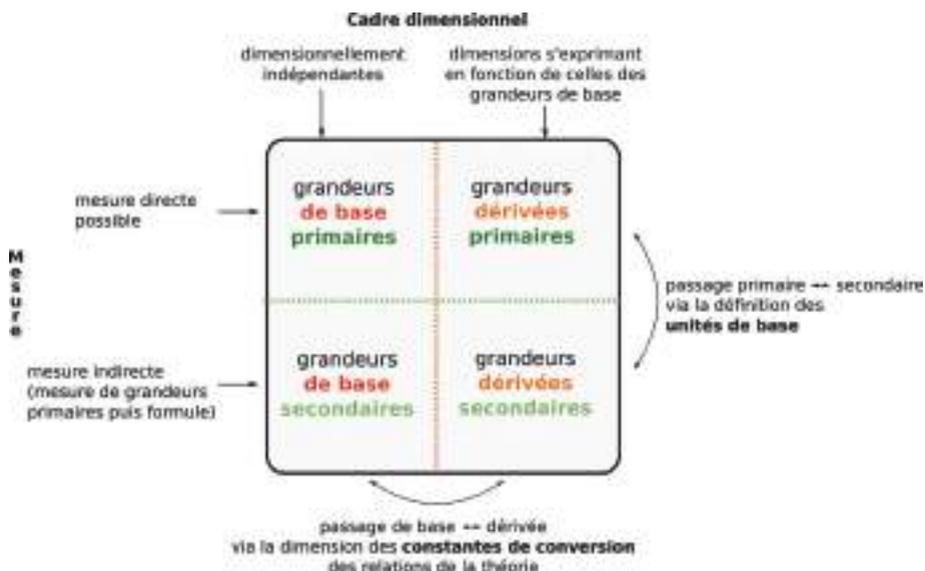


Figure 3 - Résumé des différentes catégories de grandeurs rencontrées dans un système de grandeurs : grandeurs de base/grandeurs dérivées, et grandeurs primaires/grandeurs secondaires.

3.2. Opérations de mesure des grandeurs primaires, propriétés en découlant

Nous détaillons ici les opérations qui doivent exister pour mesurer une grandeur primaire et les propriétés qui en découlent, propriétés qui sont ensuite héritées par les grandeurs secondaires.

3.2.1. Les procédures expérimentales de mesure directe des grandeurs primaires

Reprenons notre exemple du sous-paragraphe 1.3., où un physicien établit expérimentalement la loi de la chute des corps. Nous voyons qu'il interagit avec le réel *via* deux grandeurs : la durée et la longueur, qui sont mesurées par comparaison directe à

des étalons. Il s'agit donc dans ce système de grandeurs primaires. Comment exactement la mesure est-elle permise ? Quelles sont les opérations qui doivent être concrètement définies ? Prenons l'exemple de la longueur.

- ◆ La comparaison (plus grand, plus petit) de deux longueurs l_1 et l_2 est directement possible : il suffit de placer les deux objets dont la longueur est à comparer côte à côte. Ceci permet également un test d'égalité : on aura $l_1 = l_2$ si on a à la fois $l_1 > l_2$ et $l_1 < l_2$, cette double inégalité étant rendue possible par les incertitudes de mesure. Ceci permet de dupliquer une longueur, c'est-à-dire par comparaison de produire un objet de même longueur qu'un autre.
- ◆ L'addition de deux longueurs l_1 et l_2 est obtenue en plaçant bout à bout les objets pour lesquels les longueurs sont à additionner. L'objet composé de la réunion des deux précédents possède alors une longueur $l_3 = l_1 + l_2$.

Ces deux opérations suffisent pour en définir beaucoup d'autres (cf. aussi figure 4, page ci-après) :

- ◆ La soustraction de deux longueurs $l_1 - l_2$ est définie comme la longueur l_3 telle que l'addition $l_2 + l_3$ donne l_1 .
- ◆ La multiplication d'un objet de longueur l par un entier n est réalisée expérimentalement en dupliquant $n - 1$ fois l'objet initial et en additionnant les n objets.
- ◆ La division d'un objet de longueur l par un entier n est obtenue lorsqu'un objet de longueur l' a été fabriqué, vérifiant la propriété $n \times l' = l$.
- ◆ La multiplication par un rationnel p/q est obtenue en multipliant par p puis en divisant par q . Par suite, les rationnels étant denses dans \mathbb{R} , ceci permet de définir la multiplication par un scalaire λ quelconque.
- ◆ La longueur nulle est automatiquement définie comme un objet obtenu après une division par n d'un objet initial quelconque, n tendant vers l'infini.
- ◆ Le rapport de deux longueurs l_1 et l_2 est défini comme le scalaire λ tel que $\lambda l_2 = l_1$.

L'existence automatique et unique du zéro est remarquable. Le zéro d'une grandeur primaire est automatiquement défini et possède un sens physique univoque. C'est pour cela qu'il n'y a pas à préciser l'unité lorsque l'on écrit $l = 0$ ou de manière générale $X = 0$ avec X grandeur mesurée par comparaison à une grandeur de référence (donc *via* une unité de mesure) de même nature.

Comme illustré figure 4 (cf. page ci-après), tout ceci permet la mesure directe de longueurs, et donc de donner un sens concret à une écriture telle que $h = 2,2 \text{ bt}$: il faut prendre trois copies de bâtons (la copie est possible, car comparer deux longueurs est une procédure définie expérimentalement ci-dessus), en diviser une en cinq parties égales (la division est également décrite ci-dessus), puis ajouter deux bâtons et $1/5$ du troisième (l'addition est aussi définie ci-dessus) afin de concrétiser la hauteur h . Les

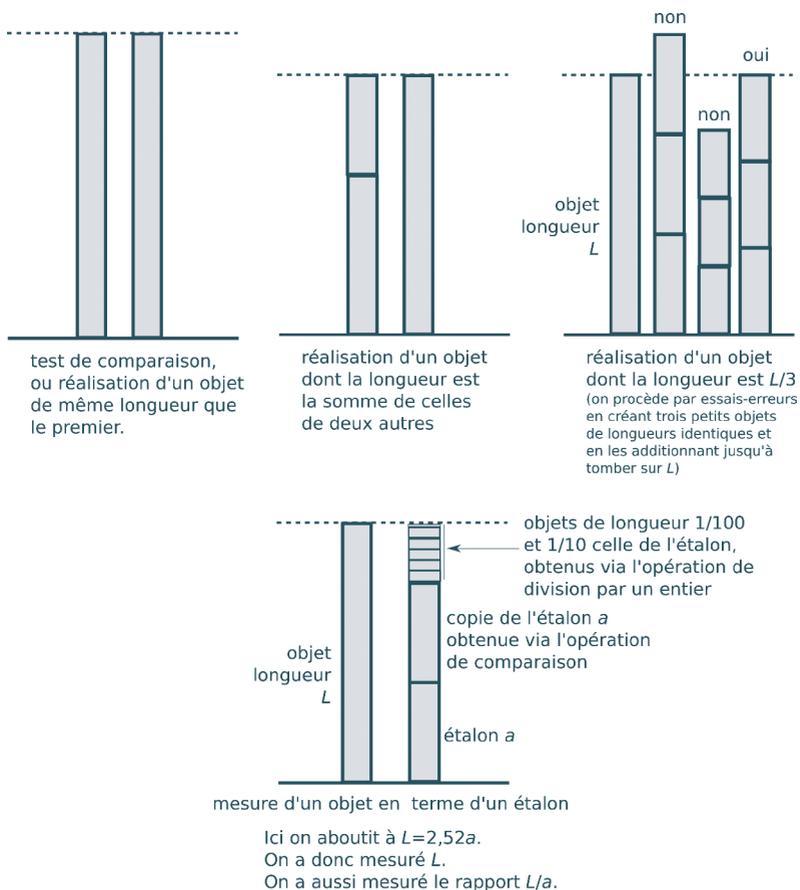


Figure 4 - Opérations de comparaison, d'addition, de division et de mesure de longueurs.

mesures de temps sont effectuées à l'aide du même type d'opérations sur les durées⁽⁸⁾. L'illustration de cette discussion avec des bâtons et des pendules peut la faire paraître désuète, mais il ne faut pas se tromper : ce sont les mêmes types d'opérations de base

(8) Nous sommes partis de l'existence des opérations de comparaison et d'addition pour construire les autres. Alternativement, il est possible de partir de l'existence d'une procédure de mesure du rapport pour construire les autres opérations, ce qui est plus naturel par exemple dans le cas de la température thermodynamique (ou d'autres grandeurs intensives). Ainsi si on peut attribuer *expérimentalement* une valeur numérique a au rapport T_1/T_2 , alors la comparaison de a à 1 permet l'opération de comparaison, et la grandeur T_3 associée à la somme $T_1 + T_2$ est telle que le rapport T_3/T_1 donne $a + 1$. Le reste se construit à l'identique.

qui permettent aujourd'hui encore, et qui permettront toujours, de réaliser les mesures des grandeurs primaires – et par suite de réaliser n'importe quelle mesure de grandeur secondaire.

De plus, les opérations expérimentales doivent posséder les mêmes propriétés que les opérations sur les nombres : par exemple la procédure d'égalité doit être symétrique (si $A = B$ alors on doit aussi avoir $B = A$) et transitive, et celle d'addition doit être commutative et associative. Finalement, cette suite d'opérations définies expérimentalement permet l'utilisation d'opérations mathématiques sur les grandeurs physiques primaires, et par suite *via* l'utilisation de la théorie sur toutes les grandeurs secondaires. Notre description de la nature est donc, par construction de ses fondements, une description en langage mathématique – avec l'efficacité que l'on sait.

3.2.2. Les grandeurs secondaires héritent des grandeurs primaires

Nous venons de voir que les grandeurs primaires possèdent certaines propriétés : opérations expérimentales de réalisation des opérations mathématiques, existence univoque d'un zéro ; leur mesure est du type mesure par référence à une unité. Concernant les grandeurs secondaires, nous nous intéressons uniquement à celles mesurées par référence à une unité⁽⁹⁾. L'unité en question se ramène à celle des unités de base, puis donc à celles de grandeurs primaires. Les opérations mathématiques d'addition, de soustraction, de multiplication, de rapport, de multiplication par un scalaire, sont définies non pas directement expérimentalement, mais à travers les relations et manipulations de la théorie utilisée. Ajouter deux énergies cinétiques ou deux viscosités est réalisé en utilisant des lois de la théorie utilisée, et non pas directement expérimentalement. La propriété d'unicité du zéro se retrouve également pour ces grandeurs secondaires.

3.3. Comment savoir si une grandeur est primaire ou secondaire ?

Pour qu'une grandeur puisse être une grandeur primaire, il faut qu'il existe une procédure concrète de mesure par comparaison à un étalon de même nature. Nous avons vu qu'il faut pour cela partir de l'existence de procédures expérimentales de comparaison et d'addition (ou alternativement d'une procédure d'évaluation du rapport). Listons quelques exemples de grandeurs pour lesquelles il existe de telles procédures.

◆ **Longueur** : on compare en plaçant les objets côte à côte, on additionne en plaçant bout à bout les objets (revoir figure 4, page ci-contre).

(9) Les grandeurs mesurées par référence à une échelle ordinale sont déconnectées de la théorie car n'entrent dans aucune relation. Pour celles mesurées par référence à une échelle de valeurs cela dépend, revoir la définition sous-paragraphe 1.2. De manière générale elles ne sont pas adaptées aux concepts de dimension, d'homogénéité..., et leur utilisation reste marginale.

- ◆ Masse gravitationnelle : on compare à l'aide de la hauteur des plateaux d'une balance ; on obtient un objet de masse m_3 somme des masses de deux objets m_1 et m_2 en plaçant m_1 et m_2 sur le même plateau de la balance, et en ajustant la masse m_3 sur l'autre plateau jusqu'à atteindre l'équilibre (cf. figure 5).
- ◆ Vitesse : on compare la norme des vitesses de deux objets en les faisant partir dans la même direction d'un même point puis en constatant lequel prend de l'avance ; étant donné deux objets de vitesses v_1 et v_2 par rapport à un référentiel R_0 , on fabrique un support allant à la vitesse v_1 dans R_0 (par comparaison des vitesses), puis on place le second objet (ou le dispositif produisant le second objet) sur ce support, ce qui produit donc un objet de vitesse $v_1 + v_2$ par rapport à R_0 (notons que ceci produit la somme dans la limite non relativiste seulement, dans le cadre de la relativité restreinte ce sont les rapidités qui s'ajoutent).
- ◆ Force : on compare deux forces en les faisant agir sur un objet pouvant glisser librement, elles sont opposées (et donc égales en norme) si l'objet reste immobile ; on obtient une force F_3 somme de deux autres forces F_1 et F_2 d'abord en obtenant des forces opposées $-F_1$ et $-F_2$ avec la méthode précédente, puis en faisant agir $-F_1$ et $-F_2$ sur un objet pouvant glisser librement et en ajustant F_3 pour que l'objet reste immobile : on a alors $F_3 = F_1 + F_2$.
- ◆ Charge électrique : on peut comparer deux charges en comparant leur pouvoir d'attraction ou de répulsion sur une troisième charge identique (par exemple *via* un dispositif de type balance de torsion) ; on réalise l'addition de deux charges en les considérant ensembles.
- ◆ Résistance électrique : on peut comparer deux résistances en les soumettant à une même différence de potentiel et en comparant les courants électriques parcourant chacune (ce qui peut se faire par une comparaison des actions mécaniques de ces courants sur deux aimants identiques, les mesures individuelles des courants étant inutiles) ; on réalise la somme de deux résistances en les plaçant en série.
- ◆ Les grandeurs couple, vitesse angulaire, surface ou encore durée peuvent également être munies de telles opérations concrètes de comparaison et d'addition.

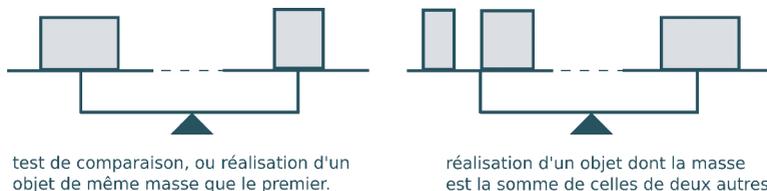


Figure 5 - Opérations de comparaison et d'addition de deux masses graves.

Il est intéressant de se demander avec P. W. Bridgman [3] si toutes les grandeurs peuvent être considérées comme grandeurs primaires, c'est-à-dire s'il est toujours

possible d'exhiber des opérations de comparaison et d'addition directes, sans mesures de grandeurs d'autre nature. Cela semble impossible pour des grandeurs comme la masse au carré. On peut dire qu'une telle grandeur ne correspond pas à quelque chose de tangible, dans le sens où il n'existe pas de procédure concrète de comparaison et d'addition, et donc pas de procédure de mesure directe par comparaison à une grandeur de même nature. Qu'en est-il par exemple de la viscosité, peut-elle être mesurée directement en termes d'une autre viscosité, sans mesure de grandeurs intermédiaires d'un autre type ? Et de l'énergie ? Nous laissons toutefois ces interrogations de côté, car elles ne sont pas déterminantes pour la suite.

Un point important est en revanche le suivant : l'existence des procédures d'addition et de comparaison ne suffit pas pour qu'une grandeur soit grandeur primaire au sein d'un système de grandeurs et d'unités donné. En effet, le caractère primaire ou secondaire dépend de la définition de l'unité de la grandeur, qui fixe la manière de la mesurer dans le système en question. Par exemple, la longueur peut être grandeur primaire de par l'existence des procédures décrites ci-dessus, et l'était effectivement dans le SI d'avant 1983, mais elle ne l'est plus depuis 1983, car sa nouvelle unité implique qu'une mesure de longueur se fait toujours indirectement (quel que soit le protocole envisagé), *via* une mesure de temps et l'utilisation d'une formule impliquant c . Le caractère primaire/secondaire dépend donc du système de grandeurs et d'unités choisi. Pour qu'une grandeur soit primaire, il faut :

- (i) qu'il y ait une grandeur u de même nature dont la valeur numérique est fixée dans la définition des unités de base (une combinaison de ces grandeurs fixées convient également) ;
- (ii) que cette grandeur u soit mobilisable concrètement dans une expérience ;
- (iii) que les opérations expérimentales de comparaison/addition ou de rapport soient réalisables pour ce type de grandeurs.

Détaillons de façon systématique :

- ◆ Pour une grandeur de base, ceci dépend de la définition de son unité. Nous avons donné l'exemple de la longueur ci-dessus, qui est grandeur de base, primaire ou secondaire selon la définition de son unité. De manière générale, il est possible de savoir si une grandeur de base x est primaire ou secondaire dans un système d'unités donné en étudiant la dimension de la grandeur physique u qui sert à définir son unité. Nous avons en effet expliqué dans le premier article qu'une unité est définie en fixant la valeur numérique d'une grandeur physique u .

Si la dimension de cette grandeur u est la même que celle de la grandeur de base x , alors la mesure peut s'effectuer par comparaison directe de x à u , sans faire intervenir de mesures de grandeurs d'autre nature. En revanche, si la dimension de u n'est pas la même que celle de x , alors la procédure de mesure de x fera nécessairement appel

à des mesures de grandeurs d'autre nature que $x^{(10)}$, et la grandeur est secondaire. Les grandeurs qui sont à la fois de base et primaires sont très importantes, car, comme nous le verrons au sous-paragraphe 3.5., elles permettent les mesures de façon systématique.

Exemples

- le mètre défini en fixant la valeur numérique de la longueur de l'étalon de platine du BIPM, ou la valeur numérique de la longueur d'onde d'une radiation, fait de la longueur une grandeur primaire. Si c'est la valeur numérique de c qui est fixée, elle est grandeur secondaire (l'unité de c fait intervenir la seconde) ;
- le kilogramme défini en fixant la valeur numérique de la masse du PIK fait de la masse une grandeur primaire. Mais la masse est grandeur secondaire lorsque le kilogramme est défini en fixant la valeur numérique de h (dont l'unité SI fait intervenir le mètre et la seconde) ;
- d'autres exemples sont donnés dans le sous-paragraphe 3.4., notamment en se basant sur la lecture de la figure 6 (cf. page ci-contre).

- ◆ Pour une grandeur dérivée, son unité est l'unité cohérente basée sur la formule de définition de la grandeur. Des mesures passant par cette formule et par les mesures des grandeurs de base y intervenant sont toujours possibles. Les grandeurs dérivées semblent donc être secondaires par défaut. Cependant, les unités des grandeurs de base sont définies en fixant la valeur numérique de grandeurs physiques u_i . Si l'un des u_i ou une combinaison des u_i correspond à une grandeur physique (notons la u) mobilisable dans un phénomène concret, si u et la grandeur dérivée x sont de même nature, et s'il existe des opérations de comparaison/addition ou de rapport pour ces grandeurs, alors la mesure directe de x par comparaison à u est possible. La grandeur x est alors primaire. On parlera de grandeur dérivée primaire. Nous verrons au sous-paragraphe 3.5. que ces grandeurs ne permettent pas forcément toutes les mesures.

Exemples de grandeurs dérivées primaires

Nous prenons le cadre du SI d'après 2019, où les constantes dont les valeurs numériques sont fixées sont entre autres c , h et e .

- La charge électrique est mesurable directement par comparaison à la charge de l'électron, dont la valeur numérique dans le SI est fixée. Ceci fait de la charge une grandeur primaire.

(10) Ceci peut se voir avec le formalisme de l'article précédent : la mesure fait appel à une expérience dont la modélisation aboutit à une relation $f_{pi}(x, u) = 1$, et on voit par analyse dimensionnelle que si x et u n'ont pas la même dimension, alors nécessairement des grandeurs d'autre dimension apparaissent dans la formule et devront être mesurées.

- La vitesse est mesurable directement par comparaison à la vitesse de la lumière dans le vide, dont la valeur numérique dans le SI est fixée. Ceci fait de la vitesse une grandeur primaire.
- La résistance électrique est mesurable directement par comparaison à la résistance de Hall $R_K = h/e^2$ mobilisable dans une expérience à effet Hall quantique (voir article précédent), la valeur numérique de R_K étant fixée dans le SI. Ceci fait de la résistance une grandeur primaire.
- Le moment cinétique par rapport à un axe d'une particule quantique est multiple entier ou demi-entier de \hbar . La valeur numérique de ce dernier étant fixée dans le SI, il serait donc possible de mesurer directement un moment cinétique par comparaison. Encore faut-il trouver une procédure expérimentale directe de comparaison de moments cinétiques, qui n'utilise pas de mesure de grandeurs d'autre nature.

3.4. Exemples dans le cadre des différents SI

L'ensemble des grandeurs de base du SI comprend depuis sa création la durée, la longueur et la masse. De nouvelles grandeurs de base se sont ajoutées au fur et à mesure de son extension à des théories plus larges : intensité électrique et température thermodynamique en 1954, puis quantité de matière en 1971. La nature primaire ou secondaire des grandeurs de base a régulièrement changé en fonction des définitions successives des unités de base. Nous avons ainsi déjà souligné l'exemple de la longueur.

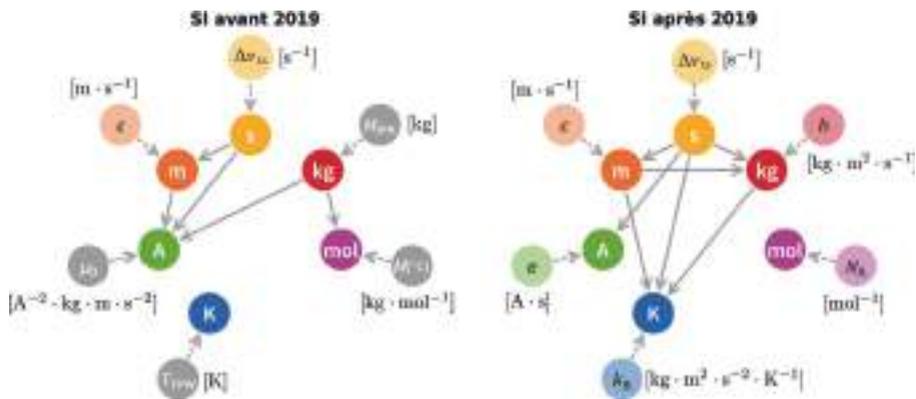


Figure 6 - Les grandeurs de base des SI d'avant et après 2019 sont ici représentées par leurs unités de base (s, m, A, K, mol, kg). Sont également représentées les grandeurs physiques u dont la valeur numérique est fixée pour définir ces unités (par exemple après 2019 : $\Delta\nu_{cs}$, c , e , k_B , N_A , h), et entre crochets les unités de ces grandeurs. Les flèches indiquent les dépendances impliquées par la dimension de la grandeur u servant à définir l'unité et montrent la répartition entre grandeurs primaires et secondaires : une grandeur primaire n'a aucune flèche provenant d'une autre unité arrivant vers elle. Nous n'avons pas représenté l'intensité lumineuse.

La figure 6 (cf. page précédente) présente les grandeurs de base des SI d'avant et d'après la réforme de 2019, et permet à travers les critères de la sous-partie 3.3. précédente de voir lesquelles sont grandeurs primaires. Nous y voyons qu'avant la réforme, les grandeurs primaires sont la durée (comparaison à la période des oscillations du césium), la masse (comparaison directe à la masse du PIK) et la température (comparaison à la température de la référence du point triple), alors qu'après la réforme il s'agit de la durée (même définition) et de la quantité de matière (comparaison à un nombre d'entités fixé). Quelques grandeurs appellent à des commentaires :

- ◆ Nous avons vu dans l'article 1.1. qu'une mesure de masse avec une balance de Kibble implique des mesures de temps uniquement. L'analyse présentée ici montre que c'est en fait le cas de toute mesure de masse dans le nouveau SI (et ce quel que soit le protocole envisagé).
- ◆ Une mesure d'intensité électrique peut se ramener à des mesures de temps uniquement, ce qui peut se voir sur l'exemple de l'exploitation des effets Hall quantique et Josephson (revoir les formules dans l'article 1.1.).
Remarquons que la charge peut être mesurée par comptage de e de façon primaire, mais que l'intensité s'en déduit par une mesure supplémentaire du temps considéré, donc de façon secondaire.
- ◆ La température définie par la théorie de la thermodynamique est mesurée par l'intermédiaire des formules de la théorie (que cela soit sa définition ou des conséquences). Avant 2019, on peut par exemple utiliser $T = T_{\text{réf}} \cdot (1 - \eta_{\text{rév}})$, où $\eta_{\text{rév}}$ est le rendement d'une machine thermique réversible fonctionnant entre une source à T et une à $T_{\text{réf}} = T_{\text{pt triple eau}}$. Ceci peut se faire en mesurant le rapport des quantités de chaleur échangées entre les sources et la machine, et donc par exemple en mesurant les rapports des masses de glace fondue dans un calorimètre à glace. La mesure de ce rapport peut se faire de façon expérimentale sans faire appel à l'unité de masse, mais avec des opérations du type de celle du sous-paragraphe 3.2. La température est donc une grandeur primaire. Après 2019, la mesure se fait *via* une expérience dont la modélisation aboutit à une relation où intervient T et la constante de Boltzmann. Elle implique ultimement des mesures de temps uniquement (cf. article 1.2.).

On pouvait déjà remarquer dans le tableau 2, qui présente le SI d'après 2019, que l'unité « seconde » reste la seule qui fait référence à des conditions expérimentales : ceci n'est pas un hasard, mais est directement lié au fait qu'elle devient la seule grandeur primaire (mis à part la quantité de matière) parmi les grandeurs de base.

Enfin, il faut étudier l'existence de grandeurs dérivées primaires. Dans le SI d'avant 2019 on trouve la vitesse, et dans celui d'après 2019 nous avons déjà expliqué que la vitesse, la charge électrique et la résistance électrique sont grandeurs dérivées primaires.

3.5. Implications sur la façon de mesurer les grandeurs

3.5.1. Mesurer une grandeur primaire ou secondaire en pratique

Nous l'avons déjà indiqué : la mesure d'une grandeur secondaire se rapporte toujours à des mesures d'autres grandeurs primaires, même si cela peut ne pas être le cas en apparence. Prenons un exemple : la longueur qui est une grandeur secondaire. Pourtant, lorsqu'on utilise une règle graduée, on effectue une comparaison directe à un étalon, de type comparaison primaire. Mais il faut garder à l'esprit que cette règle a été fabriquée par comparaison à d'autres règles de référence..., selon une chaîne d'étalonnage qui remonte nécessairement à une réalisation du mètre *via* la définition de son unité et donc *via* une expérience impliquant c et une mesure de temps, grandeur primaire.

Tournons-nous maintenant vers les grandeurs primaires. Ce n'est pas parce qu'une grandeur est primaire dans un système donné qu'elle se mesure en pratique *via* l'utilisation des opérations de base décrites au sous-paragraphe 3.2.1. Le temps est grandeur primaire dans le SI, mais on mesure rarement un temps directement par des opérations de comparaison à l'étalon de référence défini par la radiation du césium. Au lieu de cela on peut utiliser des lois physiques dérivées, par exemple les oscillations d'un pendule dont on sait que la période est donnée par une formule du type $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$. Mais la subtilité est ici : g et l ont dû être mesurés par ailleurs, et ceci a impliqué des mesures de temps (pour g , pour l selon la définition de son unité), donc avec un autre chronomètre – lui-même étalonné par un dispositif mesurant le temps..., et cette chaîne d'étalonnage se termine nécessairement par un dispositif étalon qui définit la seconde par comparaison à l'étalon atomique de définition du SI.

Il en est ainsi de toutes les grandeurs primaires dans un système donné : il est possible en pratique de les mesurer indirectement, mais ces mesures utilisent des dispositifs étalonnés (des appareils de mesure, des valeurs de constantes comme g issues de mesures), et cette chaîne d'étalonnage se termine toujours par un dispositif qui réalise expérimentalement une comparaison directe à l'étalon de base. Quant aux grandeurs secondaires (qu'elles soient de base ou dérivées), nous avons dit que leurs mesures se ramènent à l'utilisation d'une formule et à la mesure de grandeurs primaires. Ainsi, toutes les mesures de la physique sont – *via* une chaîne d'étalonnage – des comparaisons directes entre des grandeurs primaires et leurs étalons de base.

3.5.2. Conditions pour qu'il soit possible de mesurer toutes les grandeurs d'un système de grandeurs

Les grandeurs primaires sont donc celles qui assurent la possibilité de mesurer. Une question se pose alors : comment garantir que toutes les grandeurs secondaires sont mesurables ? Deux cas sont à distinguer :

- ◆ Il existe une ou plusieurs grandeurs de base primaires, et les grandeurs de base non

primaires ont des unités définies à partir de ces grandeurs de base primaires. Alors la structure même du système va permettre la mesure de n'importe quelle autre grandeur. En effet, les grandeurs de base secondaires ont leur unité qui est définie de façon opératoire et qui permet leur mesure (en faisant intervenir les grandeurs de base primaires). Quant aux grandeurs dérivées, elles s'expriment par définition en fonction des grandeurs de base et sont donc mesurables par cet intermédiaire.

Exemple : tous les SI peuvent servir d'exemple. Prenons celui d'après 2019. La seconde et la quantité de matière sont grandeurs de base primaires, donc mesurables directement. Les grandeurs de base secondaires (masse, longueur, courant, température, intensité lumineuse) ont des unités définies de sorte que leur mesure soit possible (par un protocole faisant intervenir des mesures de temps). Toutes les grandeurs de base sont donc mesurables. Toutes les grandeurs dérivées le sont donc également.

- ◆ Il n'y a aucune grandeur de base primaire, ou du moins il y a un ensemble de grandeurs de base déconnectées de toute grandeur primaire. Il faut alors se tourner vers les grandeurs dérivées primaires, qui permettent des mesures, mais pas nécessairement toutes les mesures, car une grandeur donnée n'est pas nécessairement reliée à l'ensemble des grandeurs dérivées primaires. Le lien systématique présent dans le premier cas ci-dessus est ici absent.

Exemples

- Restreignons-nous aux grandeurs mécaniques (longueur, temps, masse), et définissons leurs unités en fixant la valeur numérique de la vitesse de la lumière, de la constante de raideur d'un ressort étalon, et d'une force étalon (par exemple la force exercée par un ressort de référence, lorsque comprimé de moitié). Ceci permet bien de définir les trois unités (revoir article 1.1.). Il n'y a aucune grandeur primaire parmi ces trois grandeurs de base. Et pourtant, les grandeurs dérivées primaires que sont la raideur (comparaison à celle du ressort de référence), la vitesse (comparaison à c), et la force (comparaison à l'étalon) permettent, par des expériences de mécanique, des mesures de masse, de longueur et de temps, et par suite de toute grandeur mécanique.
- Qu'en est-il du SI d'après 2019 où la seconde serait redéfinie en fixant la valeur numérique de la constante de gravitation G ? Il n'y a alors plus de grandeur primaire parmi temps, longueur et masse, et il ne me semble pas qu'il soit possible de mesurer l'ensemble des grandeurs mécaniques en restant au sein de ce système.

3.6. Bilan

Soulignons encore une fois le rôle remarquable des grandeurs primaires : l'utili-

sation des théories, les allers-retours entre expériences et théorie, s'appuient sur des mesures qui toujours se ramènent à des mesures des grandeurs primaires. Ainsi dans le SI d'après 2019, outre les cas particuliers de grandeurs dérivées primaires que sont la charge et la résistance électrique ou la vitesse, toute mesure – de longueur, de masse, d'intensité, d'énergie... – se rapporte à une mesure des deux seules grandeurs de base primaires : un comptage de nombre d'entités ou une mesure de temps. Cette structure du SI n'a pas été choisie par hasard, puisque depuis les horloges atomiques la durée est la grandeur que l'on mesure avec la meilleure des précisions. Nous avons vu que cette propriété des grandeurs primaires appelle un résultat important : un système de grandeurs et d'unités doit veiller à posséder une structure qui permette les mesures des grandeurs. Ceci est garanti soit par des définitions des unités de base qui permettent la mesure de toutes les grandeurs de base, et donc par suite de toutes les grandeurs dérivées ; soit par la présence d'un ensemble « complet » de grandeurs dérivées primaires.

CONCLUSION

Un système d'unités n'est pas seulement nécessaire à la bonne marche des échanges commerciaux à petite et grande échelle ou à la réalisation de travaux d'ingénierie et de mesures de pointe : bien en amont de tout ceci, les systèmes d'unités sont à l'interface même entre le monde matériel, siège des faits et des événements, et le monde de la théorie, ensemble des concepts et lois inventés par les physiciens pour décrire le monde matériel. Une mesure est l'identification d'un concept décrit par une théorie comme propriété d'un objet (masse, vitesse...), suivie d'une procédure opératoire concrète d'attribution d'un nombre à cette propriété. L'évolution des sciences physiques a mené aux concepts d'unité, d'homogénéité et de dimension afin de produire des lois et des mesures universelles, c'est-à-dire applicables indépendamment du choix des conventions locales. Ce sont ces termes et la structure d'une théorie que nous avons présentés dans la partie 1.

Une théorie seule – en tant qu'ensemble de définitions et de lois – est inopérante. Il faut d'une part choisir un ensemble de grandeurs de base, ce qui fixe la dimension des constantes de proportionnalité dans les lois et permet leur utilisation, puis d'autre part choisir les définitions des unités de base, ce qui définit la partition entre grandeurs primaires et secondaires et permet la mesure. Une théorie munie de ces choix, rendue opérante par ces choix, est appelée un système de grandeurs. Si nous récapitulons brièvement :

- ◆ La partition entre grandeurs de base et dérivées pose le cadre dimensionnel de la théorie (les dimensions des grandeurs de base forment une base pour toutes les dimensions des autres grandeurs), et est en partie liée à la mesure puisqu'une grandeur dérivée peut toujours être mesurée par sa formule de définition et par la mesure des grandeurs de base y intervenant. Nous avons décrit partie 2 que le choix des dimen-

sions des constantes de conversion permet de choisir l'ensemble des grandeurs de base, son cardinal pouvant aller de beaucoup à zéro.

- ◆ Mais la partition qui formalise la façon dont les mesures sont effectuées dans la théorie est celle entre grandeurs primaires et secondaires, telle que décrite dans la partie 3. Les grandeurs primaires sont définies par la façon même de les mesurer à l'aide d'opérations élémentaires et expérimentalement réalisables, et en cela sont en prise directe avec le réel. Les grandeurs secondaires sont mesurées indirectement, car déduites de mesures de grandeurs primaires et de l'application de formules de la théorie. Toute mesure se ramène donc à une mesure de grandeur primaire. Ce sont les définitions des unités de base qui déterminent cette partition, et il faut prendre garde à ce que les grandeurs primaires permettent bien une mesure de toutes les grandeurs de la théorie.

Citons pour conclure Sir Arthur Eddington (1939) [4] : « *It has come to be accepted practice in introducing new physical quantities that they shall be regarded as defined by the series of measuring operations and calculations of which they are the result. Those who associate with the result a mental picture of some entity disporting itself in a metaphysical realm of existence do so at their own risk; physics can accept no responsibility for this embellishment.* » Ainsi, pour le physicien la seule définition d'une grandeur qui importe est la façon dont elle est mesurée, et toute interprétation des concepts – bien qu'utile pour l'intuition guidant le physicien – est au final superflue. Qu'est-ce que le temps ? Un décompte local du nombre d'oscillations de l'atome de césium entre deux événements, accompagné des relations de la théorie dans laquelle cette grandeur t intervient et qui permettent de l'utiliser ou de la mesurer indirectement. C'est la seule définition qui importe, car c'est par elle seulement que tous les résultats de la physique sont obtenus et vérifiés.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. Einstein, *Ideas and Opinions*, Broadway Books, 1995.
- [2] Collectif, BIPM, « Vocabulaire international de la métrologie », 3^e édition. 2012.
- [3] P.W. Bridgman, *Dimensional analysis*, New Haven and London : Yale University Press, 1931.
- [4] A.-A. Sonin, *The Physical Basis of Dimensional Analysis*, 1992.
Consultable en ligne : http://web.mit.edu/2.25/www/pdf/DA_unified.pdf
- [5] M. Melzani, « Enseigner explicitement la démarche de modélisation et le fonctionnement des sciences physiques », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 112, n° 1008, p. 1179-1201, novembre 2018.

[6] J.-M. Lévy-Leblond, « Au-delà de l'évidence », In : *Sur mesure, les 7 unités du monde*, 2018.

[7] J.-P. Uzan et R. Lehoucq, *Les constantes fondamentales*, Belin, 2005.

Note de la rédaction

Cet article comporte deux autres parties :

- ◆ Partie 1.1., est parue dans *Le Bup* n° 1017 d'octobre 2019 ;
- ◆ Partie 1.2., est parue dans *Le Bup* n° 1019 de décembre 2019.

Annexe

Perspective historique : nécessité des unités ?

Si elles sont nécessaires pour les échanges commerciaux et sociétaux en général, et utilisées ainsi depuis plus de huit mille ans, les unités n'ont en revanche pas toujours été nécessaires à l'avancée et à l'utilisation de la physique. Nous expliquons ici pourquoi.

Pendant longtemps, les physiciens ont exprimé leurs lois sous forme de rapports de grandeurs de même nature, et il était difficilement concevable de faire autrement. Ainsi Archimède mesure la teneur en or d'une couronne en comparant sa densité à celle d'un volume d'or équivalent, et la notion de densité perdure longtemps avant que n'apparaisse la masse volumique $\rho = m/V$ [6]. Ou encore Galilée exprime dans ses *Discours* (1638) la loi sur la chute des corps en t^2 non pas comme $z = gt^2/2$, mais comme $AB/AC = (t_{AB}/t_{AC})^2$: « nous avons toujours trouvé que les espaces parcourus étaient entre eux comme les carrés des temps ». Dans ses expériences, les rapports des durées sont mesurés par les rapports des masses d'eau écoulée depuis un récipient, sans passer par une écriture individuelle de chaque durée sous la forme nombre et unité. De même pour les rapports de longueurs qui sont formés directement sans nécessité de passer par une telle écriture. Les unités ne sont en fait pas utilisées si l'on procède ainsi !

Galilée toutefois introduit la grandeur vitesse $v = \text{distance}/\text{temps}$, rapport de grandeurs de différentes natures, et il s'agit là réellement d'un saut épistémologique [6]. Mais la pratique ne se généralise pas : Newton dans ses *Principia* (1687) utilise encore largement des rapports de grandeurs de même nature ; en 1798 Cavendish étudie la force d'attraction gravitationnelle entre deux masses et n'en déduit pas la valeur de G (qui n'existait pas), mais mesure tout en termes de rapports et en déduit la masse de la Terre rapportée à une masse connue [7]. Si tout est ainsi mesuré et exprimé en termes de rapports de grandeurs de même nature, alors les lois sont automatiquement indépendantes du choix des unités, et les unités ne sont même pas nécessaires pour les mesures.

On peut globalement dire que ce n'est que vers 1800 qu'apparaissent systématiquement des grandeurs qui sont des rapports de grandeurs de natures différentes dans les lois des physiciens, surtout à cause du développement de la thermodynamique et de l'électricité. Par exemple, la densité devient difficilement adaptée à l'étude des gaz, et la masse volumique permet de caractériser de façon intrinsèque le corps considéré ; ou encore Gauss propose une mesure de l'intensité du champ magnétique en 1832 qui n'est pas celle d'un rapport, mais une expression en fonction d'unités mécaniques, méthode qui se généralise alors à toutes les grandeurs électriques avec le système CGS de Kelvin et Maxwell (cf. article 1.2.).

Il faut alors évidemment préciser les unités pour donner un sens aux valeurs numériques obtenues, et donc écrire des choses comme $x = \text{nombre, unité}$! L'usage des unités et la question de leur définition entre pleinement dans la physique à cette époque, notamment avec le Congrès international d'électricité de 1881 et l'adoption du système CGS. Ce n'est donc pas un hasard si le désir d'uniformisation des unités utilisées en physique uniquement (force, énergie, charge et courant électrique...) date de cette époque et s'achève tardivement avec le SI de 1960, alors que l'uniformisation des grandeurs liées aux échanges commerciaux ou à la réglementation est beaucoup plus ancienne (en 1791 pour le système métrique avec la masse, la longueur, les surfaces et les volumes, mais on rencontre des tentatives plus anciennes dans les grandes cités mésopotamiennes ou dans les premiers empires jusqu'à celui de Charlemagne).

Notons bien qu'une formulation analytique des lois où les constantes de proportionnalité apparaissent était souhaitable, car les lois exprimées comme des rapports ne révèlent pas toute l'information. Ainsi la loi d'isochronisme du pendule $T_1/T_2 = (l_1/l_2)^{1/2}$ est vraie en tout lieu écrite ainsi, mais elle interdit de voir que la période varie avec l'intensité de la pesanteur. Il faut pour cela l'écrire en faisant apparaître la constante de proportionnalité : $T = 2\pi (l/g)^{1/2}$ est une loi qui contient plus d'informations. C'est donc à partir des années 1800 que les constantes comme g , G , $\mu_0 \dots$, apparaissent systématiquement.

C'est ainsi que la loi de la gravitation est écrite sous sa forme actuelle avec une constante de proportionnalité (alors notée f au lieu de G) en 1873 seulement [7]. Ces constantes sont dimensionnées, et leur valeur numérique est donc nécessairement associée à une unité, souvent composée. Alors seulement la notion de dimension telle que définie dans cet article prend un sens. Viennent ensuite les questions du choix des grandeurs de base (système CGS ou système MKSA), l'utilisation de l'analyse dimensionnelle (théorème II vers 1880), et le présent article...



Mickaël MELZANI

Professeur de sciences physiques en PTSI
Lycée Raoul Follereau
Belfort (Territoire de Belfort)

Le ciel en 2020

par **Jean DERVIEUX**

Lycée Blaise Pascal - 63000 Clermont-Ferrand
jean.dervieux@ac-clermont.fr

A PRÈS UN RETOUR sur quelques événements marquants de l'année écoulée, sont discutées comme à l'habitude la visibilité des planètes en 2020, leurs situations héliocentriques et leurs conditions d'observation ainsi que les données nécessaires à la réalisation d'un planétaire et à sa mise à jour tout au long de l'année. Suit la mise à l'heure des cadrans solaires et un recensement des éclipses qui se produiront cette année. Ce sont là des informations de base pour suivre l'essentiel de ce qui se passe dans le ciel visible à l'œil nu (mis à part les phases de la Lune qui figurent dans tous les calendriers !) et les données fournies se prêtent le cas échéant à un travail pédagogique. Pour plus d'informations on pourra consulter des sites Internet du type « Ciel du mois », des revues comme « L'Astronomie » ou « Ciel & Espace », et des ouvrages comme le « Guide du ciel » de Guillaume Cannat ou le « Guide de données astronomiques » de l'Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides (IMCCE), publié chaque année (par EDP Sciences) et présenté dans la rubrique « Nous avons lu ».

1. RETOUR SUR 2019

1.1. Passage de Mercure devant le Soleil le 11 novembre 2019

En novembre dernier, le passage de Mercure en conjonction inférieure (entre la Terre et le Soleil) s'est accompagné du phénomène de « transit », c'est-à-dire que depuis la Terre, on a pu observer en ombre chinoise le passage de la planète devant le disque solaire⁽¹⁾. Les orbites n'étant pas exactement coplanaires, ces transits, qui se produisent en mai ou novembre, sont peu fréquents, et le prochain n'aura lieu que le 13 novembre 2032 (il sera visible en partie en France le matin). En attendant, de nombreuses images et films sont disponibles sur le site dédié de la NASA⁽²⁾, illustrant magnifiquement la variété des observations faites dans différents domaines spectraux par le satellite SDO (*Solar Dynamics Observatory*, lancé en 2010, pour une fin de mission prévue en 2020).

La sonde européenne *Proba-2 a*, elle aussi, obtenu de belles images dans l'ultraviolet lointain, et on peut retrouver sur le site de l'ESA une animation dont est extraite

(1) <https://www.obspm.fr/passage-de-mercure-devant-le.html>

(2) <https://mercurytransit.gsfc.nasa.gov/2019/>, films téléchargeables au format mp4.

l'image suivante⁽³⁾ (cf. figure 1). Distinguez-vous Mercure ? On mesure à quel point notre étoile est gigantesque par rapport aux planètes telluriques !

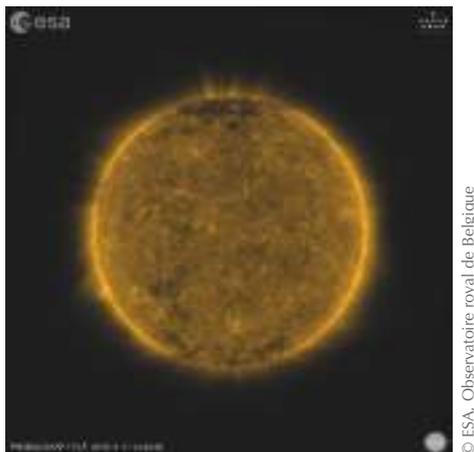


Figure 1 - Transit de Mercure du 11 novembre 2019.

1.2. Le prix Nobel de physique⁽⁴⁾

Le prix de physique 2019 a été attribué par le Comité Nobel pour moitié à James Peebles, considéré comme rien moins que « le père de la cosmologie moderne », et pour moitié aux astrophysiciens suisses Michel Mayor et Didier Queloz, célèbres pour la découverte en 1995 de 51 Pegasi b, un « Jupiter chaud », première planète découverte en orbite autour d'une étoile de la séquence principale⁽⁵⁾.

On connaît aujourd'hui environ quatre mille de ces « autres mondes » pressentis par Fontenelle ou Giordano Bruno... mais en fait ces « exoplanètes » se comptent sans doute en centaines de milliards rien que dans notre galaxie !

Les premières détectées, très grosses et proches de leur étoile, provoquèrent bien des interrogations. Les progrès matériels aidant, on a détecté depuis des exoplanètes très variées, et au mois d'août 2019 on annonçait que GJ357d, à 31 années-lumière (a.l.) de la Terre, serait susceptible de conserver de l'eau liquide, milieu *a priori* propice à la vie... (cf. figure 2, page ci-contre).

(3) http://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2019/11/Proba-2_watches_Mercury_transit

(4) <https://www.sfpnet.fr/laureats-du-prix-nobel-de-physique-2019>

(5) Dans l'absolu, les premières exoplanètes découvertes le furent en 1992, orbitant à la surprise générale autour d'un pulsar, c'est-à-dire un résidu de supernova.



Figure 2 - Vue d'artiste de la douzaine de planètes, découvertes par le satellite Kepler, aux caractéristiques relativement proches de celles de la Terre.

Et puis, dans une autre catégorie, les médias titraient fin septembre 2019 : « *GJ 3512b, la planète qui ne devrait pas exister* » : planète géante en orbite autour d'une étoile naine, elle remet en cause les modèles de formation admis et opérationnels jusque-là !

En décembre 2019 a été lancé CHEOPS (*CHAracterising ExOPlanet Satellite*), projet mené sous la direction de Didier Queloz (cf. figure 3). Il ne s'agit pas pour ce télescope spatial de découvrir de nouvelles exoplanètes, rôle actuellement dévolu à TESS (*Transiting Exoplanet Survey Satellite*), successeur de COROT (2006–2012) et de



Figure 3 - Vue d'artiste du satellite CHEOPS, avec en arrière-plan un système d'exoplanètes.

KEPLER⁽⁶⁾ (2009-2018). CHEOPS va plutôt se consacrer à la mesure plus précise de la taille de planètes déjà répertoriées, afin de permettre de mieux évaluer leur densité et donc leur composition possible.

Pour en savoir plus : <http://exoplanet.eu/>, une encyclopédie des planètes extrasolaires.

1.3. La planète X

Planète X... « X » comme « 10 » en chiffres romains, pour désigner la dixième planète d'un système solaire à préciser ? ou « X » ([iks]), comme en mathématiques on désigne une grandeur inconnue ? planète hypothétique, porteuse de vie ou de mort ? révélatrice de quels mystères ? promesse de catastrophes ou de connaissance ?

Dans les années suivant la Deuxième Guerre mondiale, les astronomes se sont convaincus de l'existence de nombreux petits astres lointains dans le système solaire : ceinture de Kuiper au-delà de l'orbite de Pluton, et beaucoup plus lointain, le nuage de Oort, réservoir de noyaux cométaires situé aux limites de l'influence gravitationnelle du Soleil... À la fin du xx^e siècle, on découvrit les KBO (*Kuiper Belt Object*), et des objets dits « épars » : QB1 (15760 *Albion*) en 1992, puis *Varuna*, *Quaoar*, *Orcus*... *Sedna* en 2003, et en 2005 *Eris* qui fit beaucoup parler d'elle. Ses découvreurs californiens⁽⁷⁾ la pensaient nettement plus grosse que Pluton et annoncèrent la découverte de la planète X ! Mais finalement, bien qu'elle soit d'un quart plus massive, les mesures lui donnèrent une taille un poil (1 à 2 %) plus petite que celle de Pluton, et après toutes ces disputes cette planète naine fut baptisée *Eris*, du nom de la déesse grecque de la discorde, et son satellite *Dysnomia*, c'est-à-dire l'anarchie !

C'était bien le cas, puisque les découvertes s'accumulaient, que Pluton n'était le plus gros transneptunien qu'à quelques dizaines de kilomètres près, et n'était que le deuxième en masse... d'où la création du statut de « planète naine » évoqué plus loin.

Mais malgré cette situation confuse, une planète « X » est plus que jamais recherchée aux confins du système solaire... sauf que c'est aujourd'hui la « *Planet Nine* » qu'il convient de traquer ! Nous savons avec Neptune et Pluton (cf. infra) qu'une nouvelle planète peut être identifiée de deux façons : par détection de son mouvement par rapport aux étoiles fixes sur des photographies ou, si elle est suffisamment massive, par son influence gravitationnelle sur les mouvements de corps bien connus, comme les mouvements d'un troupeau indiqueraient la présence d'un chien de berger.

(6) <https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/astronomie-kepler-retour-plus-belles-decouvertes-ce-grand-chasseur-exoplanetes-73413/>

(7) M. Brown, C. Trujillo et D. Rabinowith, du CalTech, à l'aide d'un télescope de l'observatoire du Mont Palomar.

Et justement, l'étude des orbites des principaux objets connus de la ceinture de Kuiper suggère actuellement à plusieurs astronomes⁽⁸⁾ l'existence d'une grosse planète qui pourrait être entre cinq et dix fois plus massive que la Terre⁽⁹⁾, serait environ vingt fois plus loin que Neptune et parcourrait son orbite en cent fois plus de temps, soit 15 à 20 000 ans... Ce pourrait être aussi un anneau de petits corps glacés... mais l'hypothèse d'une planète est plus excitante ! Si elle existe, elle ne sera pas facile à trouver à une telle distance... Compte tenu de l'évolution des moyens d'observation, nous devrions être fixés dans quelques années, et au moins une chose est sûre : il ne faudra pas l'appeler Nibiru⁽¹⁰⁾, car, habitée ou non, jamais son orbite ne la rapprochera de la Terre !

Enfin – *last but not least* – l'hypothèse de deux physiciens américains (Jakub Scholtz et James Unwin), publiée par divers médias⁽¹¹⁾ lundi 30 septembre 2019 : ils expliquent qu'un trou noir de la taille d'une boule de bowling aurait les mêmes effets sur les transneptuniens que la *Planet Nine* évoquée ! De tels trous noirs dits « primordiaux », encore hypothétiques, se seraient formés dans l'Univers jeune et très dense. Si l'un d'eux gravite autour de notre système, il devrait provoquer des émissions de rayons gamma détectables... à suivre donc !

De l'hypothétique planète X complétant une série familière, à un possible trou noir en maraude aux confins obscurs de notre petit système solaire... quelle aventure !

2. LES PLANÈTES

2.1. L'observation des planètes en 2020

2.1.1. Comment repérer une planète dans le ciel

À l'œil nu, l'apparence des planètes ressemble à première vue à celle des étoiles : ce sont des points plus ou moins brillants dans le fourmillement céleste. Mais une observation attentive permet de constater plusieurs particularités :

- ◆ les planètes visibles à l'œil nu sont parmi les astres les plus brillants du ciel ;
- ◆ elles ne scintillent pas ;
- ◆ leur éclat varie lentement en fonction de leur position par rapport à la Terre et au Soleil ;
- ◆ avec des jumelles ou un petit télescope, une planète présente un diamètre apparent

(8) En particulier Konstantin Batygin et Mike Brown, CalTech.

(9) Le rapport à la masse de la Terre est de $17\times$ pour Neptune, $95\times$ pour Saturne, $318\times$ pour Jupiter.

(10) <https://fr.wikipedia.org/wiki/Nibiru>

(11) <https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/systeme-solaire-externe-si-planete-9-introuvable-cest-peut-etre-parce-que-cest-trou-noir-61322/>

alors que les étoiles n'apparaissent toujours que sous l'aspect d'un point ;

- ◆ les planètes vues de la Terre se déplacent sur le fond d'étoiles fixes ; les orbites des autres planètes étant peu inclinées par rapport au plan de l'écliptique (plan contenant l'orbite terrestre), elles passent comme le Soleil devant les constellations du zodiaque.

La visibilité d'une planète à un instant donné, hors considérations météorologiques, est conditionnée par sa position relative à celles de la Terre et du Soleil, ce dernier pouvant parfois être un obstacle à leur observation.

Les configurations des planètes les plus proches changent très rapidement, alors que les plus lointaines (Jupiter, Saturne) se déplacent lentement ; en conséquence, il y a chaque année plusieurs périodes de visibilité de Mercure et de Vénus, tandis que Jupiter et Saturne peuvent être visibles ou invisibles de longs mois.

Mercury et Vénus ne sont visibles qu'en soirée ou en fin de nuit (cf. figure 4), mais jamais la nuit entière. Toutes les autres planètes peuvent être observées à différentes heures de la nuit selon leur période de visibilité.

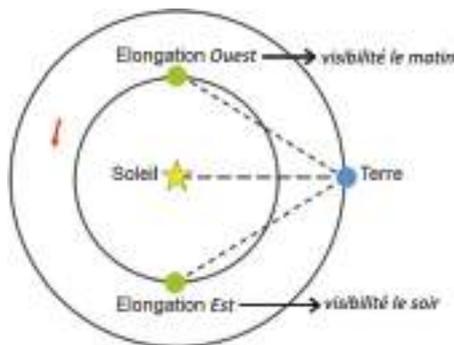


Figure 4 - Élongation d'une planète inférieure.

2.1.2. Positions relatives de la Terre, du Soleil et d'une planète

Les planètes dites *inférieures* sont plus proches du Soleil que la Terre ; ce sont Mercure et Vénus. L'écart angulaire par rapport au Soleil de ces planètes, nommé élongation, oscille périodiquement entre un maximum vers l'Est et un maximum symétrique vers l'Ouest : environ 28° pour Mercure et 47° pour Vénus.

Sachant que la rotation propre de la Terre se fait à raison de 15° par heure, ces planètes ne sont observables que dans un intervalle de quelques heures autour du lever (si élongation Ouest) ou du coucher du Soleil (si élongation Est). L'observation est naturellement meilleure en situation d'élongation maximale.

D'autres configurations remarquables sont les rapprochements apparents d'astres

vus dans des directions proches par un observateur donné : les conjonctions.

On présentera dans la partie 2 les conjonctions de planètes. Commençons par la conjonction d'une planète avec le Soleil pour un observateur terrestre, ce qui signifie que la Terre, le Soleil et la planète considérée sont approximativement alignés.

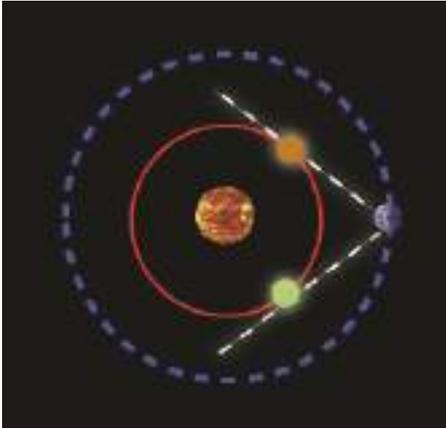


Figure 5 - Élongations maximales d'une planète inférieure.



Figure 6 - Conjonctions - Opposition.

Pour Mercure et Vénus, il y a *conjonction supérieure* lorsque la planète est à l'opposé de la Terre par rapport au Soleil (elle est donc invisible) et *conjonction inférieure* lorsque la planète est entre le Soleil et la Terre. Elle est donc *a priori* invisible, mais selon la précision de l'alignement, il y a ou non passage apparent de la planète devant le Soleil, ce qu'on appelle un transit (cf. supra).

Enfin, pour une planète supérieure (c'est-à-dire à partir de Mars), il y a une conjonction lorsque la planète est à l'opposé de la Terre par rapport au Soleil (elle est donc invisible), et une opposition lorsque la planète est à l'opposé du Soleil par rapport à la Terre (c'est-à-dire que, vue de la planète, la Terre serait en conjonction inférieure). L'opposition est la meilleure configuration d'observation puisque la planète est alors bien éclairée durant la nuit terrestre, et qu'elle se trouve au plus près de la Terre (la distance précise varie d'une opposition à l'autre selon l'excentricité de l'orbite).

2.1.3. Période synodique

La période synodique $T_{p/T}$ d'une planète observée depuis la Terre est la durée séparant deux configurations Terre-Soleil-Planète identiques, par exemple deux oppositions. Un planétaire ou un simple schéma permettent de comprendre que, pendant cette durée, la planète la plus proche du Soleil accomplit une révolution de plus que

l'autre, d'où la relation avec les périodes orbitales T_T et T_P :

$$\frac{T_{P/T}}{T_T} = \frac{T_{P/T}}{T_P} \pm 1 \Leftrightarrow \frac{1}{T_{P/T}} = \pm \left(\frac{1}{T_T} - \frac{1}{T_P} \right).$$

On peut ainsi calculer les valeurs (arrondies) suivantes pour les cinq planètes facilement visibles (cf. tableau 1).

	Mercure	Vénus	Mars	Jupiter	Saturne
$T_{P/T}$ (unités terrestres)	4 mois	1 an 7 mois	2 ans 2 mois	1 an 1 mois	1 an 13 jours

Tableau 1

Comme nous le verrons dans la suite, les configurations de Mercure changent très rapidement étant donnée la rapidité de sa révolution héliocentrique, ce qui permet plusieurs périodes de visibilité, mais courtes, chaque année.

Les planètes Vénus et Mars ayant les périodes les plus proches de celle de la Terre, c'est elles qui auront les périodes synodiques les plus longues. C'est pourquoi en 2020, nous retrouverons comme en 2018 de belles conditions d'observation de Mars, mais avec une opposition mi-octobre au lieu de fin juillet.

On comprend que pour les planètes les plus éloignées, $T_P \gg T_T \Rightarrow T_{P/T} \cong T_T$, soit en pratique un peu plus d'un an : c'est ainsi que nous retrouverons Jupiter en opposition à mi-juillet en 2020, alors que c'était mi-juin en 2019.

2.1.4. Diagramme de visibilité

En se plaçant figure 7 (cf. page ci-contre) au niveau d'un jour donné, on visualise l'élongation entre la planète considérée et le Soleil, convertie en décalage temporel sur la base de quatre minutes par degré, correspondant à la rotation de la Terre sur son axe :

- ◆ *décalage nul* : conjonction, l'astre est invisible car son mouvement apparent est en phase avec celui du Soleil et il traverse le ciel de jour ;
- ◆ *décalage de douze heures (planètes supérieures seulement)* : opposition, passage au méridien à minuit, visibilité optimale ;
- ◆ *décalage négatif* : l'astre se lève plus tôt que le Soleil, il sera visible le matin ; décalage positif : l'astre se couche plus tard que le Soleil, il sera visible le soir.

Par exemple, on observe pour cette année que :

- ◆ Jusqu'au milieu du mois de mai (jour 135), Vénus sera bien visible dans le ciel du soir, avec plus de 2h de retard sur le Soleil.
- ◆ Mercure étant plus proche du Soleil se déplace beaucoup plus rapidement et change de configuration plus rapidement aussi ; en début d'année, la période d'observation la plus favorable s'étendra du 10 mars (jour 70) au 10 avril (jour 100), le matin puisque Mercure aura presque 2h d'avance sur le Soleil.

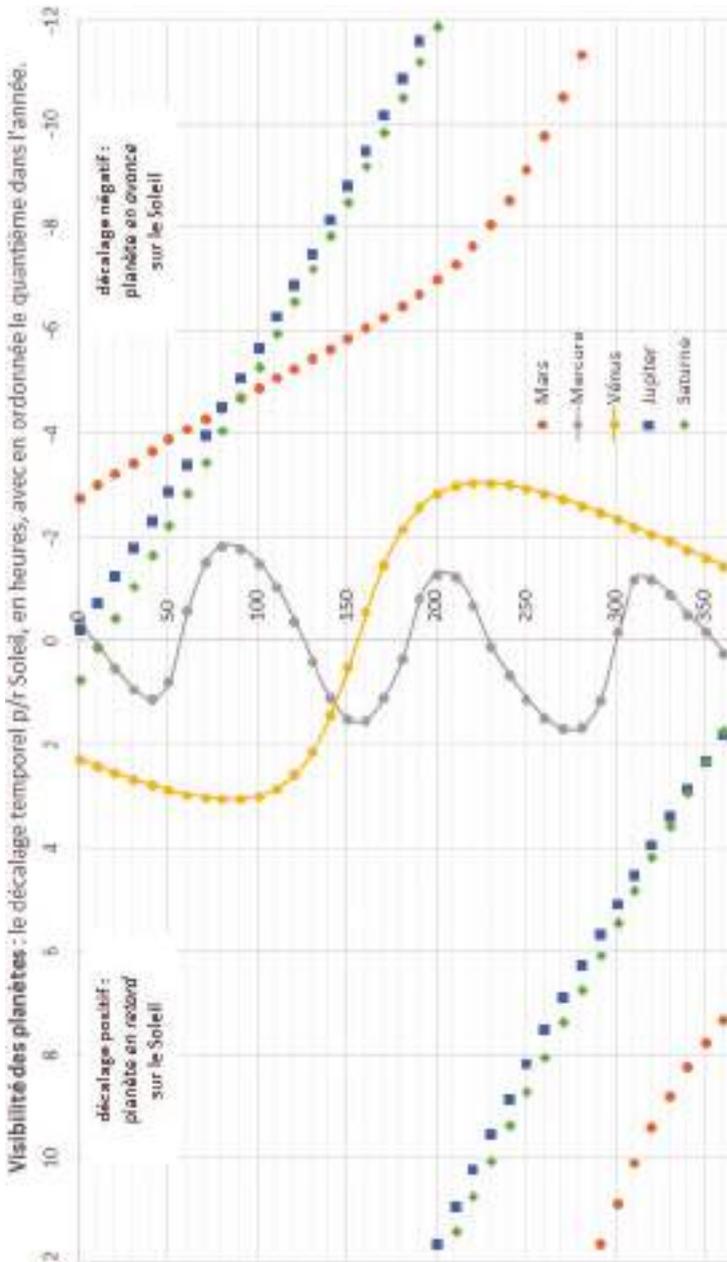


Figure 7 - Diagramme de visibilité des planètes (d'après données NASA).

- ◆ Les courbes de Mercure et Vénus se croisent vers la fin du mois de mai (21/22), ce qui signifie que les deux planètes apparaîtront très proches dans le ciel du coucher du Soleil. Il en sera de même pour Jupiter et Saturne fin décembre (le 21).
- ◆ En automne, la planète Mars sera en opposition de phase avec le Soleil et sera donc visible toute la nuit, passant au méridien en milieu de nuit.
- ◆ etc.

Les principales observations déduites de ce diagramme (cf. figure 7, page ci-précédente) sont présentées ci-après. Pour plus de précision et pour visualiser les phénomènes, on pourra utiliser le logiciel libre *Stellarium*.

Mercury

Il est toujours assez difficile d'observer la planète la plus proche du Soleil et on doit la rechercher à proximité de l'astre du jour juste après son coucher ou juste avant son lever. On ne peut donc repérer Mercure que le soir dans les lueurs du couchant ou le matin dans la luminosité de l'aube naissante, et toujours assez basse sur l'horizon. Les jumelles sont alors des outils appréciables et il faut choisir les périodes où la planète est la plus écartée possible du Soleil (élongations maximales) pour l'observer dans les meilleures conditions. L'orbite de Mercure étant fortement excentrée, certaines élongations maximales peuvent être plus intéressantes que d'autres et atteindre presque 28° , mais, même dans ces conditions, il ne faut pas espérer observer Mercure beaucoup plus d'une heure, soit le soir, soit le matin. La période de visibilité de la planète s'étale sur environ une semaine autour de chaque date d'élongation maximale. Le graphique met en évidence les plus grandes élongations :

- ◆ *du soir* : 10 février ($18,2^\circ$ E) ; 4 juin ($23,6^\circ$ E) ; 1^{er} octobre ($25,8^\circ$ E) ;
- ◆ *du matin* : 24 mars ($27,8^\circ$ O) ; 22 juillet ($20,1^\circ$ O) ; 10 novembre ($19,1^\circ$ O).

Un autre élément doit également être pris en compte : l'inclinaison de l'écliptique par rapport à l'horizon qui est variable en fonction de la période de l'année. Pour ce dernier critère, les élongations de mars à septembre sont à privilégier, l'éclat de la petite planète est alors moins atténué par l'absorption atmosphérique.

Vénus

Astre le plus brillant du ciel après le Soleil et la Lune, Vénus se remarque facilement dans ses périodes de visibilité, apparaissant ou persistant seule dans le ciel clair de l'aube ou du crépuscule ; on peut s'aider de jumelles pour chercher à la repérer le plus tôt ou le plus tard possible dans le ciel encore – ou déjà – bleu. C'est elle qui a été surnommée « l'étoile du berger ».

En ce début d'année, elle sera bien visible le soir, culminant à son élongation maximale le 24 mars ($46,6^\circ$ O) ; à la mi-mai, elle amorcera un mouvement apparent rétrograde puis sera invisible pendant quelques semaines (conjonction inférieure le

4 juin) ; elle reviendra avec l'été et sera bien visible, le matin, pour la suite de l'année (élongation maximale de $45,8^\circ$ le 13 août).

Mars

Après une année 2019 bien peu propice à l'observation de la planète rouge, les choses s'arrangent spectaculairement en 2020 ! La courbe de visibilité montre que Mars sera visible tout d'abord à l'aube, puis se lèvera de plus en plus tôt, la configuration optimale – l'opposition – ayant lieu le 13 octobre. Tout en se couchant de plus en plus tôt, la planète sera encore visible une grande partie de la nuit pour la fin de l'année.

Les oppositions sont *a priori* les meilleures périodes d'observation, cependant toutes ne se valent pas : en raison des excentricités des orbites, la distance de Mars à la Terre lors d'une opposition peut varier de 56 à 101 millions de kilomètres ! Le 13 octobre prochain, Mars n'apparaîtra pas aussi grosse que lors de la précédente et remarquable opposition, le 27 juillet 2018, mais elle sera nettement plus haute dans le ciel et son rayonnement sera donc moins absorbé par l'atmosphère terrestre. Elle sera alors plus brillante que Jupiter.

Pendant que nous admirerons l'éclat croissant de Mars dans le ciel d'été (elle aura une magnitude apparente négative dès le début du mois de juin), la mission spatiale « Mars 2020 » prendra son envol ! La fenêtre de lancement s'étendra du 17 juillet au 5 août, pour une arrivée en février 2021⁽¹²⁾. Ses objectifs sont ambitieux : approfondir l'étude du climat et de la géologie, déterminer s'il y a jamais eu de la vie sur Mars, et préparer l'exploration humaine. Le rover 2020, s'il est basé sur la technique éprouvée de *Curiosity*, se déplacera davantage et aura de meilleures capacités de collecte d'échantillons. On le voit ci-dessus (cf. figure 8) à l'essai en Islande, en juillet 2019.



© Mission Control Space Services

Figure 8 - Sand-e (Semi-Autonomous Navigation for Detrital Environments) à l'épreuve en Islande.

Jupiter et Saturne

Le graphique montre bien le rapprochement qui s'opère entre ces deux planètes vues de la Terre, et qui conduira à une conjonction – très serrée – le 21 décembre 2020.

(12) <https://mars.nasa.gov/mars2020/>

Avec un peu d'avance sur sa commère, Jupiter commencera à apparaître à l'aube dès janvier, mais bien basse sur l'horizon, et il faudra attendre un mois de plus pour voir Saturne à sa suite. Au mois de mars, ces deux astres prendront de la hauteur dans le ciel du petit matin. Au printemps, ces planètes se lèveront de plus en plus tôt, pour être admirées toute la nuit en juillet, avec des oppositions le 14 pour Jupiter, le 20 pour Saturne. Se couchant de plus en plus tôt dans les mois suivants, elles seront observables en première partie de nuit, puis au crépuscule, se rapprochant de plus en plus l'une de l'autre... jusqu'à la conjonction décrite plus loin.

Uranus

Peu de changement d'une année sur l'autre au vu de la longue période orbitale (84 ans). En conjonction avec le Soleil le 26 avril et en opposition le 31 octobre.

Uranus est théoriquement visible à l'œil nu puisque sa magnitude apparente varie entre 5,3 et 6, valeur considérée comme la limite accessible, mais il faut de très bonnes conditions d'observation : ciel bien noir (pas de Lune, pas de pollution lumineuse) et hauteur suffisante au-dessus de l'horizon.

Si l'on reprend les critères énoncés au début de cette section, on comprend que malgré cette visibilité plus facile sous un ciel préindustriel, cette planète n'ait pas été répertoriée par les anciens : son éclat est très faible, son diamètre apparent imperceptible sans un télescope d'un certain diamètre, et elle se déplace très lentement devant les étoiles fixes. Elle avait d'ailleurs été repérée, mais notée comme une étoile (34 Tauri) par le célèbre astronome anglais John Flamsteed en 1690 ! C'est seulement le 26 avril 1781 que l'astronome William Herschel annonça sa découverte, faite chez lui à Bath, le 13 mars, grâce à un télescope de sa fabrication, celui « de sept pieds » (distance focale du miroir primaire) grossissant deux cent vingt-sept fois. L'observation de la septième planète du système solaire est aujourd'hui à la portée de tout un chacun, encore fallait-il l'identifier !

On pourra essayer de l'observer plus simplement, avec des jumelles, le 8 mars 2020 : en effet, ce jour-là, la brillante et immanquable Vénus ne sera qu'à $2,2^\circ$ à droite d'Uranus, dans une zone du ciel peu étoilée, ce qui permettra de repérer facilement notre discrète héroïne (2° : à peu près la largeur de l'index, bras tendu). Quelques jours plus tard, Vénus s'étant éloignée, et Uranus n'ayant pas bougé par rapport aux étoiles, on pourra tenter de la retrouver à l'œil nu, avant bien sûr le lever de la Lune.

William Herschel s'est fait connaître par la qualité des instruments qu'il fabriquait, et c'est un bel hommage que d'avoir baptisé de son nom un télescope spatial doté du plus grand miroir mis en orbite à ce jour (3,5 m), et qui a accumulé plus de 25 000 heures d'observations infrarouges et submillimétriques entre 2009 et 2013, avant d'être contraint à l'arrêt par l'épuisement de ses réserves d'hélium liquide, fluide indispensable au maintien de ses détecteurs à leur très basse température de fonctionnement.

Remarquons enfin que non seulement ce rapprochement Vénus-Uranus aura lieu à quelques jours de l'anniversaire de la découverte, mais que ce sera le 8 mars, la « Journée internationale des femmes »⁽¹³⁾. Ce sera ainsi l'occasion de rendre hommage à Caroline Herschel, sœur de William, qui après avoir travaillé à ses côtés, et découvert des comètes et des objets du ciel profond, fut comme lui pensionnée par le roi George III. Ce fut sans doute la première femme rétribuée pour son travail scientifique ! Elle eut une vie longue et fructueuse et travailla également avec son neveu John, fils de William et lui aussi astronome réputé (et qui soutint le projet de construction d'un observatoire météorologique et astronomique au sommet du pic du Midi à Bagnères-de-Bigorre).

Neptune

Invisible à l'œil nu, il faut un télescope d'au moins 200 mm de diamètre pour apprécier son diamètre apparent et sa couleur bleutée.

Pour cette planète dont la période de révolution atteint 165 ans, faible décalage également par rapport à l'année dernière ; elle sera en conjonction avec le Soleil le 8 mars et en opposition le 11 septembre.

À noter que le 27 janvier, Vénus toujours aussi facilement repérable passera à moins de 0,1° de Neptune dans le ciel du soir, ce qui facilitera grandement la détection de celle-ci !

Pluton : sic transit gloria mundi...

Pourquoi en parler ici ? Avec une magnitude apparente de l'ordre de 14, Pluton est naturellement invisible à l'œil nu, et peut tout juste être distinguée, sous un aspect stellaire, dans un sérieux instrument d'amateur... Et de plus, depuis 2006, elle ne figure plus au rang des planètes principales !

Mais ce début d'année 2020, outre le fait qu'il accueille un rapprochement apparent à moins de 1° de Pluton et de Saturne la première semaine de janvier (conjonction qui ne laisse pas d'inquiéter les astrologues !), offre l'occasion d'évoquer l'histoire de la découverte de Pluton, car c'en sera le 90^e anniversaire le 18 février.

L'astronomie antique, géocentrée, considérait sept astres errants (Soleil, Lune et cinq planètes) dans les cieux entourant la Terre. Au tournant du xvii^e siècle, la Terre a pris place dans le manège héliocentrique des planètes, complété aux xix^e et xx^e siècles grâce aux progrès techniques (télescopes, photographie) et mathématiques (calculs perturbatifs).

C'est ainsi qu'Uranus s'y est ajoutée en 1781 et Neptune en 1846 ; le xix^e siècle a

(13) <https://www.un.org/fr/events/womensday/history.shtml>

vu aussi la découverte de la ceinture d'astéroïdes entre les orbites de Mars et Jupiter⁽¹⁴⁾.

Ensuite plus rien pendant des décennies... mais la planète X pointa le bout de son nez au début du xx^e siècle, et sa quête obséda Percival Lowell, diplômé en mathématiques, homme d'affaires, et passionné par la planète Mars... après avoir lu notre Camille Flammarion national ! Il fit construire un observatoire à Flagstaff (AZ) et entreprit d'abord l'étude des fantomatiques canaux martiens... canaux dont l'existence discutée fut formellement démentie par d'excellentes observations d'Eugène Antoniadi dans la grande lunette de l'observatoire de Meudon, le 20 septembre 1909⁽¹⁵⁾, et des photographies obtenues la même année par Fernand Baldet et Aymar de La Baume Pluvinel au pic du Midi (que Lowell avait visité et admiré en 1903 !). En conséquence, Lowell – qui découvrit tout de même un astéroïde au passage – changea d'objectif et s'inspira de la découverte de Neptune pour chercher une autre planète perturbatrice en utilisant les ressources de la photographie. Il mourut en 1916 sans l'avoir trouvée, mais son observatoire continua les recherches, et au début de 1930 Clyde W. Tombaugh identifia enfin cet « astre errant » tant attendu : il fut nommé Pluton (ça tombe bien, les deux premières lettres du nom sont les initiales de P. Lowell !). Son éclat est plusieurs milliers de fois plus faibles que celui d'Uranus, dernière planète découverte visuellement. Avec de la persévérance et de la technique, avait-on découvert une cinquième planète géante, perturbant le système solaire externe ? En fait non, car les données de départ sur les irrégularités des mouvements d'Uranus et Neptune étaient mal interprétées (par la mauvaise connaissance de leurs masses). Pluton était certes le neuvième plus gros astre tournant autour du Soleil, mais avec un diamètre des deux tiers de celui de notre Lune seulement (soit un peu moins de 2400 km), et une masse presque six fois plus petite que celle-ci ! Cela n'empêcha pas Pluton de prendre la neuvième place dans la famille des planètes astronomiques et astrologiques, à la grande fierté des Étatsuniens qui avaient ainsi « leur » planète !

Mais à partir de 1992, les découverts de nombreux objets trans-neptuniens de dimensions et masses comparables à celles de Pluton ont conduit l'Union astronomique internationale (UAI) à adopter en 2006 une nouvelle classification des corps en orbite autour du Soleil, et à rétrograder de fait Pluton au rang de « planète naine »^{(16), (17)} !

(14) Observation de (1) Cérès par Piazzi le 1^{er} janvier 1801, premier jour de ce siècle si fécond !

(15) Antoniadi télégraphia avec humour à Lowell : « *Lunette de Meudon trop puissante pour montrer les canaux* » !

(16) L'Union astronomique internationale, dont le secrétariat est situé à l'Institut d'astrophysique de Paris, est l'organisme habilité à nommer les corps célestes.

(17) https://www.iau.org/static/resolutions/Resolution_GA26-5-6_French.pdf

2.2. Phénomènes remarquables en 2020

2.2.1. Un jour de plus

Le 29 février bien sûr, puisque 2020 est une année « bissextile », qui compte 366 jours.

Si le temps s'y prête, environ une heure et demie avant le lever du Soleil, on pourra ce jour-là admirer Mars, Jupiter et Saturne alignés au-dessus de l'horizon Sud-Est, sur une vingtaine de degrés, soit une main bien écartée.

Cette date particulière est aussi l'occasion de résumer l'évolution de notre calendrier : l'alternance jour-nuit due à la rotation de la Terre s'impose pour rythmer la vie quotidienne (c'est d'ailleurs le sens du mot !) ; ensuite, nos ancêtres purent s'appuyer sur les phases et cycles lunaires pour définir la semaine et le mois ; à plus grande échelle, les définitions des saisons dépendent fortement des zones climatiques, mais l'année solaire s'impose à la plupart des peuples. Comment la définir précisément ?

La lunaison valant à peu près 29 jours et demi, on peut définir des mois de 29 et 30 jours, et une année lunaire de 12 mois... soit 354 ou 355 jours, ce qui ne fait pas le compte pour être en phase avec le Soleil ! Cet écart, s'il n'est pas corrigé, provoque une dérive notable d'une année à l'autre, comme l'illustre le calendrier lunaire musulman.

Le problème de synchronisation des calendriers lunaires et solaires est apparu avec le développement de civilisations stables, utilisant écriture et calcul, et cherchant à structurer le cours du temps en tenant compte des saisons conditionnant les pratiques agricoles (Mésopotamie, Égypte). Dans cette situation, un calendrier solaire est nécessaire, mais la difficulté de sa mise en place est de trouver comment approcher la durée de la révolution de la Terre autour du Soleil (l'année tropique) : 365,2422 jours. Si l'on privilégie la cohérence astronomique à la stricte logique arithmétique, il faut accepter d'insérer de temps en temps des jours supplémentaires pour approcher – en moyenne – cette durée.

Le premier calendrier solaire fut sans doute le calendrier égyptien : 12 mois de 30 jours plus cinq jours dits « épagomènes » pour une année de 365 jours. À long terme, l'écart de 0,2422 jour avait des conséquences évidentes, puisqu'il conduisait en gros à un jour d'avance tous les quatre ans, un mois tous les 120 ans... Au bout de 740 ans, l'année commençait donc avec six mois d'avance sur le moment prévu (le lever héliaque de Sirius, aux alentours du solstice d'été)... Les Égyptiens s'en sont pourtant accommodés pendant quelque 4500 ans !

De leur côté, les Romains utilisaient un calendrier de 11 mois de 29 ou 31 jours, un mois de 28 jours (février) et un mois intercalaire, d'abord tous les quatre ans, avec en plus des jours additionnels, puis tous les deux ans, le nombre de jours de février servant de variable d'ajustement... ce n'était pas simple ! L'année moyenne s'établissait à

366,25 jours, avec des règles correctives fluctuantes au gré des manœuvres politiques... En 46 avant notre ère, Jules César, conseillé par l'astronome Sosigène d'Alexandrie, fixa le calendrier qui porte son nom : des mois de durées fixes, formant une année de 365 jours, et un jour de plus tous les quatre ans pour une durée moyenne de 365,25 jours. Ce jour était obtenu en doublant le sixième jour précédant les Calendes de Mars, d'où son nom de *bis-septe* qui a donné bien sûr le qualificatif bissextile.

Le remède était bon, et le petit excès (un peu plus de onze minutes) ne se manifestait qu'à raison de trois jours de retard tous les quatre siècles. C'était encore trop, au XVI^e siècle l'équinoxe de printemps (lié à la date de Pâques) arrivait le 10 mars au lieu du 21, et le 24 février 1582, le pape Grégoire XIII proclama la mise en place d'un ajustement : le lendemain du jeudi 4 octobre de cette année serait le vendredi 15, et les années correspondant à un nombre entier de siècles ne seraient bissextiles que pour un nombre de siècles multiple de quatre : ainsi 1600 et 2000 furent bissextiles, mais pas 1700, 1800, ni 1900.

La durée moyenne de l'année grégorienne étant de $365 + 97/400$ soit 365,2425, le décalage n'est plus que de vingt-six secondes par an, soit un jour de retard au bout de 3333 ans... de quoi voir venir⁽¹⁸⁾ !

Cette réforme papale ne fut pas acceptée partout, c'est ainsi que Shakespeare et Cervantes sont morts à la même date (23 avril 1616), mais pas le même jour, que le grand Newton est né le 25 décembre 1642 ou le 4 janvier 1643, et que les Soviétiques ayant imposé le calendrier grégorien à la Russie devaient du coup commémorer « la Révolution d'Octobre » le 7 novembre⁽¹⁹⁾.

Terminons par un clin d'œil à la famille Herschel décidément à l'honneur cette année : c'est Sir John qui introduisit en astronomie l'usage des « jours juliens », un système de numérotation des jours⁽²⁰⁾ dont l'origine est fixée au 1^{er} janvier 4713 avant notre ère, à douze heures au méridien de Greenwich.

2.2.2. Les conjonctions entre planètes ou planètes-étoiles

Les planètes se déplaçant le long de l'écliptique avec des périodes de révolution différentes, leurs positions apparentes sur le fond du ciel peuvent occasionnellement se rapprocher (conjonction), ce qui peut être intéressant à observer et pourquoi pas à

(18) On pourrait certes affiner facilement l'ajustement, en décrétant que les multiples de 3000 ne seront pas bissextiles, pour arriver à un jour de retard au bout de 30 000 ans... mais notre civilisation atteindra-t-elle seulement l'an 3000 ?

(19) Le calendrier julien est toujours utilisé par des églises orthodoxes (dont celle de Russie), et quelques pays utilisent encore d'autres calendriers : Afghanistan, Iran, Éthiopie, Népal, Viêt Nam...

(20) Mis au point par l'érudite français Joseph Juste Scaliger (1540-1609).

photographier. Les heures sont données pour Paris en heure locale. Seuls sont mentionnés les rapprochements concernant les planètes visibles à l'œil nu et se produisant à plus de 10° du Soleil.

Mars-Antarès les 20-21 janvier – À l'aube vers le Sud-Est

Pourquoi présenter ici le rapprochement d'une planète et d'une étoile, en l'occurrence Alpha Scorpii, alias Antarès ? C'est qu'en grec Mars est Arès, et que « Antarès » signifie « comme Arès », ou « la rivale d'Arès ». Cette étoile apparaît en effet d'un rouge voisin de celui de la planète ; pour ce qui est de l'éclat, la magnitude apparente d'Antarès varie entre 1 et 2, tandis que celle de Mars à l'opposition peut atteindre $-2,9$; elle est alors beaucoup plus brillante que sa rivale, mais ce n'est pas toujours le cas tant l'éclat perçu de la planète dépend de sa position relative par rapport à la Terre. Ainsi, aux dates évoquées, c'est Antarès qui l'emportera, et on pourra faire la comparaison, car ces deux astres seront proches dans le ciel, à environ 5° (le pouce tendu), et la Lune sera discrète avec un fin croissant (NL le 24). Comme la configuration Soleil-Terre-Mars évolue vers l'opposition (en octobre), l'éclat de Mars augmentera notablement dans les mois qui suivent, mais Antarès ne sera plus à côté pour permettre la comparaison... Détail amusant : Antarès est une supergéante rouge qui, si elle était à la place du Soleil, engloberait largement l'orbite de sa rivale !

Mars-Jupiter le 20 mars – À l'aube vers le Sud-Est

Depuis le début du mois, Jupiter et Saturne s'élèvent de plus en plus le matin au-dessus de l'horizon Sud-Est, tandis que Mars se rapproche d'elles rapidement ; cela commence par d'esthétiques alignements puis, le 18 et le 19, Mars sera très proche de Jupiter, avec un croissant de lune qui s'invite. Enfin à l'aube du vendredi 20, autour de 6h du matin, la Lune se sera éloignée, et les deux planètes seront distantes de moins de 1° ; à l'œil nu ce sera assez spectaculaire, l'éclat de Jupiter l'emportera largement, mais la différence de couleur sera cependant bien visible. Avec un petit instrument (des jumelles suffisent si l'on est bien stable), on aura dans le même champ : Mars, Jupiter et trois satellites galiléens (Europe étant caché derrière sa planète à ce moment-là). Pendant toute cette période, on pourra observer à droite des planètes la constellation zodiacale du Sagittaire, que la tradition associe à un centaure, mais qui se reconnaît plutôt à un astérisme en forme caractéristique de théière (*the teapot* pour les anglais) !

Mars-Saturne les 31 mars et 1^{er} avril – À l'aube, vers le Sud-Est

Après une dizaine de jours, c'est de Saturne que Mars se rapproche, mais l'observation (visuelle ou avec un petit instrument) nécessitera un bon site et une atmosphère propre et calme pour être gratifiante, car les deux planètes seront basses sur l'horizon : une dizaine de degrés, soit le poing fermé. Les deux astres sont moins brillants que Jupiter (à 6° à leur droite), mais on devrait bien percevoir la différence de teinte puisque Saturne présente un éclat jaune pâle.

Vénus-Pléiades le 3 avril – En début de soirée, à l'Ouest

Les Pléiades sont un joli amas ouvert d'étoiles jeunes, dans la constellation zodiacale du Taureau, et Vénus passe chaque année à proximité plus ou moins immédiate. Cette année, comme tous les huit ans, sa trajectoire vue depuis la Terre coupe carrément l'astérisme. Un joli spectacle !

Alignement Mars-Saturne-Jupiter les 9 et 10 avril – À l'aube, vers le Sud-Est

Loi des aires oblige, Mars est beaucoup plus véloce que Jupiter et Saturne. En voici l'illustration : il y a un mois, les trois planètes étaient alignées, de bas en haut et de gauche à droite, dans l'ordre Saturne-Jupiter-Mars ; maintenant, les positions relatives de Saturne et Jupiter n'ont guère changé, mais Mars est passé plus à l'Est, et, toujours sur une étendue d'une vingtaine de degrés (une main bien écartée), c'est elle qui est en bas à gauche.

Mercury-Vénus les 21-22 mai – Dans le crépuscule, Ouest-Nord-Ouest

Comme le montre le diagramme de visibilité, c'est le début d'une belle période de visibilité pour Mercure qui monte au-dessus de l'horizon, au contraire de Vénus qui redescend et va bientôt disparaître pour quelques semaines. Les deux planètes se croiseront pendant ces deux jours, à un peu plus d'un degré d'écart (largeur du petit doigt à bout de bras). À observer environ une heure après le coucher du Soleil, avant que les planètes soient noyées dans la basse atmosphère rarement limpide.

Vénus-Hyades (Aldébaran) le 12 juillet – Un peu avant le lever du Soleil, Est-Nord-Est

Après avoir disparu au crépuscule, Vénus revient à l'aube, et dans un site propice (horizon bien dégagé), on pourra l'admirer au plus près de l'étoile rouge Aldébaran, l'œil du Taureau, pratiquement à la verticale des Pléiades qu'elle traversait trois mois plus tôt. En fait, Vénus sera visible dans « la gueule du Taureau » environ du 5 au 20 juillet, de plus en plus haut dans le ciel.

Vénus-Amas de la Crèche du 10 au 17 septembre – 2h avant le lever du Soleil, Est-Nord-Est

L'amas de la Crèche est un jeune amas ouvert, à la limite de visibilité à l'œil nu, c'est donc un bon test de la qualité du ciel. Vénus va passer à quelques degrés (minimum 2,5° le 12) ; le 16 et le 17, la planète sera pratiquement à la verticale sous l'amas, et la Lune ne sera plus gênante.

Vénus-Régulus le 3 octobre – 2h avant le lever du Soleil, à l'Est

Ce matin, le Lion se dresse fièrement sur l'horizon Est, et la toujours brillante Vénus croise son étoile principale, Régulus, à 0,2°.

Jupiter-Saturne autour du 21 décembre – Après le coucher du Soleil, au Sud-Ouest

La conjonction de l'année ! Entre le 19 et le 23, il y aura moins de $0,3^\circ$ d'écart entre ces deux planètes majeures, et le 21, $1/10^\circ$ de degré seulement ! Elles peuvent être admirées dès que le ciel s'est suffisamment assombri, vers 18h, à une dizaine de degrés au-dessus de l'horizon. Elles descendent au fur et à mesure que le ciel s'assombrit, pour un spectacle qui devrait être splendide, à l'œil nu, mais aussi dans un instrument grossissant quelques dizaines de fois, pour observer les bandes nuageuses de Jupiter et ses satellites galiléens, les anneaux de Saturne, et son fascinant satellite Titan... À ne pas manquer, car pour la prochaine fois il faudra attendre mars 2080 !

2.2.3. Les rapprochements Lune-planète

En raison de son déplacement très rapide (un tour en 27,32 jours), la Lune peut être amenée à « croiser » les planètes, ce qui peut faciliter leur repérage. Si elle est trop « grosse », elle gêne par sa luminosité les observations des autres planètes, mais si elle est sous forme d'un fin croissant, elle peut participer à d'esthétiques compositions, avec l'intérêt supplémentaire de la « lumière cendrée », la partie sombre de la Lune révélée par la lumière du clair de Terre sur Séléné.

Dans ce domaine, le fin du fin consiste en l'observation d'une « occultation », c'est-à-dire le passage de la Lune, en perspective, devant la planète. Cela se produira cette année :

Occultation de Vénus le 19 juin – de 9h30 à 10h30 environ, au Sud-Est

Une fois n'est pas coutume, ce sera une observation diurne, possible à l'œil nu, mais plus facile avec des jumelles sur pied (un trépied photo suffit). En effet, le croissant lunaire sera fin donc peu visible dans le ciel clair, et il est également difficile de repérer Vénus en plein jour ; pourtant, si on regarde exactement où il faut, on la voit ! Le « truc », c'est de la viser aux jumelles lorsqu'elle est encore bien visible au petit matin, puis de changer régulièrement l'orientation des jumelles pour la maintenir dans le champ. Le phénomène se produira à une bonne hauteur (environ 45°) et suffisamment loin du Soleil pour éviter *a priori* de le viser par inadvertance, mais il sera plus sûr (et plus confortable) de se placer à l'ombre pour supprimer tout risque.

Voici quelques autres rapprochements intéressants à noter pour l'année 2020. Le matin, il s'agit de la « vieille lune », un fin croissant qui se couche quand le Soleil se lève, les jours précédant la nouvelle ; le soir, il s'agit de la « jeune lune », fin croissant (dans l'autre sens !) suivant la nouvelle lune. Dans les deux cas, on observera que la Terre bien éclairée projette sur son satellite une belle lumière cendrée.

- ◆ 20/21 janvier (matin) : croissant lunaire en triangle avec Mars et Antarès (cf. *supra*) ;
- ◆ 23 janvier : une heure avant le lever du Soleil, avec un bon ciel et un horizon Sud-Est très dégagé : la Lune « mourante » à 3° de Jupiter, mais très basse sur l'horizon ;

- ◆ du 26 au 28 janvier (soir), le croissant de la Lune « renaissante » monte vers Vénus ; avec de bonnes conditions, on pourra détecter Mercure au ras de l'horizon ;
- ◆ 18 février (soir) : la Lune « vieillissante » retrouve Mars dont l'éclat a crû, mais qui s'est éloignée ; sous les deux astres éloignés de quelques degrés, le Sagittaire (la théière !) émerge des brumes de l'horizon ;
- ◆ 19/20 février (soir) : comme le 23 janvier, mais Jupiter a progressé et sera plus facilement observable ; le défi cette fois sera de repérer Saturne qui « décolle » un peu plus à l'Est ;
- ◆ 27 février (matin) : jeune lune proche de Vénus, pendant plusieurs heures après le coucher du Soleil, entre deux constellations « aquatiques » peu spectaculaires : Poissons (Pisces) et Baleine (Cetus) ;
- ◆ 18 mars (matin) et dans une moindre mesure le 19 : joli groupement avec Mars et Jupiter très proches et Saturne un peu à la traîne ;
- ◆ 15 avril (matin) : le dernier quartier forme avec Jupiter et Saturne un triangle immanquable qui devrait être intéressant à observer aux jumelles, pour les satellites joviens ;
- ◆ 16 avril (matin) : le dernier quartier a été un peu creusé et a rattrapé Mars dans le Capricorne ;
- ◆ 25/26 avril (soir) : le 25, la Lune « renaît » entre Aldébaran et les Pléiades, à l'aplomb de Vénus ; le lendemain, elle croisera celle-ci en montant entre les cornes du Taureau ;
- ◆ 12-15 mai, *bis repetita* (par rapport au mois précédent) : la Lune (cette fois gibbeuse) croise Jupiter et Saturne le 12 et le 13, puis Mars le 15 ;
- ◆ 24 mai (soir) : un très fin croissant dans le crépuscule, avec Mercure et Vénus à proximité ;
- ◆ 8/9 juin (soir) : Jupiter, Saturne, et une grosse lune commençant sa décroissance éclaireront vivement au Sud-Est ;
- ◆ 19 juin (matin) : environ une heure avant le Soleil, la vieille lune se lève, suivie de près par Vénus ; les deux astres montent dans le ciel qui s'éclaircit rapidement, en se rapprochant... jusqu'à l'occultation présentée ci-avant !
- ◆ 5/6 juillet (nuit) : la Lune pratiquement pleine (PL le 5) formera avec Jupiter et Saturne un triangle des plus lumineux qui s'élèvera au Sud-Est deux heures après le coucher du Soleil ;
- ◆ 12 juillet (matin) : la Lune au dernier quartier se rapproche d'une planète Mars de plus en plus brillante ; à repérer sans problème, même en ville, à une trentaine de degrés au-dessus de l'horizon, deux heures avant le lever du Soleil (en cette saison, ça fait tôt !) ;
- ◆ 16/18 juillet (matin) : là encore il faudra se lever tôt pour admirer la Lune descendant (et décroissant) dans le Taureau, où elle retrouve Vénus qui rend visite à Aldébaran ;
- ◆ 19 juillet (matin) : c'est la toute fin de cette lunaison (NL le 20) ; avec un bon ciel

et un horizon dégagé, le fin croissant (direction Est-Nord-Est) peut aider à repérer Mercure, un plus bas et à droite ; à environ 5 h 15, on pourra, pratiquement à l'opposé (Sud-Ouest), observer le coucher de Jupiter et Saturne ; Vénus quant à elle observera ce ballet d'assez haut à l'Est ; ce sera donc l'occasion de voir dans le même ciel les cinq planètes visibles à l'œil nu (on ne compte pas Uranus), ce qui n'est pas si fréquent !

- ◆ 1^{er} et 2 août (soir) : la Lune pratiquement pleine (PL le 3) se lèvera en compagnie de Jupiter et Saturne, qui auront fort à faire pour soutenir l'éclat de Séléné ! Avec un site bien dégagé, on profitera en « fond d'écran » de la Ceinture de Vénus, cette bande délicatement rosée au-dessus de l'ombre de la Terre ;
- ◆ 8 août (soir) et 9 août (matin) : deux observations intéressantes à comparer ; d'abord, vers minuit, le lever à l'Est de Mars et de la lune gibbeuse ; les deux astres sont alors séparés d'environ 5° (le pouce tendu) ; quelques heures plus tard en fin de nuit (avant 6 h), on pourra les observer presque beaucoup plus haut dans le ciel et surtout deux fois plus proches, ce qui illustre bien le rapide mouvement apparent de la Lune devant la voûte céleste, d'environ 13° par heure ;
- ◆ 15/16 août (matin) : deux heures avant le lever du Soleil, le croissant de la vieille lune et Vénus se croiseront au-dessus de l'horizon Est, entre la magnifique constellation d'Orion (côté Sud) et les Dioscures Castor et Pollux ; peu avant 6 h on surveillera à l'aplomb de Vénus le lever de Sirius, l'étoile associée à la déesse Sothis des anciens Égyptiens ;
- ◆ 28/29 août (soir) : pour la deuxième fois dans le mois civil, peu avant la pleine lune (le 2 septembre), Séléné bien bossue croise Jupiter et Saturne au-dessus de l'horizon Sud (juste à côté du « teapot ») ;
- ◆ 6 septembre (matin) : comme avec Vénus un mois plus tôt, on pourra voir au cours de la nuit du 5 au 6 la lune gibbeuse se rapprocher de Mars, pour la frôler à 0,1 degré en début de matinée ; à suivre à l'œil nu en fin de nuit (lever du Soleil à 7 h 30 à Paris), puis aux jumelles dans le ciel bleu du jour commençant ;
- ◆ 14 septembre (matin) : Vénus en dessous, le croissant lunaire au-dessus, encadreront l'amas de la Crèche au-dessus de l'horizon Est, vers 5 h ; le lendemain, la Lune aura filé se jeter dans les pattes du Lion !
- ◆ 25 septembre (soir) : encore un rapprochement de la Lune, alors gibbeuse croissante, avec Jupiter et Saturne, au Sud ;
- ◆ 3 octobre (matin) : la Lune encore pratiquement pleine (PL le 1^{er}) croise Mars, qui se rapproche à grands pas de son opposition (le 13) et est maintenant plus brillante que Jupiter !
- ◆ 13/14 octobre (matin) : vers 6 h, à l'Est, Vénus et le croissant lunaire dans les pattes du Lion...
- ◆ 22/23 octobre (soir) : la Lune au premier quartier sera à nouveau proche de Jupiter

et Saturne, mais moins éblouissante que les mois précédents ;

- ◆ 29 octobre au coucher du Soleil : la Lune et Mars se lèvent à l'Est dans un ciel qui s'assombrit progressivement ; encore une occasion d'admirer la Ceinture de Vénus ;
- ◆ 13/14 novembre (matin) : le croissant lunaire descendant croise Vénus, proche de Spica (« l'Épi de la Vierge ») ; avec un horizon dégagé, on apercevra en dessous Mercure bien brillante ;
- ◆ 19 novembre (soir) : entre 18 h et 20 h 30, toujours le brillant rendez-vous Lune-Jupiter-Saturne, avec cette fois un croissant lunaire relativement discret, laissant la vedette aux planètes qui se sont bien rapprochées ; on aura une pensée pour Pluton, invisible à $1,5^\circ$ (3 diamètres lunaires), « à 5 h » par rapport à Jupiter ;
- ◆ 25 au 26 novembre (nuit) : la lune gibbeuse, levée vers 15 h 30, traversera le ciel nocturne en compagnie de Mars, qui bien qu'elle s'éloigne rapidement de son opposition est encore très brillante ; coucher commun vers 3 h du matin ;
- ◆ 12/13 décembre (matin) : Vénus, qui se rapproche progressivement du Soleil depuis fin août, est maintenant assez basse sur l'horizon, et son rapprochement avec la lune finissante est le dernier avant le mois de mai 2021, il faut donc en profiter à l'aube au Sud-Est ;
- ◆ 16/17 décembre (crépuscule) : dernier rendez-vous de l'année entre la Lune et le couple Jupiter-Saturne ; le croissant de la toute jeune lune ne fera pas d'ombre aux deux planètes qui sont maintenant très proches, à quelques jours seulement du prometteur rapprochement du 21 évoqué précédemment ;
- ◆ 23 au 24 décembre (nuit) : comme le mois précédent, la lune gibbeuse voyage en compagnie de Mars, elles seront visibles d'environ 18 h à 2 h du matin.

2.2.4. *Rétrogradations*

Lorsqu'on fait abstraction de la rotation propre de la Terre, en regardant le ciel à intervalle d'un jour sidéral, on perçoit le mouvement apparent des astres proches devant les étoiles fixes. Dans le cas des autres planètes du système solaire, ce mouvement apparent résulte de la combinaison de leur mouvement orbital et de celui de notre planète, d'où nous les observons.

Il en résulte qu'à certaines périodes, les planètes peuvent présenter un comportement rétrograde, c'est-à-dire reculer par rapport à leur mouvement apparent habituel sur le fond d'étoiles ; les orbites n'étant pas exactement coplanaires, la trajectoire de la planète concernée décrit alors une boucle, comme illustré figure 9 (cf. page ci-contre). Des animations illustratives pour les planètes inférieures et supérieures sont proposées sur la page <https://fr.wikipedia.org/wiki/Rétrogradation> .

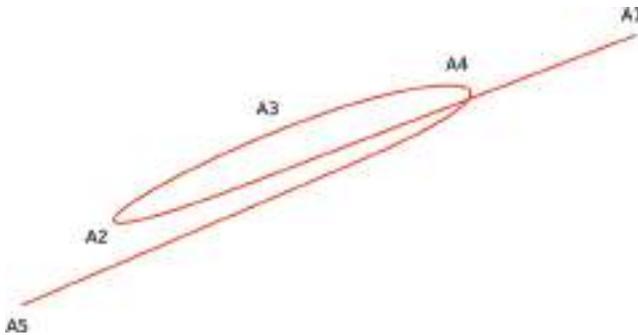


Figure 9 - Par W!B : pour Wikipédia, domaine public.

Il est curieux de voir comme ce phénomène purement cinématique est pris au sérieux et doctement interprété par les astrologues ! À les en croire, Mercure/Hermès étant le dieu messager, il faudrait s'attendre à des coupures de téléphone lors des phases de rétrogradation de la planète du même nom... Faut-il en rire ou en pleurer ?

Quoi qu'il en soit, voici les périodes de rétrogradation des planètes les plus facilement observables en 2020 : Vénus du 13 mai au 25 juin ; Mars du 9 septembre au 14 novembre ; Jupiter du 14 mai au 13 septembre ; Saturne du 11 mai au 29 septembre.

Ces phases de rétrogradation peuvent être mises en évidence à l'aide d'un logiciel ou simplement d'une maquette montrant les mouvements orbitaux des planètes : un planétaire.

3. EXPLOITATION PÉDAGOGIQUE : RÉALISATION DE PLANÉAIRES

Un planétaire, ou *orrery* du nom de son dédicataire Charles Boyle, comte d'Orrery (1674-1731) est un système permettant de visualiser le mouvement des planètes autour du Soleil. Il peut être animé par un mécanisme ou plus modestement par déplacement manuel.

Le système solaire intérieur (avant la première ceinture d'astéroïdes) peut facilement être représenté à l'échelle ; la prise en compte des planètes extérieures nécessitera beau-



Figure 10 - Montre Van Cleef & Arpels « Midnight Planetarium » (221 k€)

coup plus de place si on veut respecter les tailles respectives des orbites, surtout pour Uranus et Neptune !

Plus abordable (!) que la montre de la figure 10 (cf. page précédente) et néanmoins élégante, une réalisation sur Plexiglas a été présentée dans l'article « Le ciel en 2018 » [1].

Pour repérer les planètes dans leur mouvement de révolution, on indique leur longitude héliocentrique L dans le plan de l'écliptique selon la figure 11, l'origine angulaire étant prise à la position qu'occupe la Terre sur son orbite lors de l'équinoxe d'automne (22 septembre 2020 à 13 h 31 UTC). À cette date, le sens Soleil-Terre sur la droite portant ces deux corps indique un point du ciel profond que l'on nomme *point vernal* (point « γ », dans la constellation des Poissons). Ce point répond aussi à une autre définition, celle qui justifie la dénomination : c'est le point devant lequel passe le Soleil lors de l'équinoxe de printemps (20 mars 2020 à 03 h 50 UTC), si l'on prend cette fois la Terre comme solide de référence.

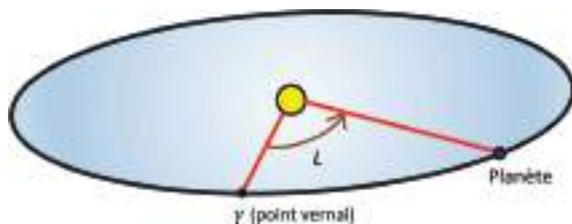


Figure 11 - Longitude héliocentrique écliptique.

Les trois premières lignes du tableau 2 (cf. permettent de réaliser une maquette approximative dans lesquelles les orbites sont coplanaires, circulaires, centrées sur le Soleil. Dans ces conditions, les mouvements sont uniformes; il suffit alors de connaître une position initiale (première ligne du tableau 3, page ci-contre) et la durée de l'année pour en déduire n'importe quelle position par une « règle de trois ».

Planètes	Mercure	Vénus	Terre	Mars	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune
Demi grand axe (ua)	0,39	0,72	1,00	1,52	5,20	9,54	19,2	30,1
Période de révolution	88 (j)	225 (j)	365 (j)	687 (j) 1,9 (a)	11,9 (a)	29,5 (a)	84 (a)	165 (a)
Excentricité	0,206	0,0068	0,017	0,093	0,048	0,054	0,047	0,0086
Distance entre les foyers (ua)	0,16	0,01	0,03	0,28	0,50	1,03	1,80	0,52
Direction du second foyer (°)	257	312	283	156	195	272	350	225

Tableau 2 - Caractéristiques des orbites.

Pour plus de réalisme, les trois lignes suivantes du tableau 2 permettent de placer les deux foyers des orbites elliptiques et de tracer celles-ci par la méthode du jardinier ;

Planètes	Mercure	Vénus	Terre	Mars	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune
1 ^{er} janvier 2020	262,5	4,4	100	214	276,0	292,5	35,3	348,0
1 ^{er} février 2020	12	52	132	229,3	278,5	293,5	35,7	348,2
1 ^{er} mars 2020	174,5	101	161	244,2	281,0	294,3	36,0	348,4
1 ^{er} avril 2020	271	151	192	261	283,5	295,3	36,3	348,6
1 ^{er} mai 2020	22,5	200	221	278,1	286,0	296,2	36,6	348,7
1 ^{er} juin 2020	190,5	249	251	296,7	288,5	297,1	37,0	348,9
1 ^{er} juillet 2020	279,5	294	280	315,3	291,0	298,0	37,3	349,1
1 ^{er} août 2020	45,5	346	309	334,9	294,0	299,0	37,7	349,3
1 ^{er} septembre 2020	204,5	35	339	354,5	296,5	299,9	38,0	349,5
1 ^{er} octobre 2020	291	83	8,5	13,2	299,0	300,8	38,3	349,7
1 ^{er} novembre 2020	70,5	134	39	31,8	301,5	301,8	38,7	349,8
1 ^{er} décembre 2020	214,5	183	69	49,1	304,0	302,7	39,0	350,0
1 ^{er} janvier 2021	304	232	101	66	307,0	303,7	39,4	350,2

Tableau 3 - Longitudes héliocentriques (en °) des huit planètes du système solaire en 2020.

cela permettra de visualiser en particulier pourquoi les oppositions de Mars n'ont pas toutes le même intérêt. Dans ce cas, le mouvement n'étant plus circulaire uniforme, on se reportera aux informations livrées dans les tableaux 3 et 4 (page ci-après). Ce dernier tableau, plus précis pour les planètes se déplaçant le plus rapidement, indique également les latitudes par rapport à l'écliptique, informations qu'on n'utilisera pas pour un planétaire plan, mais qui montrent la plus grande inclinaison de l'orbite de Mercure par comparaison avec celles des autres planètes telluriques.

Le tableau 5 (cf. pages ci-après) permet si on le souhaite de faire figurer en périphérie du planétaire les constellations zodiacales devant lesquelles passe le Soleil – et en général les planètes – vus depuis la Terre.

4. LECTURE DE L'HEURE LÉGALE SUR UN CADRAN SOLAIRE

L'article « Le ciel en 2018 » [1] proposait la réalisation d'un cadran solaire équatorial, on pourra le retrouver avec profit. Pour en savoir plus sur la réalisation de cadrans solaires, on se reportera au livre de Denis Savoie (ancien président de la Commission des cadrans solaires de la Société astronomique de France) édité chez Belin.

Un cadran solaire indique une heure locale : ceci est dû à la rotation de la Terre autour de l'axe des pôles, à raison de 15° par heure. La première correction, constante en un lieu donné, est donc la *correction en longitude* pour tenir compte de la rotation

Année 2020		Mercure		Vénus		Terre		Mars	
Jours	Mois	Lat.°	Long.°	Lat.°	Long.°	Lat.°	Long.°	Lat.°	Long.°
1	Janvier	-3,9	262,5	-3,2	4,4	0	100,0	0,5	214,1
11		-6,2	291,0	-2,8	20,4	0	110,2	0,4	219,0
21		-7,0	324,1	-2,2	36,3	0	120,4	0,2	223,9
31		-4,7	6,9	-1,4	52,4	0	130,6	0,0	228,8
10	Février	1,8	63,7	-0,5	68,4	0	140,7	-0,1	233,9
20		6,8	125,2	0,4	84,6	0	150,8	-0,3	239,0
1	Mars	5,7	174,4	1,4	100,7	0	160,9	-0,5	244,2
11		2,2	210,8	2,2	116,9	0	170,9	-0,6	249,6
21		-1,4	240,5	2,8	133,2	0	180,8	-0,8	255,0
31		-4,5	268,1	3,2	149,4	0	190,7	-0,9	260,5
10	Avril	-6,5	297,2	3,4	165,7	0	200,6	-1,1	266,1
20		-6,8	331,8	3,3	181,9	0	210,4	-1,2	271,8
30		-3,7	17,3	2,9	198,0	0	220,1	-1,4	277,6
10	Mai	3,3	76,4	2,3	214,1	0	229,8	-1,5	283,4
20		7,0	136,5	1,5	230,1	0	239,4	-1,6	289,4
30		5,0	182,6	0,6	246,1	0	249,1	-1,7	295,5
9	Juin	1,4	217,2	-0,3	261,9	0	258,0	-1,8	301,6
19		-2,1	246,1	-1,2	277,8	0	268,2	-1,8	307,8
29		-5,0	273,7	-2,0	293,6	0	277,7	-1,8	314,0
9	Juillet	-6,8	303,6	-2,7	309,4	0	287,3	-1,8	320,3
19		-6,5	340,0	-3,2	325,2	0	296,8	-1,8	326,6
29		-2,4	28,3	-3,4	341,1	0	306,4	-1,8	333,0
8	Août	4,6	89,3	-3,3	357,0	0	315,9	-1,7	339,3
18		6,9	147,1	-3,1	12,9	0	325,5	-1,7	345,7
28		4,3	190,4	-2,5	28,9	0	335,2	-1,6	352,0
7	Septembre	0,6	223,4	-1,8	44,8	0	344,8	-1,4	358,3
17		-2,8	251,7	-0,9	60,9	0	354,6	-1,3	4,1
27		-5,4	279,5	0,0	77,0	0	4,3	-1,2	10,7
7	Octobre	-6,9	310,3	0,9	93,1	0	14,2	-1,0	16,8
17		-6,1	348,6	1,8	109,3	0	24,1	-0,8	22,9
27		-1,1	39,9	2,5	125,5	0	34,0	-0,7	28,9
6	Novembre	5,6	100,9	3,1	141,8	0	44,0	-0,5	34,7
16		6,6	157,0	3,4	158,0	0	54,1	-0,3	40,5
26		3,6	197,7	3,4	174,3	0	64,2	-0,1	46,2
6	Décembre	-0,1	229,3	3,1	190,4	0	74,3	0,1	51,8
16		-3,4	257,3	2,6	206,6	0	84,5	0,2	57,4
26		-5,0	285,4	1,9	22,6	0	94,7	0,4	62,8
5		Janvier	-7,0	317,3	1,1	238,6	0	104,9	0,6
15	-5,4		357,9	0,1	254,5	0	115,1	0,7	73,4

Tableau 4 - Positions héliocentriques (en °) des quatre planètes intérieures, tous les dix jours.

Constellations	Début (°)	Fin (°)	Étendue angulaire (°)
Poissons	- 8	27	35
Bélier	27	52,5	25,5
Taureau	52,5	90	37,5
Gémeaux	90	120	30
Cancer	120	141	21
Lion	141	175	34
Vierge	175	215	40
Balance	215	240	25
Scorpion	240	246,5	6,5
Ophiuchus	246,5	265	18,5
Sagittaire	265	302,5	37,5
Capricorne	302,5	330	27,5
Verseau	330	352	22

Tableau 5 - Constellations zodiacales.

propre de la Terre : en retranchant quatre minutes par degré de longitude Est ou en ajoutant quatre minutes par degré de longitude Ouest, on se ramène ainsi à l'heure du méridien de Greenwich, origine des longitudes.

À l'échelle de la France métropolitaine, cela correspond à un décalage (par rapport à Greenwich) de trente minutes d'avance en Alsace et de vingt minutes de retard à la pointe de la Bretagne. Cette différence de presque une heure d'une extrémité à l'autre du territoire ne posait pas de problèmes au temps des transports lents, mais le développement des chemins de fers a rendu nécessaire l'introduction à l'échelle nationale d'une heure commune moyenne : l'*heure légale*. À l'échelle internationale, cela se traduit par la délimitation de *fuseaux horaires*. De plus, les heures légales introduisent éventuellement un décalage saisonnier fixe : heure d'été, heure d'hiver. On remarque sur la figure 12 (cf. page ci-après) que les pays d'Europe de l'Ouest sont largement en avance sur l'heure solaire !

Pour la petite (?) histoire, on notera que l'appartenance de la France métropolitaine au fuseau « Greenwich + 1 h » résulte de l'occupation allemande⁽²¹⁾...

Enfin, pour une correction précise, il faut tenir compte du fait que cette heure légale correspond au *jour solaire moyen* de durée fixe (24 h soit 86 400 s), alors que le *jour solaire vrai* varie tout au long de l'année. Cette variation résulte de deux facteurs : l'ellip-

(21) https://fr.wikipedia.org/wiki/Heure_en_France

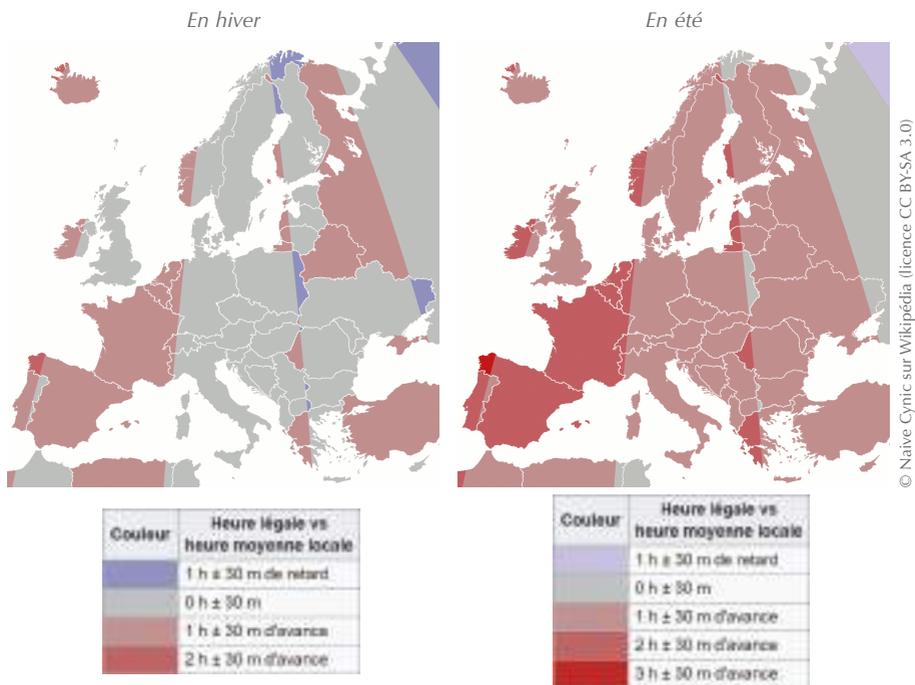


Figure 12 - Fuseaux horaires en Europe.

tivité de l'orbite terrestre (excentricité faible, mais non nulle : $e \approx 0,0167$) et l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre (obliquité : $23^{\circ}27'$ par rapport à la normale à son plan orbital). La correction de ces deux effets se fait par l'intermédiaire de *l'équation du temps*, illustrée

par la courbe de la figure 13 : les valeurs positives sont à ajouter à l'heure lue, et les valeurs négatives sont à soustraire. Le Soleil est « à l'heure » à mi-avril et mi-juin, de même que le 1^{er} septembre et pour Noël. Son

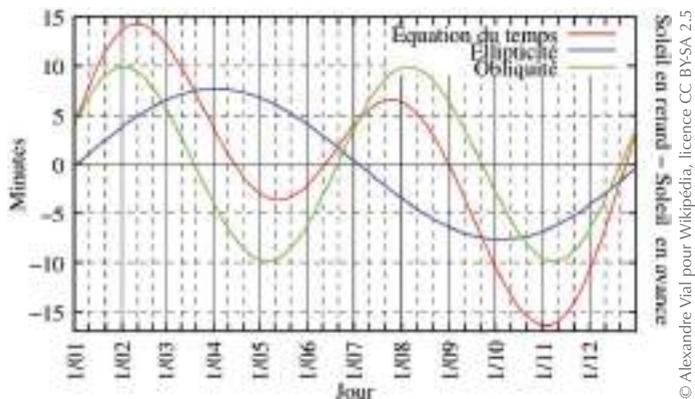


Figure 13 - L'équation du temps.

retard sur le temps moyen est maximal vers le 11 février (14 min 15 s), et son avance est maximale vers le 3 novembre (16 min 25 s). Signalons que la convention de signe (représenter « temps solaire moyen – temps solaire vrai » ou « temps solaire vrai – temps solaire moyen ») dépend du pays... c'est à savoir pour les touristes !

En récapitulant ces effets, on comprend qu'il faut corriger de la façon suivante la lecture faite sur un cadran donné pour en déduire l'heure légale (donnée par l'Observatoire de Paris au 3699) :

$$\begin{aligned} \text{Heure légale} &= \text{Heure solaire locale (donnée par le cadran)} \\ &+ \text{Correction de la longitude du lieu} + \text{Équation du temps} \\ &+ \text{Correction du fuseau horaire (+ 1h en France métropolitaine) + 1h en été} \end{aligned}$$

Certains (bien rares !) auront la chance de posséder une montre « à complication » telle la récente et magnifique *Astronomic* de François Paul Journe⁽²²⁾, une montre d'exception qui, parmi dix-huit fonctions dédiées à l'astronomie, indique sur son cadran inférieur l'avance ou le retard du Soleil sur l'heure moyenne (cf. figure 14), mais à un prix... astronomique bien sûr (le prototype en a été vendu aux enchères 1 800 000 CHF) ! Une autre approche, beaucoup plus économique, consiste à projeter sur le cadran solaire l'analemme, qui est la courbe « en 8 » tracée dans le ciel par les différentes positions du soleil relevées à une même heure et depuis un même lieu au cours de l'année (voir l'article Le ciel en 2019). Une fois cette courbe figurée sur un cadran solaire, l'utilisateur peut estimer la correction qu'il faut apporter à l'heure lue pour retrouver l'heure légale, mais cela n'a de sens que si le cadran est très soigneusement réalisé ! (cf. figure 15, page ci-après).



Figure 14 - Montre « à grande complication », le modèle *Astronomic* de François Paul Journe.

(22) <https://www.fpjourne.com/evenement/evenements/astronomic-souveraine>



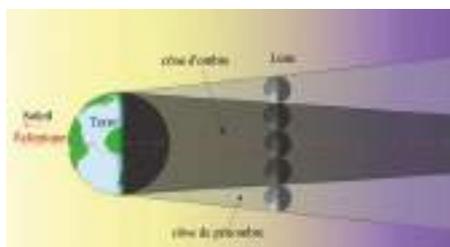
© Delere pour Wikipédia, licence CC BY-SA 3.0

Figure 15 - Cadran solaire vertical de l'observatoire de Camille Flammarion à Juvisy-sur-Orge (Essonne).

5. ÉCLIPSES

5.1. Éclipses de Lune

L'année 2020 sera bien peu propice à l'observation de ce phénomène : aucune éclipse totale, ni même partielle, seulement quatre éclipses par la pénombre (cf. figure 16).



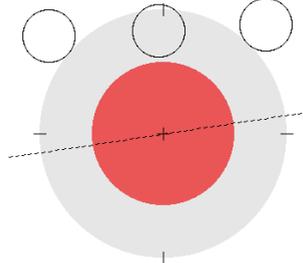
© IMCCE/Patrick Rocher

Figure 16 - Ombre et pénombre de la Terre.

Elles auront lieu le 10 janvier, le 5 juin, le 5 juillet et le 30 novembre, et seule la première sera observable en Europe, en début de soirée, avec un maximum à 19h10 UTC (soit une heure plus tard en France métropolitaine). La pleine lune, s'élevant au-dessus de l'horizon Est, sera à ce moment à 90 % dans la pénombre terrestre, et la différence de luminosité entre ses pôles devrait être nettement perceptible (cf. figure 17, page ci-contre).

Penumbral Saros 144

2020 Jan 10 19:11 TD



Thousand Year Canon of Lunar Eclipses
© Fred Espenak - <http://www.eclipsewise.com/>

Figure 17 - L'éclipse lunaire du 10 janvier 2020.

Pour les lecteurs d'outremer, l'éclipse du 5 juin sera visible (en longitude) de l'Afrique à l'Indonésie, celle du 5 juillet sur l'Atlantique, l'Amérique centrale, l'Est des USA et du Canada, celle du 30 novembre sur l'Ouest américain et le Pacifique.

Mais attention, ces éclipses seront d'une visibilité toute théorique, car le passage de la Lune dans la pénombre de la Terre sera partiel et ne provoquera sans doute pas un assombrissement suffisant pour la perception visuelle.

5.2. Éclipses de Soleil

Comme en 2019, nous aurons droit à une éclipse d'été et une d'hiver ! Le 21 juin d'abord, une éclipse annulaire, puis une totale le 14 décembre.



Figure 18 - Éclipses totale et annulaire.

Rappelons que des données précises sont accessibles sur les sites Internet de l'IMCCE (Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides) et de la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Mais autant profiter du gros travail de synthèse et de présentation – qui plus est en français – de Xavier Jubier sur le site <http://xjubier.free.fr/index.html> : « calculatrice solaire », cartes, données météorologiques, conseils d'observation...

L'éclipse annulaire du 21 juin sera très courte (38s maximum !), observable à Oman par exemple, ou depuis le plateau tibétain pour les voyageurs. Une telle éclipse,

moins spectaculaire qu'une totale, peut offrir cependant le spectacle d'un fin anneau, perlé de « grains de Baily », ces points lumineux qui apparaissent pendant quelques secondes, lorsque la lumière du Soleil éclipsé se faufile entre les montagnes du limbe lunaire. Un défi pour les spécialistes de la photo d'éclipse !

Six mois plus tard, en Argentine, l'éclipse totale du 14 décembre se présente bien ! Même si elle ne sera pas très longue (environ deux minutes de totalité), cela laisse tout de même le temps d'en profiter. De plus, elle atteindra son maximum en début d'après-midi, donc avec un soleil haut dans le ciel, et de bonnes probabilités de beau temps (cf. figure 19).

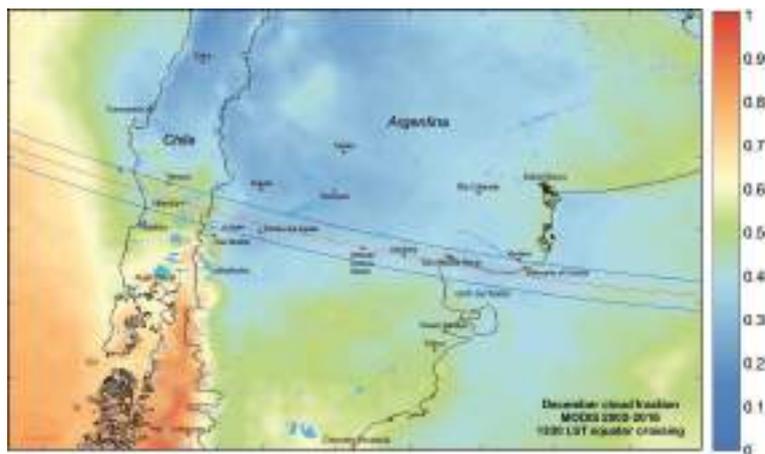


Figure 19 - Carte de la couverture nuageuse moyenne en décembre par Jay Anderson (NASA), publiée par Xavier Jubier.

Pour ceux qui le pourront, il y a de quoi faire un magnifique voyage astronomique en profitant de l'été austral, en complétant l'observation de l'éclipse par des visites d'observatoires au Chili !

BIBLIOGRAPHIE

- [1] J.-B. Spilmann et P. Simmonet, « Le ciel en 2018 », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 112, n° 1001, p. 377-395, février 2018.



Jean DERVIEUX

Professeur de physique, chimie

et « informatique pour tous » en classe de MPSI

Lycée Blaise Pascal

Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme)

Tab's'up Académie de Rennes

Troisième prix des lycées

par **Mathieu CHUTO**
Lycée Sainte-Thérèse - 29000 Quimper
chuto.mathieu@stetherese.net

DANS LE CADRE de l'aide personnalisée en classe de seconde un atelier Mendeleïev a été proposé aux élèves volontaires désirant participer au concours. C'est une première pour une majorité d'entre eux. La découverte du tableau de Mendeleïev pour certains et l'approfondissement des connaissances pour d'autres faisaient partie des objectifs, comme le travail en équipe. L'atelier a eu lieu sur six semaines tous les lundis de 16h 30 à 17h 25. Les élèves sont issus des huit classes de seconde du lycée et ils ne se connaissaient pas forcément. Après la présentation du concours, plusieurs idées sont ressorties et notamment celle d'un jeu.

1. DÉMARCHE DU PROJET

Jeu de rôle ou jeu de cartes ? Le choix n'a pas été simple et c'est sur le projet d'un *Time's Up* Mendeleïev que le groupe a décidé de travailler.

Le *Time's Up* est un jeu qui se joue en trois manches. Un joueur doit faire deviner à son équipe le maximum de mots inscrits sur des papiers, en un temps limité. La première manche est basée sur la capacité à faire découvrir le mot par la parole. Dans la deuxième manche, le mot doit être deviné par un seul mot, faisant appel à la mémorisation des réponses précédentes, et la troisième manche est une épreuve de mime. Ce jeu est une très bonne approche pédagogique pouvant être utilisée.

Les recherches ont été effectuées sur Internet par binômes. Des catégories de cartes ont été définies :

- ◆ personnalités ;
- ◆ élément chimique ;
- ◆ famille chimique ;
- ◆ configuration électronique ;
- ◆ constituant de l'atome.

Les tâches ont été réparties très rapidement. Trois à quatre élèves travaillaient sur chaque thème proposé. Deux élèves se sont rapidement proposées pour réaliser les

corrections et la collecte de différentes cartes. L'un des autres objectifs était de fournir un travail soigné et avec une mise en page uniformisée pour repérer les différentes catégories et avoir le plaisir d'apprendre. Les cartes sont toutefois différentes d'un jeu classique. Elles contiennent des informations afin de permettre aux joueurs d'essayer de faire découvrir le mot aux partenaires. C'est également l'un des objectifs du projet : apprendre, comprendre et retenir. La répétition lors des trois phases de jeu permet cet apprentissage tout en s'amusant.

2. PRODUCTIONS

Le jeu se présente sous la forme d'une recharge pour le jeu *Time's Up*. Les cartes reprennent la thématique du tableau périodique et du vocabulaire de l'atome. La recharge compte à ce jour quarante-trois cartes, mais elle pourrait être complétée facilement par l'ensemble des éléments chimiques, par d'autres personnalités. Il est possible d'adapter le jeu au niveau des élèves en ajoutant ou retirant certaines catégories.

2.1. Les cartes

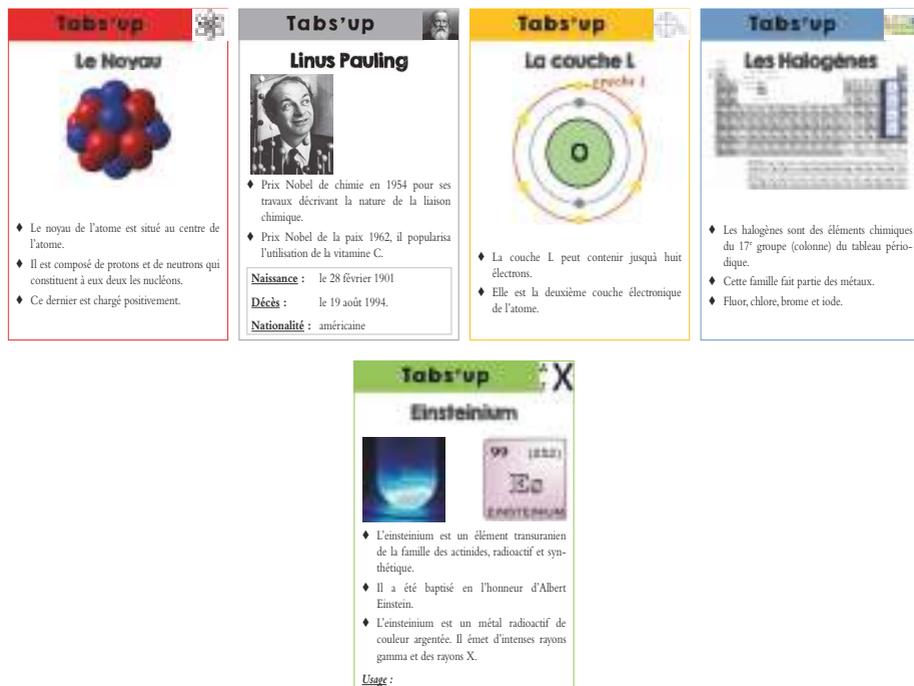


Figure 1 - Exemples de cartes réalisées par les élèves.

2.2. Les règles

Les règles sont identiques à celle du *Time's Up*. Elles ont cependant été retravaillées par trois élèves. Certains élèves ne connaissaient pas le jeu et donc ses règles.

CONCLUSION

Le concours a été l'occasion d'apprendre des choses nouvelles. Le travail en équipe a été productif et sérieux. Le groupe a montré une réelle motivation. Les cartes sont perfectibles, mais les informations ont été entièrement trouvées et synthétisées par le groupe. Ce travail nous a également permis d'appréhender une notion de cours sous la forme d'un jeu ce qui n'est pas forcément évident dans nos disciplines.

NETOGRAPHIE

- ◆ Wikipédia : <https://fr.wikipedia.org/wiki/>
- ◆ Futura Sciences : <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/>
- ◆ Time's Up : <http://www.timesup-party.com/times-up-party.php>

Compléments de l'article

Cet article comporte des compléments nommés :

- ◆ *Jeu de cartes Tabs'up.pdf*
- ◆ *Règles du jeu Tabs'up.pdf*

Ils sont disponibles sur le site de l'UdPPC sous la forme d'un fichier zippé 10200103.



Mathieu CHUTO
Professeur de physique-chimie
Lycée Sainte-Thérèse
Quimper (Finistère)

Jeu de cartes « ATOMOS »

Académie de Grenoble

Prix du « Serious game »

par Steve HIREL

Collège Stephen Hawking - 38080 L'Isle-d'Abeau

steve.hirel@ac-grenoble.fr

CET ARTICLE rend compte d'un travail réalisé par les élèves du Club sciences du collège Stephen Hawking, dans le cadre du concours « Mendeleïev 2019 », organisé par l'UdPPC. Entre janvier et avril 2019, les seize élèves impliqués dans ce projet ont mis au point et réalisé un jeu de cartes à jouer où chacun des cent dix-huit éléments est représenté par une carte aux capacités diverses.

1. PREMIÈRE SÉANCE

Lors de la première séance, les élèves ont décidé de faire un jeu de cartes à jouer type *Pokémon* ou *Magic*.



Figure 1

2. JUSQU'AUX VACANCES DE FÉVRIER

Dès la seconde séance, les élèves se sont répartis les tâches et ont désigné un « responsable du projet ». Chaque groupe a désigné un responsable de groupe : groupe

règle du jeu, groupe design, groupe recherche... Bien conscients du peu de temps dont ils disposaient (douze semaines), les élèves ont effectué une partie du travail chez eux tout en se concertant *via* un forum qu'ils ont créé sous la plateforme VoIP *Discord*.

Au bout d'un mois, plus aucune trace de la belle organisation ! Mais la trame du jeu commençait à prendre forme. Le format des cartes était décidé ainsi que ce qu'elles contiendraient.

Et les premières cartes apparaissent alors.



Figure 2



Figure 3

3. DES VACANCES DE FÉVRIER AUX VACANCES D'AVRIL

Le travail effectué par groupe s'est finalement avéré utile pour attribuer un rôle à certaines cartes. Voici ce qui a été décidé après bien des hésitations. Faut-il faire un groupe métal ? Faut-il perdre des électrons et faire des ions positifs ?

Les différents types de cartes	Explications des règles
<p style="text-align: center;"><i>Carte «gaz rare»</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Les gaz rares ne réagissent pas ou peu. ◆ Les gaz rares sont stables, car leur couche électronique externe est pleine et contient huit électrons. <i>C'est la règle de l'octet.</i> 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Si un des deux joueurs joue une carte « gaz rare », aucune attaque n'est possible durant ce tour. ◆ Puis le joueur qui a joué une carte « gaz rare » pioche autant de cartes que nécessaire pour avoir de nouveau huit cartes en main.
<p style="text-align: center;"><i>Carte «savant»</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Plusieurs éléments portent un nom en hommage à un ou une scientifique. <i>Exemple : Mendélévium en hommage à Dmitri Mendeleïev père de la classification périodique des éléments.</i> 	<div style="text-align: center;"></div> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Annule l'attaque et tous les coups spéciaux de l'adversaire. ◆ Puis dans son jeu, le joueur choisit la carte de son choix pour attaquer librement l'adversaire.
<p style="text-align: center;"><i>Carte «radioactive»</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Les éléments radioactifs sont instables. Ils se transforment spontanément en dégageant de l'énergie pour se transformer en des noyaux atomiques plus stables. ◆ En référence à la fission nucléaire où un élément lourd est scindé en deux plus petits, l'attaque est multipliée par deux. 	<div style="text-align: center;"></div> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Le joueur qui a utilisé une carte « élément radioactif » voit son attaque multipliée par deux. ◆ Puis la bataille se déroule normalement.
<p style="text-align: center;"><i>Carte eka</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Dans sa théorie, Dmitri Mendeleïev avait prédit les propriétés de certains éléments. Par exemple, à partir du silicium, il avait anticipé les propriétés de germanium, situé juste en dessous. En attendant sa découverte, le germanium était appelé l'eka-silicium (en dessous du silicium). ◆ En référence aux eka-éléments, prendre une carte dans le jeu de l'adversaire permet à celui-ci de connaître à l'avance une partie de votre jeu. 	<div style="text-align: center;"></div> <ul style="list-style-type: none"> ◆ La bataille se déroule normalement. ◆ Puis, prendre une carte dans le jeu de l'adversaire après la bataille, même si celle-ci a été perdue.

Les différents types de cartes	Explications des règles
<p style="text-align: center;"><i>Carte « élément de synthèse »</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ La chimie est une science dangereuse. <i>Il ne faut pas oublier qu'il faut prendre un grand nombre de précautions et se protéger en toutes circonstances.</i> 	 <ul style="list-style-type: none"> ◆ En plus de l'attaque de cette carte, l'attaque de l'adversaire se retourne contre lui ! <i>Les deux attaques s'additionnent pour davantage de destruction !</i>
<p style="text-align: center;"><i>Carte « terre rare »</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Ces métaux sont, contrairement à ce que suggère leur appellation, assez répandus dans la croûte terrestre. ◆ Les terres rares font désormais partie des matières premières stratégiques. Jeter une carte de l'adversaire est un avantage stratégique dans ce jeu. 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ En plus de l'attaque de cette carte, elle permet au joueur de jeter une carte piochée au hasard dans le jeu de l'adversaire.
<p style="text-align: center;"><i>Carte « halogène »</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Les halogènes sont très réactifs. ◆ Il fallait leur donner un rôle puissant dans ce jeu. 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ En plus de l'attaque de cette carte, prendre une carte dans la pioche et ajouter son attaque à celle de la carte initiale.
<p style="text-align: center;"><i>Carte « alcalin »</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Les alcalins sont très réactifs. ◆ Leur configuration électronique ne leur permettait pas d'être suffisamment puissants dans ce jeu. Cette règle permet de résoudre le problème. 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Piocher une carte et ajouter + 4 à son attaque.
<p style="text-align: center;"><i>Carte « alcalino-terreux »</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Les alcalino-terreux peuvent perdre deux électrons pour devenir un ion positif. En référence à cette idée, on a choisi cette règle. 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Permet d'échanger deux cartes prises dans le jeu de l'adversaire même si la bataille est perdue.
<p><i>Lorsqu'une carte possède plusieurs propriétés chimiques ou physiques, celle qui entre en compte dans le jeu, est toujours indiquée en bas et le plus à droite de la carte.</i></p>	

Tableau 1

Il restait un problème de taille, comme faire des attaques ?

L'enseignant proposa des pistes (électronégativité, configuration électronique, masse atomique). Les élèves ont effectué des recherches, et la solution la plus simple fut retenue. On utilisera le modèle de Bohr, déjà utilisé pour l'illustration de certains éléments. On ajoutera la configuration électronique, et la quantité d'électrons présents sur la dernière sous-couche sera égale au pouvoir d'attaque de la carte.

4. LA SEMAINE AVANT LES VACANCES

Sur le temps de la pause méridienne, nous avons profité de la dernière semaine pour finir le jeu par petits groupes. On a imprimé un « jeu test », sur lequel nous avons écrit les modifications au fur et à mesure. Les règles ont subi aussi quelques changements. Mais, il faut le reconnaître, on a surtout joué et beaucoup ri. Les élèves ont pu découvrir le travail de leurs camarades et les petites touches d’humour que l’on peut trouver dans le jeu.



Figure 4

Enfin, le vendredi 12 avril 2019, les élèves présents sont restés jouer tout l'après-midi alors qu'ils étaient en vacances. Le jeu leur plaisait. Ils s'amusaient tout simplement... avec la classification périodique des éléments ! Le défi était relevé !

Par manque de temps, les élèves avaient décidé de ne pas faire les cent dix-huit éléments. Pour compléter le jeu, les derniers éléments ont été faits par l'enseignant pendant les vacances d'avril.

Complément de l'article

Cet article comporte un complément nommé :

◆ *Jeu de cartes Atomos.pdf*

Il est disponible sur le site de l'UDPPC sous la forme d'un fichier zippé 10200107.

Annexe

Les règles du jeu à deux joueurs

BUT DU JEU

Protéger les électrons d'une carte « roi »  grâce aux autres éléments et à leurs propriétés.

FIN DE PARTIE

Quand un des joueurs n'a plus d'électrons à défendre, il a perdu la partie.

PRÉPARATION

Piocher huit cartes (règle de football).

Les joueurs doivent toujours avoir huit cartes en main maximum.

Dans son jeu, choisir une carte « roi » puis la poser devant son jeu. Si vous n'en avez pas, piocher jusqu'à en trouver une. Les cartes piochées retournent ensuite dans la pioche.

Les cartes rois sont tous les éléments de la quatrième ligne (entre potassium K^{39} et le krypton Kr^{84}). Il faudra donc défendre les électrons de cette carte.

Remarque : ce choix est arbitraire pour ne pas que les parties soient trop longues ou trop inégales.

DÉROULEMENT DU JEU

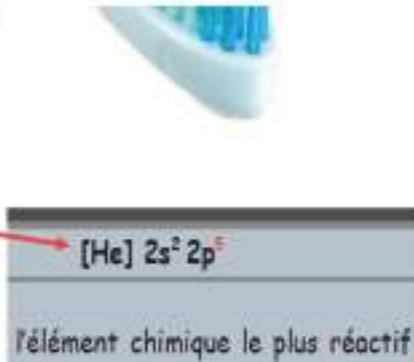
Les joueurs doivent toujours avoir huit cartes en main maximum.

Les deux joueurs placent retournée devant eux la carte de leur choix. Une fois fait, ils révèlent à l'adversaire la carte. Enfin, après avoir joué, les joueurs piochent une seule carte, quel que soit le coup joué.

LES CARTES

Elles infligent des dégâts à la carte « roi ». Le modèle atomique de Bohr sera utilisé durant la partie. Les dégâts sont infligés par le nombre d'électrons présents sur la dernière sous-couche de la couche électronique externe de l'élément. Ce nombre est noté en rouge sur la carte.

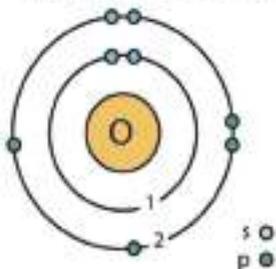
La carte dont l'attaque est la plus forte gagne la bataille. La différence des deux attaques correspond au nombre d'électrons perdus par la carte « roi » du perdant.



Exemple :**Joueur 1 : Enzo**

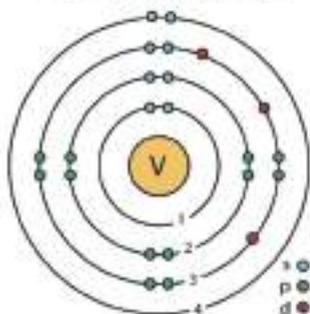
Enzo joue l'oxygène de configuration électronique $[\text{He}] 2s^2 2p^4$.

L'oxygène possède donc quatre électrons périphériques sur la couche 2p.

**Joueur 2 : Timothée**

Timothée joue le vanadium de configuration électronique $[\text{Ar}] 3d^3 4s^2$.

Le vanadium possède donc deux électrons périphériques sur la couche 4s.



Résultats : Enzo gagne la bataille, il fait perdre deux électrons à la carte roi de Timothée.

L'Actualité Chimique

communiqué

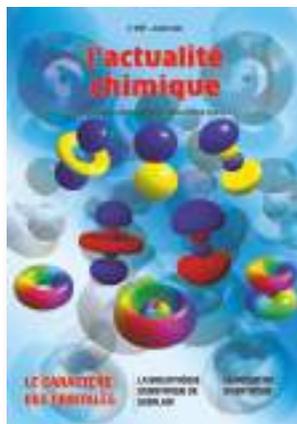
contact **Séverine BLÉNEAU-SERDEL**
Société chimique de France - 75005 Paris
bleneau@lactualitechimique.org

SOMMAIRE DE JANVIER 2020

n° 447 (64 pages - version papier hors abonnement 20 € - version électronique 15 €)

Au sommaire de ce numéro :

- ◆ Qualifier une **orbitale moléculaire** de liante, antiliante ou non liante est un exercice familier à tout enseignant de chimie des premières années d'enseignement supérieur, mais ces notions deviennent plus difficiles à définir lorsque l'on cherche à calculer précisément ces orbitales... Tour d'horizon de ces notions.
- ◆ **Et aussi** : Léonard de Vinci, science et art de la couleur. Du plastique dans les nuages ? Exploration de la bibliothèque scientifique de Guerlain, la plus ancienne maison de parfumerie.



Éditorial

Best wishes for the future ! ◆ Les vœux du Comité de rédaction.

Clin d'œil étymologique

À propos de jasmone.

À propos de

Léonard de Vinci : science et art de la couleur ◆ Du plastique dans les nuages ? Retour sur l'Expédition 7^e Continent en Méditerranée.

Recherche et développement

Médailles 2018 du CNRS : Promotion of heterogeneous catalysts ◆ Prix Jeune chercheur 2018 de la division Catalyse : Des solides poreux comme macroligands solides : un lien entre catalyse homogène et catalyse hétérogène ◆ Principes et substances actifs :

l'actualité chimique

Abonnez votre lycée pour un an à **L'Actualité Chimique**

Tarif spécial lycée

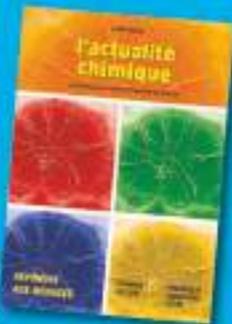
11 numéros par an
(y compris les numéros spéciaux)

- Abonnement papier + électronique
 - France métropolitaine 120 €
 - DOM-COM, UE, Suisse 168 €
 - Reste du monde 175 €
- Abonnement électronique seul
 - France/Étranger 70 €

L'Actualité Chimique, le journal de la Société Chimique de France, vous informe sur le monde de la chimie française, particulièrement en ce qui concerne la recherche scientifique, académique et industrielle et l'enseignement. Elle traite aussi des interfaces avec la chimie, comme le médicament, les matériaux et le génie des procédés.

Par ses numéros réguliers et ses numéros thématiques, cette revue est un outil indispensable pour tous, scientifiques et étudiants, notamment dans le cadre de la préparation des TPE ou TIPE.

Elle fournit également pour les enseignants une source irremplaçable d'articles scientifiques, d'informations et de réflexions sur la vie et l'évolution des sciences chimiques, qu'ils seront heureux de trouver pour construire leur enseignement.



Abonnements et adhésions :

SCF, 250 rue Saint-Jacques, F-75005 Paris – Tél. : + 33 (0)1 40 46 71 66/60.
adhesion@societechimiquedefrance.fr – www.societechimiquedefrance.fr

Rédaction :

SCF, 28 rue Saint-Dominique, F-75007 Paris – Tél. : + 33 (0)1 40 46 71 64.
redaction@lactualitechimique.org – www.lactualitechimique.org



Société Chimique de France
et affiliés des pays limitrophes

Nouveaux principes actifs pharmaceutiques et nouvelles substances actives phytopharmaceutiques.

Enseignement et formation

Définir le caractère liant/antiliant d'une orbitale moléculaire : de l'amphi à la recherche ♦ *Médiation scientifique* : ITER : comment communiquer l'« autre nucléaire » ? ♦ Storytelling and hands-on activities boosting young children's awareness and understanding of chemistry.

Histoire de la chimie

La bibliothèque scientifique du parfumeur Guerlain.

Interview

Une carrière guidée par l'innovation chimique.

Un point sur

Fiche n° 72 : Des prodrogues polymères pour la délivrance de principes actifs.

Prochain thème à venir

♦ Chimie et origine de la vie (1^{er} semestre 2020).

Le sommaire détaillé, les résumés des articles et certains articles et rubriques en téléchargement libre sont disponibles sur le site de *L'Actualité Chimique* :

www.lactualitechimique.org

N'hésitez pas à visiter le site où vous attendent aussi les archives d'une partie des anciens numéros (rappel : tous les articles et numéros de plus de cinq ans sont téléchargeables gratuitement, ainsi qu'un grand nombre de rubriques et d'articles, dont tous les dossiers coordonnés par la division Enseignement-Formation de la Société chimique de France), des brèves, des livres..., et à nous envoyer vos suggestions...

redaction@lactualitechimique.org



Séverine BLÉNEAU-SERDEL

Rédactrice en chef adjointe

Société chimique de France

Paris

Table des matières de la 113^e année

Année 2019

par **Sophie ROBERT**

Collège La Madeleine - 49000 Angers

IFUCOME-UCO - 49000 Angers

robert.pissis@wanadoo.fr

1. ÉDITORIAUX ET INFORMATIONS

- ◆ Parbelle V.
Nouveaux lycées, nouveaux défis..... 1010 3
- ◆ Gautier C. et Lacave M.
*Le 67^e congrès national des professeurs de physique et de chimie
(Grenoble : du 28 au 31 octobre 2019)*..... 1014 507
- ◆ Lehoucq M.-Th.
Merci à notre président d'honneur !..... 1016 771
- ◆ Lehoucq M.-Th. et Langlais C.
*Un numéro commun UdPPC - SFP sur la physique
des matériaux anciens* 1018 1159
- ◆ Lehoucq M.-Th.
*Allocution prononcée lors du 67^e congrès national de l'UdPPC
(Grenoble : mardi 29 octobre 2019)*..... 1019 1313

2. CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

2.1. Astronomie - Astrophysique

- ◆ Dervieux J. et Simonnet P.
Le ciel en 2019 1011 219
- ◆ Bordas A., Chuard D. et Zarrouk P.
*Jouer en classe autour des exoplanètes : les exoplanètes expliquées
dans un jeu de société à destination des scolaires* 1012 341
- ◆ Jean P.
Le Big Bang : le « mur de Planck » et autres constructions..... 1010 25
- ◆ Procureur S.
Quand les muons cosmiques explorent le cœur de la matière 1018 1265

2.2. Physique

◆ Bertrand L. et Gourier D. <i>Une physique des matériaux anciens.....</i>	1018	1161
◆ Bertrand L., Cohen S., Thoury M., David S. et Schoeder S. <i>IPANEMA, un laboratoire dédié à l'étude des matériaux anciens et patrimoniaux par méthodes synchrotron.....</i>	1018	1191
◆ Bergmann U., Georgiou R., Gueriau P., Bertrand L. et Rueff J.-P. <i>Nouvelles spectroscopies Raman X du carbone pour les matériaux anciens.....</i>	1018	1195
◆ Calligaro T. et Pacheco C. <i>Un accélérateur de particules fait parler les œuvres d'art et les objets archéologiques.....</i>	1018	1179
◆ Daussy C. et Wiotte F. <i>Une introduction au nouveau Système international d'unités.....</i>	1010	7
◆ Ducasse F. et Pujol O. <i>Le principe de conservation de l'énergie : pilier de l'enseignement de l'énergie dans le secondaire ?.....</i>	1010	31
◆ De Zotti V. et Piot-Durand H. <i>Vers un ruban adhésif silencieux ?.....</i>	1013	373
◆ Genin C. <i>Présentation des spectres infrarouges.....</i>	1011	185
◆ Guibert P., Mercier N. et Lahaye C. <i>La luminescence : un bref éclairage sur une méthode de datation pour l'archéologie.....</i>	1018	1167
◆ Jean P. <i>Le Big Bang : le « mur de Planck » et autres constructions.....</i>	1010	25
◆ Melzani M. <i>Résolution numérique de l'équation de Laplace : applications en électrostatique et thermique.....</i>	1013	383
◆ Melzani M. <i>Systèmes de grandeurs (partie 1.1. - Définir, utiliser et redéfinir les unités).....</i>	1017	1037
◆ Melzani M. <i>Systèmes de grandeurs (partie 1.2. - Autour du Système international d'unités).....</i>	1019	1319
◆ Pérez J.-P. et Pujol O. <i>Équation de Schrödinger et neutron en chute libre.....</i>	1011	153
◆ Pré T. et Hernandez F. <i>Quelle est la « meilleure » droite ? : la méthode des moindres carrés revisitée.....</i>	1011	163

◆ SFP-Rédaction		
<i>Physique des atomes comme source d'information.....</i>	1018	1165
◆ Tatulli M.		
<i>Les transformations de Lorentz : à propos de la première démonstration publiée dans l'article de 1905 par Albert Einstein</i>	1012	253
◆ Terrien C.		
<i>De Kepler à Hooke avec la mécanique hamiltonienne.....</i>	1013	413
 2.3. Chimie		
◆ Andrieux C.		
<i>Vous pouvez le dire en français... Une nouvelle liste de termes sur les nanomatériaux et les machines moléculaires.....</i>	1015	653
◆ Bergmann U., Georgiou R., Gueriau P., Bertrand L. et Rueff J.-P.		
<i>Nouvelles spectroscopies Raman X du carbone pour les matériaux anciens</i>	1018	1195
◆ Clède S.		
<i>Cinétique d'évaporation de solvants : une expérience de cours pour illustrer les programmes de première année de Classes préparatoires aux grandes écoles (CPGE).....</i>	1011	203
◆ Genin C.		
<i>Présentation des spectres infrarouges</i>	1011	185
◆ Giorgiutti-Dauphiné F. et Pauchard L.		
<i>Craquelures et art : le temps et la matière</i>	1018	1211
◆ Farges F.		
<i>La reconstitution quasi exacte du grand diamant bleu de Louis XIV.....</i>	1018	1243
◆ Fontaine M.		
<i>Approfondissement de la notion de quantité de matière par le jeu : immersion dans un monde "heroic fantasy" pendant une séance de TP avec l'outil Classcraft</i>	1012	283
◆ Lopes L.		
<i>Remarques concernant les tests d'hypothèse : hypothèses, rejet, risque et niveau de confiance.....</i>	1014	511
◆ Sciau P. et Groenen J.		
<i>Procédés de fabrication et propriétés physiques des couvertes de poteries romaines : une approche physico-chimique multi-échelle</i>	1018	1225
◆ Simonot L.		
<i>Des peintures des Primitifs flamands à l'impression 3D : comment jouer avec des couches colorées translucides ?.....</i>	1018	1235
◆ SFP-Rédaction		
<i>Comportement microscopique.....</i>	1018	1209

◆ Verger L., Dargaud O. et Cormier L. <i>Couleurs et émaux : des décors de la Manufacture de Sèvres à la réactivité des pigments</i>	1018	1203
2.4. Outils : mathématique, électronique, informatique, automatique...		
◆ Lopes L. <i>Remarques concernant les tests d'hypothèse : hypothèses, rejet, risque et niveau de confiance</i>	1014	511
◆ Pré T. et Hernandez F. <i>Quelle est la « meilleure » droite ? : la méthode des moindres carrés revisitée</i>	1011	163
◆ Cueille R. <i>La lévitation acoustique : une application intéressante de la pression de radiation acoustique</i>	1012	297
◆ Charbit S. et Bernardot F. <i>Deux oscillateurs LC couplés simplement</i>	1012	329
2.5. Histoire des sciences - Épistémologie - Histoire de l'enseignement		
◆ Delmas F., Clavier A., François E. et Plassart G. <i>L'anneau de Thomson</i>	1013	445
◆ Desombre F. <i>Une petite histoire de la dualité onde-particule au XX^e siècle</i>	1014	531
◆ De Zotti V. et Piot-Durand H. <i>Vers un ruban adhésif silencieux ?</i>	1013	373
◆ Melzani M. <i>Systèmes de grandeurs (partie 1.1. - Définir, utiliser et redéfinir les unités)</i>	1017	1037
◆ Melzani M. <i>Systèmes de grandeurs (partie 1.2. - Autour du Système international d'unités)</i>	1019	1319
◆ Tatulli M. <i>Les transformations de Lorentz : à propos de la première démonstration publiée dans l'article de 1905 par Albert Einstein</i>	1012	253
2.6. Numéro spécial UdPPC-SFP		
◆ Bergmann U., Georgiou R., Gueriau P., Bertrand L. et Rueff J.-P. <i>Nouvelles spectroscopies Raman X du carbone pour les matériaux anciens</i>	1018	1195
◆ Bertrand L. et Gourier D. <i>Une physique des matériaux anciens</i>	1018	1161

- ◆ Bertrand L., Cohen S., Thoury M., David S. et Schoeder S.
*IPANEMA, un laboratoire dédié à l'étude des matériaux anciens
et patrimoniaux par méthodes synchrotron* 1018 1191
- ◆ Calligaro T. et Pacheco C.
*Un accélérateur de particules fait parler les œuvres d'art
et les objets archéologiques* 1018 1179
- ◆ Farges F.
La reconstitution quasi exacte du grand diamant bleu de Louis XIV..... 1018 1243
- ◆ Giorgiutti-Dauphiné F. et Pauchard L.
Craquelures et art : le temps et la matière 10181211
- ◆ Guibert P., Mercier N. et Lahaye C.
*La luminescence : un bref éclairage sur une méthode de datation
pour l'archéologie*..... 1018 1167
- ◆ Lanos F.
*Physique de l'archéomagnétisme pour la datation de bâtiments du haut
Moyen Âge* 1018 1253
- ◆ Procureur S.
Quand les muons cosmiques explorent le cœur de la matière 1018 1265
- ◆ Evans D., Pottier C. et Soutif D.
Quand la technologie LiDAR révèle l'ampleur de cités enfouies..... 1018 1275
- ◆ Sciau P. et Groenen J.
*Procédés de fabrication et propriétés physiques des couvertes
de poteries romaines : une approche physico-chimique multi-échelle* 1018 1225
- ◆ Simonot L.
*Des peintures des Primitifs flamands à l'impression 3D : comment jouer
avec des couches colorées translucides ?*..... 1018 1235
- ◆ SFP-Rédaction
Comportement microscopique..... 1018 1209
- ◆ SFP-Rédaction
Explorer le terrain 1018 1251
- ◆ SFP-Rédaction
Physique des atomes comme source d'information..... 1018 1165
- ◆ Verger L., Dargaud O. et Cormier L.
*Couleurs et émaux : des décors de la Manufacture de Sèvres à la réactivité
des pigments* 1018 1203

3. RÉFLEXIONS PÉDAGOGIQUES ET DIDACTIQUES (PROGRESSION, ÉVALUATION, OUTILS...)

3.1. Méthodes générales - Pratiques innovantes - TPE - Démarche d'investigation

- ◆ Bouليل K. et Rafa B.
*Détermination analytique simple de la période d'un pendule :
un exemple de démarche d'investigation ouverte au lycée*..... 1012 275
- ◆ Chevallier G.
La soirée DupleX..... 1011 147
- ◆ Déjardin P.-M., Lécureux-Têtu M.-H., Brouzet R. et Velcescu A. A.
*Méthode du facteur intégrant pour les équations différentielles linéaires
du premier ordre et application de cette méthode à divers problèmes
de physique, chimie et biologie* 1017 1019
- ◆ Melzani M.
*Systèmes de grandeurs
(partie 1.1. - Définir, utiliser et redéfinir les unités)*..... 1017 1037
- ◆ Pré T. et Hernandez F.
*Quelle est la « meilleure » droite ? : la méthode des moindres carrés
revisitée*..... 1011 163

3.2. En physique

- ◆ Bouليل K. et Rafa B.
*Détermination analytique simple de la période d'un pendule :
un exemple de démarche d'investigation ouverte au lycée*..... 1012 275
- ◆ Charbit S. et Bernardot F.
Deux oscillateurs LC couplés simplement..... 1012 329
- ◆ Cheymol N., Ducourant D., Calliet J.-J., Gues T. et Lecoutre A.
*Aéronautique et physique : les lois de Newton pour comprendre
les différentes phases de vol d'un avion (partie 3)*..... 1015 693
- ◆ De Zotti V. et Piot-Durand H.
Vers un ruban adhésif silencieux ?..... 1013 373
- ◆ Delmas F., Clavier A., François E. et Plassart G.
L'anneau de Thomson..... 1013 445
- ◆ Ducasse F. et Pujol O.
*Le principe de conservation de l'énergie : pilier de l'enseignement
de l'énergie dans le secondaire ?* 1010 31
- ◆ Marchou P., Mathevet R., Jammes E., Fabre C., Lamrani N.,
Martin S., Castro J.-P. et Staacks S.
*Une approche quantitative de la loi de Beer-Lambert avec un smartphone
(première partie)*..... 1017 1079

◆ Mathevet R., Jammes E., Fabre C., Lamrani N., Martin S., Castro J.-P., Marchou P. et Staacks S. <i>Une approche quantitative de la loi de Beer-Lambert avec un smartphone (seconde partie)</i>	1019	1357
◆ Melzani M. <i>Résolution numérique de l'équation de Laplace : applications en électrostatique et thermique</i>	1013	383
◆ Terrien C. <i>De Kepler à Hooke avec la mécanique hamiltonienne</i>	1013	413
3.3. En chimie		
◆ Andrieux C. <i>Vous pouvez le dire en français... Une nouvelle liste de termes sur les nanomatériaux et les machines moléculaires</i>	1015	653
◆ Bresolin G., Pasquet M. et Robreteau M. <i>TimElements</i>	1016	959
◆ Capelle C. et Kerzérho M. <i>Mendeleïev prend l'air</i>	1016	917
◆ Cervellin S. <i>Les éléments chimiques et les métiers de la route</i>	1016	851
◆ Clède S. <i>Cinétique d'évaporation de solvants : une expérience de cours pour illustrer les programmes de première année de Classes préparatoires aux grandes écoles (CPGE)</i>	1011	203
◆ Colin A. et Guillemin C. <i>Atomes & Co</i>	1016	899
◆ Gaborit M. <i>Magazine : le tableau périodique expliqué</i>	1016	877
◆ Grasser P. <i>Élémentaire, mon cher Watson !</i>	1016	933
◆ Konareff P. <i>Une classification périodique géante au lycée de Bois d'Olive</i>	1016	843
◆ Lemée K. <i>Le rêve de Dimitri</i>	1019	1425
◆ Lothon G. et les élèves de 2DMA <i>Anamorphose autour des éléments du tableau périodique</i>	1016	827
◆ Picco C. <i>Sauvez les travaux de Mendeleïev !</i>	1016	967
◆ Rémy P. et Defour M. <i>Classification aimantée à plusieurs facettes</i>	1016	865

◆ Solé-Violan L. et Devallez B. <i>L'électro-synthèse : une technique éco respectueuse pour l'oxydation électrochimique des alcools</i>	1017	1073
◆ Voreaux B. et Amid R. <i>The periodic table song</i>	1016	885
◆ Zimmer S. et Martin D. <i>Jeu d'évasion dans une classe de seconde</i>	1017	1001
3.3. Collège		
◆ Belmharem O. et Deyssard C. <i>Le tableau périodique connecté</i>	1016	951
◆ Bernard C. <i>Enquête sur Mendeleïev au collège Puygrelier</i>	1016	893
◆ Cheymol N., Ducourant D., Calliet J.-J., Gues T. et Lecoutre A. <i>Aéronautique et physique : les lois de Newton pour comprendre les différentes phases de vol d'un avion (partie 3)</i>	1015	693
◆ Cheymol N., Ducourant D., Calliet J.-J., Gues T. et Lecoutre A. <i>Aéronautique et physique : équilibre d'un solide, centre de gravité, moment d'une force (partie 4)</i>	1019	1367
◆ Ducourant D. <i>Autour du mot énergie (partie 1)</i>	1010	77
◆ Dussine C. et Goitia F. <i>La matière et ses transformations, approche macro/micro (journée nationale collège UdPPC)</i>	1016	977
◆ Facq M. et Tiphaine B. <i>La fresque Pixeleïev</i>	1016	815
◆ Goitia F. <i>Projet d'ajustement et de clarification des programmes (cycle 3) : comparaison du programme de 2015 avec le projet de 2018</i>	1014	603
◆ Mantegazza N. <i>L'énigme Mendeleïev</i>	1016	833
◆ Petit J. <i>Un tableau périodique... « grandeur nature »</i>	1016	857
◆ Robin B. <i>« L'alphabet de la chimie » de Mendeleïev à aujourd'hui</i>	1016	921
◆ UdPPC-Rédaction <i>Réunion des correspondants « Collège » (Paris : samedi 23 novembre 2019)</i>	1019	1455

3.4. Concours « Mendeleïev 2019 »

◆ Belmharem O. et Deyssard C. <i>Le tableau périodique connecté</i>	1016	951
◆ Bernard C. <i>Enquête sur Mendeleïev au collège Puygrelier</i>	1016	893
◆ Bresolin G., Pasquet M. et Robreteau M. <i>TimElements</i>	1016	959
◆ Burg A., Picaud S. et Villard M. <i>Le manuscrit de Dmitri</i>	1017	1091
◆ Capelle C. et Kerzérho M. <i>Mendeleïev prend l'air</i>	1016	917
◆ L'équipe « Élément 5 », Casenave E. et Casenave L. <i>Tablitsa</i>	1018	1281
◆ Cervellin S. <i>Les éléments chimiques et les métiers de la route</i>	1016	851
◆ Colin A. et Guillemain C. <i>Atomes & Co</i>	1016	899
◆ Darrieux C., Perrigouard J. et Gorisse R. <i>Tableau périodique 2.0</i>	1017	1111
◆ Facq M. et Tiphaine B. <i>La fresque Pixeleïev</i>	1016	815
◆ Flamand E., Perie N. et Le club des 5 <i>La cible de Mendeleïev</i>	1017	1117
◆ Gaborit M. <i>Magazine : le tableau périodique expliqué</i>	1016	877
◆ Grasser P. <i>Élémentaire, mon cher Watson !</i>	1016	933
◆ Konareff P. <i>Une classification périodique géante au lycée de Bois d'Olive</i>	1016	843
◆ Les correspondants régionaux <i>Résultats du concours « Mendeleïev 2019 »</i>	1016	785
◆ Lothon G. et les élèves de 2DMA <i>Anamorphose autour des éléments du tableau périodique</i>	1016	827
◆ Mantegazza N. <i>L'énigme Mendeleïev</i>	1016	833
◆ Minier G. <i>118 éléments, 432 professeurs et 13 000 élèves : bilan du concours « Mendeleïev 2019 »</i>	1016	773
◆ Petit J. <i>Un tableau périodique... « grandeur nature »</i>	1016	857

◆ Picco C. <i>Sauvez les travaux de Mendeleïev !</i>	1016	967
◆ Rémy P. et Defour M. <i>Classification aimantée à plusieurs facettes</i>	1016	865
◆ Robin B. <i>« L'alphabet de la chimie » de Mendeleïev à aujourd'hui</i>	1016	921
◆ Voreaux B. et Amid R. <i>The periodic table song</i>	1016	885

4. EXPÉRIENCES ET MONTAGES

4.1. En chimie

◆ Clède S. <i>Cinétique d'évaporation de solvants : une expérience de cours pour illustrer les programmes de première année de Classes préparatoires aux grandes écoles (CPGE)</i>	1011	203
◆ Le Lirzin A. <i>Dosages spectrophotométriques et stœchiométrie de la dissolution : un (long) TP de première S</i>	1011	213
◆ Piard J., Bi R., Brion A., Perrin R., Shi L., Doré C. et Clavier G. <i>Utilisation d'un tampon universel pour l'étude d'indicateurs colorés acido-basiques (par spectrophotométrie UV-visible) : Partie A : famille des sulfonephthaléines</i>	1014	559
◆ Piard J., Bi R., Brion A., Perrin R., Shi L. et Doré C. <i>Utilisation d'un tampon universel pour l'étude d'indicateurs colorés acido-basiques (par spectrophotométrie UV-visible) : Partie B : Famille des azonaphthalènes</i>	1015	661
◆ Solé-Violan L. et Devallez B. <i>L'électro-synthèse : une technique éco respectueuse pour l'oxydation électrochimique des alcools</i>	1017	1073
◆ Zimmer S. et Martin D. <i>Jeu d'évasion dans une classe de seconde</i>	1017	1001

4.2. Physique (astronomie)

◆ Dervieux J. et Simonnet P. <i>Le ciel en 2019</i>	1011	219
--------------------------------------------------------------	------	-----

4.3. Physique (ondes, acoustique, sons et ultrasons)

◆ Cueille R. <i>La lévitation acoustique : une application intéressante de la pression de radiation acoustique</i>	1012	297
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------	-----

4.4. Physique (hydrostatique, mécanique, thermodynamique)

- ◆ Bouليل K. et Rafa B.
Détermination analytique simple de la période d'un pendule : un exemple de démarche d'investigation ouverte au lycée..... 1012 275
- ◆ Melzani M.
Résolution numérique de l'équation de Laplace : applications en électrostatique et thermique..... 1013 383
- ◆ Terrien C.
De Kepler à Hooke avec la mécanique hamiltonienne..... 1013 413

4.5. Électricité, électronique, électrotechnique, informatique, automatique, télécommunications.

- ◆ Charbit S. et Bernardot F.
Deux oscillateurs LC couplés simplement..... 1012 329
- ◆ Delmas F., Clavier A., François E. et Plassart G.
L'anneau de Thomson..... 1013 445
- ◆ Melzani M.
Résolution numérique de l'équation de Laplace : applications en électrostatique et thermique..... 1013 383

4.6. Physique (optique)

- ◆ Collard E. et Chaptal F.
DIDAOPTIC : modèle intermédiaire pour l'étude des objets lumineux « Échantillonnage » d'une source étendue (partie 1)..... 1013 433
- ◆ Collard E. et Chaptal F.
DIDAOPTIC : comprendre la formation des ombres par l'échantillonnage de la source étendue (partie 2)..... 1014 541
- ◆ Zanier S. et Delahaye J.
La lumière « bleue » sous l'œil du spectroscope..... 1010 61
- ◆ Marchou P., Mathevet R., Jammes E., Fabre C., Lamrani N., Martin S., Castro J.-P. et Staacks S.
Une approche quantitative de la loi de Beer-Lambert avec un smartphone (première partie)..... 1017 1079
- ◆ Mathevet R., Jammes E., Fabre C., Lamrani N., Martin S., Castro J.-P., Marchou P. et Staacks S.
Une approche quantitative de la loi de Beer-Lambert avec un smartphone (seconde partie)..... 1019 1357

4.7. Collège

- ◆ Ducourant D.
Autour du mot énergie (partie 1)..... 1010 77

5. OUVERTURE SUR LE MONDE

- ◆ Lefebvre B. et Primout R.
*Le 66e congrès national à Bordeaux à travers le regard
d'un facilitateur graphique.....* 1011 191

5.1. Investigations physico-chimique et archéologie

- ◆ Bergmann U., Georgiou R., Gueriau P., Bertrand L. et Rueff J.-P.
*Nouvelles spectroscopies Raman X du carbone
pour les matériaux anciens* 1018 1195
- ◆ Calligaro T. et Pacheco C.
*Un accélérateur de particules fait parler les œuvres d'art
et les objets archéologiques.....* 1018 1179
- ◆ Evans D., Pottier C. et Soutif D.
Quand la technologie LiDAR révèle l'ampleur de cités enfouies..... 1018 1275
- ◆ Farges F.
La reconstitution quasi exacte du grand diamant bleu de Louis XIV..... 1018 1243
- ◆ Guibert P., Mercier N. et Lahaye C.
*La luminescence : un bref éclairage sur une méthode de datation
pour l'archéologie.....* 1018 1167
- ◆ Lanos F.
*Physique de l'archéomagnétisme pour la datation de bâtiments du haut
Moyen Âge* 1018 1253
- ◆ Procureur S.
Quand les muons cosmiques explorent le cœur de la matière 1018 1265
- ◆ SFP-Rédaction
Comportement microscopique..... 1018 1209
- ◆ SFP-Rédaction
Explorer le terrain 1018 1251
- ◆ SFP-Rédaction
Physique des atomes comme source d'information..... 1018 1165

5.2. Matériaux anciens

- ◆ Bertrand L. et Gourier D.
Une physique des matériaux anciens..... 1018 1161
- ◆ Bertrand L., Cohen S., Thoury M., David S. et Schoeder S.
*IPANEMA, un laboratoire dédié à l'étude des matériaux anciens
et patrimoniaux par méthodes synchrotron* 1018 1191
- ◆ Giorgiutti-Dauphiné F. et Pauchard L.
Craquelures et art : le temps et la matière 1018 1211

◆ Sciau P. et Groenen J. <i>Procédés de fabrication et propriétés physiques des couvertes de poteries romaines : une approche physico-chimique multi-échelle</i>	1018	1225
◆ Simonot L. <i>Des peintures des Primitifs flamands à l'impression 3D : comment jouer avec des couches colorées translucides ?</i>	1018	1235
◆ Verger L., Dargaud O. et Cormier L. <i>Couleurs et émaux : des décors de la Manufacture de Sèvres à la réactivité des pigments</i>	1018	1203
◆ SFP-Rédaction <i>Comportement microscopique</i>	1018	1209
◆ SFP-Rédaction <i>Physique des atomes comme source d'information</i>	1018	1165

6. EXAMENS, OLYMPIADES, CONCOURS

6.1. Olympiades de Physique France

◆ Le comité national <i>En route pour les XXVII^{es} Olympiades de Physique France</i>	1015	745
◆ Groslière M.-C. <i>XXVI^e édition : compte-rendu d'activité et concours national (Université de Lille : les 1^{er} et 2 février 2019)</i>	1017	1123

6.2. Olympiades nationales de la chimie

◆ Gilles A. <i>Parlons chimie 2019</i>	1015	731
-------------------------------------------------	------	-----

7. REVUES ET LECTURE

7.1. Sommaires de revues

◆ Bléneau-Serdel S. <i>L'Actualité Chimique communique</i>	1010	121
	1011	235
	1012	353
	1013	463
	1014	619
	1015	755
	1017	1141
	1018	1301
	1019	1435

◆ Robert S. <i>Table des matières de la 112^e année (année 2018)</i>	1010	125
◆ Winther J. <i>Parus au BO</i>	1010	139
	1011	239
	1012	357
	1013	467
	1014	623
	1016	979
	1017	1147
	1018	1305

7.2. Nous avons lu et testé

◆ Dervieux J. <i>Parus ou à paraître</i>	1011	241
	1012	359
	1015	759
	1016	981
	1019	1439

8. VIE DE L'ASSOCIATION

8.1. Congrès national de l'UdPPC

◆ Gautier C. et Lacave M. <i>Le 67^e congrès national des professeurs de physique et de chimie (Grenoble : du 28 au 31 octobre 2019)</i>	1014	507
◆ Gautier C. <i>La science au sommet</i>	1015	747
◆ Lefebvre B. et Primout R. <i>Le 66^e congrès national à Bordeaux à travers le regard d'un facilitateur graphique</i>	1011	191
◆ UdPPC-Rédaction <i>67^e congrès national de l'UdPPC : comptes-rendus des ateliers nationaux (Grenoble : mercredi 30 octobre 2019)</i>	1019	1454

8.2. Éditoriaux

◆ Parbelle V. <i>Nouveaux lycées, nouveaux défis</i>	1010	3
◆ Gautier C. et Lacave M. <i>Le 67^e congrès national des professeurs de physique et de chimie (Grenoble : du 28 au 31 octobre 2019)</i>	1014	507

◆ Lehoucq M.-Th. <i>Merci à notre président d'honneur !</i>	1016	771
◆ Lehoucq M.-Th. et Langlais C. <i>Un numéro commun UdPPC - SFP sur la physique des matériaux anciens</i>	1018	1159
◆ Lehoucq M.-Th. <i>Allocution prononcée lors du 67^e congrès national de l'UdPPC (Grenoble : mardi 29 octobre 2019)</i>	1019	1313
 8.3. Concours « Mendeleïev 2019 »		
◆ Belmharem O. et Deyssard C. <i>Le tableau périodique connecté</i>	1016	951
◆ Bernard C. <i>Enquête sur Mendeleïev au collège Puygrelier</i>	1016	893
◆ Bresolin G., Pasquet M. et Robreteau M. <i>TimElements</i>	1016	959
◆ Capelle C. et Kerzérho M. <i>Mendeleïev prend l'air</i>	1016	917
◆ Cervellin S. <i>Les éléments chimiques et les métiers de la route</i>	1016	851
◆ Colin A. et Guillemain C. <i>Atomes & Co</i>	1016	899
◆ Facq M. et Tiphaine B. <i>La fresque Pixeleïev</i>	1016	815
◆ Gaborit M. <i>Magazine : le tableau périodique expliqué</i>	1016	877
◆ Grasser P. <i>Élémentaire, mon cher Watson !</i>	1016	933
◆ Konareff P. <i>Une classification périodique géante au lycée de Bois d'Olive</i>	1016	843
◆ Lemée K. <i>Le rêve de Dimitri</i>	1019	1425
◆ Les correspondants régionaux <i>Résultats du concours « Mendeleïev 2019 »</i>	1016	785
◆ Lothon G. et les élèves de 2DMA <i>Anamorphose autour des éléments du tableau périodique</i>	1016	827
◆ Mantegazza N. <i>L'énigme Mendeleïev</i>	1016	833
◆ Minier G. <i>118 éléments, 432 professeurs et 13 000 élèves : bilan du concours « Mendeleïev 2019 »</i>	1016	773

◆ Petit J. <i>Un tableau périodique... « grandeur nature »</i>	1016	857
◆ Picco C. <i>Sauvez les travaux de Mendeleïev !</i>	1016	967
◆ Rémy P. et Defour M. <i>Classification aimantée à plusieurs facettes</i>	1016	865
◆ Robin B. <i>« L'alphabet de la chimie » de Mendeleïev à aujourd'hui</i>	1016	921
◆ Voreaux B. et Amid R. <i>The periodic table song</i>	1016	885

8.4. Informations

◆ Fondation C.Génial <i>Professeurs en entreprise</i>	1017	1150
◆ UdPPC-Rédaction <i>Activons les sciences en classe !</i>	1019	1441
◆ UdPPC-Rédaction <i>Appel à candidatures</i>	1011	249
◆ UdPPC-Rédaction <i>17^e Forum international de la météo et du climat</i>	1019	1444
◆ UdPPC-Rédaction <i>Concours Ampère</i>	1019	1446
◆ UdPPC-Rédaction La fondation de la Maison de la chimie communique : Grand Prix 2020 1151		1017
◆ UdPPC-Rédaction <i>L'école d'été d'astronomie du CLEA : chaud et froid dans l'Univers</i>	1012	365
◆ UdPPC-Rédaction <i>Le théâtre La Reine Blanche communique</i>	1011 1017	245 1149
◆ UdPPC-Rédaction <i>Recrutements capitaines et ambassadeurs Declics 2019</i>	1016	985

8.5. Sur votre agenda

◆ UdPPC-Rédaction <i>Sur votre agenda</i>	1010 1011 1012 1013 1014 1015	144 250 369 503 649 766
----------------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------

◆ UdPPC-Rédaction		
<i>Sur votre agenda</i>	1016	998
	1017	1155
	1018	1310
	1019	1458

8.6. L'UdPPC au fil des jours...

◆ Le Bureau national		
<i>L'UdPPC au fil des jours</i>	1010	141
	1011	247
	1012	367
	1013	469
	1015	765
	1017	1153
	1018	1307
	1019	1447

8.7. Réforme du lycée

◆ UdPPC-Rédaction		
<i>Comptes-rendus des réunions avec le CSP : présentation des projets de programmes de terminale</i>	1013	476
◆ UdPPC-Rédaction		
<i>Compte-rendu de la réunion avec le CSP : projet de programme de terminale générale - tronc commun (enseignement scientifique)</i>	1013	478
◆ UdPPC-Rédaction		
<i>Compte-rendu de la réunion avec le CSP : projet de programme de terminale de spécialité (physique-chimie - voie générale)</i>	1013	480
◆ UdPPC-Rédaction		
<i>Compte-rendu de la réunion avec le CSP : projet de programmes de terminale des spécialités (série Sciences et technologies de laboratoire (STL) Physique-chimie et mathématiques Spécialité Sciences physiques et chimiques en laboratoire (SPCL))</i>	1013	485
◆ UdPPC-Rédaction		
<i>Compte-rendu de la réunion avec le CSP : projet de programmes de terminale de spécialité (physique-chimie et mathématiques TSTI2D - voie technologique)</i>	1013	490
◆ UdPPC-Rédaction		
<i>Compte-rendu de la réunion avec le CSP : projets de programmes de terminale de spécialité (chimie, biologie et physiopathologie humaines ST2S - voie technologique)</i>	1013	496

8.8. Vie de l'association

◆ Le Cabinet IDF Expertise <i>Rapport financier 2018 (du 1^{er} janvier au 31 décembre 2018)</i>	1014	640
◆ UdPPC-Rédaction <i>Appel à candidatures</i>	1011	249
◆ UdPPC-Rédaction <i>Assemblée générale 2019 (Paris : samedi 15 juin 2019)</i>	1014	625
◆ UdPPC-Rédaction <i>Assemblée générale de l'UdPPC (Université Paris-Diderot (Paris) : le 15 juin 2019)</i>	1016	987
◆ UdPPC-Rédaction <i>Compte-rendu de l'Assemblée générale et du Conseil (Université Paris-Diderot (Paris) : samedi 15 juin 2019)</i>	1016	990
◆ UdPPC-Rédaction <i>Compte-rendu du Conseil de l'UdPPC (Lycée Montaigne (Paris) : samedi 19 janvier 2019)</i>	1013	471
◆ UdPPC-Rédaction <i>Compte-rendu du Conseil de l'UdPPC (Université Paris-Diderot (Paris 7) : samedi 21 septembre 2019)</i>	1019	1448
◆ UdPPC-Rédaction <i>Rapport d'activités 2018-2019 (avril 2018 - mars 2019)</i>	1014	628
◆ UdPPC-Rédaction <i>Réunion des correspondants « Collège » (Paris : samedi 23 novembre 2019)</i>	1019	1455



Sophie ROBERT

Enseignante de sciences physiques

Collège La Madeleine

Angers (Maine-et-Loire)

Réunion des correspondants « Enseignements technologiques »

Paris : samedi 14 décembre 2019

par **Philippe GOUTVERG**
Lycée Libergier - 51100 Reims
technologique@udppc.asso.fr

Les correspondants « Enseignements technologiques » se sont réunis à Paris le samedi 14 décembre 2019 pour faire le bilan de l'année et évoquer les éventuelles réformes à venir.

Présents (effectif faible pour cause de grève des transports)

David Alberto (Rouen), Philippe Goutverg (Reims), Joël Jaussaud (Clermont-Ferrand), Laurent Josse (Rennes, par GoToMeeting), Philippe Robert (Besançon, par GoToMeeting).

IMPLANTATION ET EFFECTIFS DES OPTIONS TECHNOLOGIQUES DE SECONDE

L'effectif dépend beaucoup de la politique des établissements : à Reims on passe de cent élèves en enseignement d'exploration SL et MPS à douze en option SL, et pareil en Biotechnologie ; *a contrario*, à Quimper, 84 % des élèves de seconde ont choisi l'option SI/CIT. On ne peut pas dire pour le moment si cela aura une conséquence sur l'orientation vers les séries technologiques.

BAISSE DES EFFECTIFS EN PREMIÈRE TECHNOLOGIQUE

Baisse globale 4,4 % : STMG stable, - 4 % en STL (surtout SPCL), et - 13 % en STI2D ! Certaines causes sont avancées : multiplication des parcours en première générale, possibilité de faire des sciences sans faire de maths (!), possibilité de choisir ses points forts : il faudra insister sur l'apport de la démarche utilisée dans les séries technologiques qui convient beaucoup mieux à certains élèves.

Concernant la STL/SPCL, le problème est que les élèves ne font plus de biologie en terminale, ce qui restreint les possibilités de poursuite d'études : c'est le seul cas où il y a restriction dans les choix...

En STI2D, la nette revalorisation des coefficients des maths et de la physique-chimie (souhaitée pour améliorer la réussite des élèves dans le supérieur) a rebuté beaucoup d'élèves.

Un bilan officiel de l'orientation en série technologique est attendu en début d'année. Le ministère annonce la création d'un groupe de travail adossé au comité de suivi de la réforme du lycée : à suivre sur Eduscol.

Une **réforme des IUT** est en discussion actuellement, elle prévoit la création d'un Bachelor universitaire de technologie (BUT) avec un quota de 50 % de recrutement de bacheliers technologiques, avec les conséquences suivantes :

- ◆ nécessité d'augmenter le niveau théorique des élèves pour qu'ils réussissent, mais aussi de baisser les exigences à l'IUT ;
- ◆ plus grande difficulté d'accès pour les bacheliers généraux (communiquer là-dessus permettrait peut-être de limiter ou d'inverser la baisse des effectifs en première technologique) ;
- ◆ baisse des demandes des bacheliers technologiques vers les BTS.

Il faudra prévoir de travailler en amont avec les IUT sur la continuité des enseignements.

De plus, le **bac professionnel** est également en rénovation, avec notamment :

- ◆ une augmentation des exigences dans les matières générales (dont font partie les maths et les sciences physiques) ;
- ◆ des heures en co-intervention entre professeur de maths-sciences et professeur de spécialité ;
- ◆ au deuxième semestre de terminale, un module au choix : soit insertion professionnelle, soit aide à la poursuite d'études. Les professeurs d'enseignement technologique pourraient-ils intervenir dans ce dernier module ?

Actuellement, les bacheliers professionnels ont de très grosses difficultés à réussir en BTS, en partie par manque d'autonomie et d'organisation du travail personnel.

ORGANISATION DES ENSEIGNEMENTS DE PREMIÈRE TECHNOLOGIQUE

Physique-chimie-maths

- ◆ en STL : 4 h/1 h ou 3 h 30/1 h 30 ;
- ◆ en STI2D : 4 h 30/1 h 30 (parfois 3 h/3 h !).

Un travail commun avec le professeur de maths est fortement conseillé, mais n'est pas toujours possible : ce n'est pas toujours le même enseignant de maths en tronc commun et en spécialité, ou bien des élèves de plusieurs séries sont mélangés en tronc commun, donc l'heure (ou l'heure et demie) de maths-spécialité est hebdomadaire, ce qui limite fortement la souplesse dans le choix des progressions. De plus, des contraintes de choix d'Épreuves communes de contrôle continu (E3C) ont empêché les collègues de suivre les plans prévus.

Des difficultés se font sentir pour le traitement de la partie sur l'introduction de la primitive par la méthode d'Euler en première STL : il va falloir rester humble et concret (par exemple, avec des outils comme *GéoGebra* qui permet de comparer les résultats du calcul numérique et du calcul formel).

ST2S : le programme est ambitieux

En terminale, le programme indique clairement les horaires de la partie chimie (3h) et biologie et physiopathologie humaines (5 h) dans la spécialité commune : il va falloir être vigilant sur la répartition.

On pressent déjà les nombreuses difficultés qui vont advenir dans l'organisation des E3C : durée des épreuves et un tiers de temps, rémunération des corrections, harmonisation, calculatrice en mode examen...

Il y a une inégalité selon les Régions dans l'attribution d'un budget spécifique pour l'achat des microcontrôleurs : certaines ont directement doté les lycées, d'autres ont donné une subvention, mais d'autres établissements devront s'équiper sur leurs crédits de fonctionnement : les régions n'ont-elles pas obligation d'investissement pour les nouveaux programmes ?

Nous n'avons toujours aucune information sur le déroulement des projets en terminale ni sur les compétences évaluées lors de l'oral terminal : il faut rappeler que le coefficient de cette épreuve est plus grand dans les séries technologiques (14) que dans les séries générales (10), ceci afin de valoriser le travail par projet, qui est quand même une des spécificités essentielles des séries technologiques. Un oral réduit à une épreuve d'éloquence serait une catastrophe !

INFORMATIONS SUR LES SÉRIES TECHNOLOGIQUES À L'UDPPC

Après les difficultés occasionnées par le nouveau site Internet et le retour en arrière imposé, l'UdPPC réfléchit à une réorganisation de son site. Il est possible de prévoir une rubrique « enseignement technologique » avec, par exemple, des activités originales qui permettraient de faire connaître les spécificités de ces séries. Mais des articles courts et simples sont également attendus dans *Le Bup* : n'hésitez pas !

Sigles utilisés dans cet article

- ◆ BTS : Brevet de technicien supérieur.
- ◆ IUT : Institut universitaire de technologie.
- ◆ MPS : Méthodes et pratiques scientifiques.
- ◆ SI/CIT : Sciences de l'ingénieur / Création et innovation technologique.
- ◆ SL : Sciences de laboratoire.

- ◆ SPCL : Sciences physiques et chimiques en laboratoire.
- ◆ STI2D : Sciences et technologies de l'industrie et du développement durable.
- ◆ STL : Sciences et technologie de laboratoire.
- ◆ STMG : Sciences et technologies du management et de la gestion.

Appel à candidatures

Conformément aux statuts de l'Union des professeurs de physique et de chimie, disponibles sur <http://www.udppc.asso.fr>, le Conseil de l'association est une instance formée de vingt-quatre membres élus par l'Assemblée générale et de membres de droit. Les membres élus le sont pour trois ans et ils sont renouvelables par tiers à l'Assemblée générale annuelle.

Le Conseil se réunit trois fois par an, en septembre, en janvier/février et en juin à l'issue de l'Assemblée générale. Son rôle consiste à définir l'orientation de la politique de l'association et les diverses actions à conduire.

Le Bureau national de l'Union des professeurs de physique et de chimie fait appel à candidatures auprès des collègues intéressés.

Adressez votre candidature **avant le 1^{er} avril 2020** à :

Marie-Thérèse Lehoucq
Union des professeurs de physique et de chimie
42 rue Saint-Jacques - 75005 Paris
presidence@udppc.asso.fr

Merci de préciser vos coordonnées personnelles (téléphone, adresse postale et électronique) et celles de votre établissement d'exercice (adresse, académie) ainsi que le type d'enseignement (collège, lycée, BTS...) qui vous concerne.

Peuvent faire acte de candidature les membres actifs de l'association, à jour de leur cotisation 2020.

La liste des candidatures sera publiée dans *Le Bup* de mai 2020. Le vote aura lieu lors de l'Assemblée générale le 13 juin 2020.

Sur votre agenda...

Retrouvez en ligne dès maintenant toutes les manifestations à partir du site de l'UdPPC :
<http://www.udppc.asso.fr/national/index.php/sur-votre-agenda>

Le samedi 14 mars 2020

Réunion pour la préparation du congrès - Paris.

Le samedi 21 mars 2020

Journée collège proposée à tous les collègues adhérents et non-adhérents.

Université Paris-Diderot (Paris 7) - Bâtiment « La Halle aux Farines » - Paris.

Les mercredi 1^{er} et jeudi 2 avril 2020

36^{es} Olympiades nationales de la chimie

Le thème : « Chimie dans la ville ».

Deux concours : scientifique (1^{er} et 2 avril 2020) et « Parlons chimie » (2 avril 2020).

Remise des prix : 3 avril 2020.

Du lundi 6 au mercredi 15 juillet 2020

Les 52^{es} Olympiades internationales de chimie (IChO)

Istanbul (Turquie).

Du samedi 18 au dimanche 26 juillet 2020

Les 51^{es} Olympiades internationales de physique (IPhO)

Vilnius (Lituanie).

Du dimanche 25 au mercredi 28 octobre 2020

68^e congrès des professeurs de physique et de chimie

Le thème : « Place aux sciences » - Nancy.

Réunions du Bureau national, Assemblée générale et du Conseil de l'association

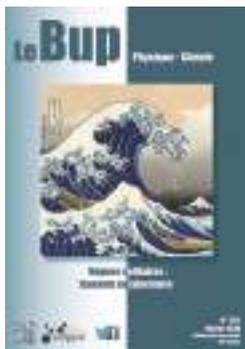
Afin que vous puissiez soumettre des questions que vous voulez voir traitées aux instances nationales de l'association, nous faisons figurer ici les dates de ces réunions.

- ◆ Les prochaines réunions du Bureau national se tiendront les 5 février et 25 mars 2020.
- ◆ L'Assemblée générale se tiendra le samedi 13 juin 2020 à 10 h à l'Université Paris-Diderot (Paris 7) - Bâtiment « la Halle aux Farines » - 16 rue Française Dolto - Paris 13^e. Elle sera suivie de la réunion du Conseil à 17 h.



Vagues solitaires : tsunamis en laboratoire





Siège social

Union des professeurs de physique
et de chimie
42 rue Saint-Jacques - 75005 Paris
Tél. : 01 40 46 83 80 - Fax : 01 46 34 76 61

Adhésions à l'UdPPC et abonnements au Bup

Secrétariat des abonnements
Sabine ASSAL
abonnement@udppc.asso.fr
Serveur des adhésions et abonnements
<http://adhesion.udppc.asso.fr>

Le Bup physique-chimie

Directeur de la publication
Marie-Thérèse LEHOUCQ
presidence@udppc.asso.fr

Rédacteur en chef

Gérard DUPUIS
lebup.redaction@udppc.asso.fr

Secrétariat de la rédaction

Catherine FRANÇOIS
lebup.secretaire@udppc.asso.fr

Comité de rédaction

Guy BOUYRIE, Jean DERVIEUX,
Luc DETTWILLER, Dominique DUCOURANT
et Dany LAUNER

Imprimeur

ALLIANCE PARTENAIRES GRAPHIQUES
26-30 rue du Docteur Schweitzer
51100 Reims

Commission paritaire : 0120 G 85898
Dépôt légal : 1^{er} trimestre 2020
ISSN (version papier) : 1770-1368
ISSN (version électronique) : 2491-830X



Articles scientifiques et pédagogiques

- 145** Vagues solitaires : tsunamis en laboratoire
S. Boury, M. Menou, R. Menu, H. Piot-Durand
et J. Thibaut
- 157** Mouvement relatif d'un point soumis à l'attraction
d'une planète avec un satellite :
évitement ou capture ?
L. Dettwiller

Articles expérimentaux

- 173** Projet Rétinac : voir le son
Partie 1 : les interférences acoustiques
J-Ch. Jouan, Y. Chriqui, V. Kubiacyk et A. Deshayes

Collège

- 193** Projet de renforcement des enseignements relatifs
au changement climatique, à la biodiversité
et au développement durable (cycles 3 et 4) :
comparaison du programme de 2015
avec le projet de 2019
C. Dussine et F. Goitia

Concours « Mendeleïev 2019 »

Académie de Rennes

- 209** Le tableau de Dmitri Mendeleïev
P. Lemaître

Nous avons lu et testé

- 215** *L'Actualité Chimique* communiquée
S. Bléneau-Serdel
- 217** Parus au BO
J. Winther

Vie de l'association

- 219** L'UdPPC au fil des jours...
Le Bureau national
- 220** Compte-rendu du 11^e forum des enseignants innovants
Le Bureau national
- 223** Compte-rendu du Conseil
UdPPC rédaction

Vie de l'association (suite)

228 Sur votre agenda...
UdPPC rédaction

Publicitaires

- I Concours Ampère
- II Olympiades nationales de la chimie
- III Forum international de la météo et du climat
- IV Société française de chimie
- V Chimie et terroir, osez l'expérience !
- VI Sciences et médias
- VII UdPPC : 68^e congrès national (Nancy)
- VIII Exposition : la quête des éléments

Vagues solitaires : tsunamis en laboratoire

par Samuel BOURY, Lucas MENOUE, Raphaël MENU, Hélène PIOT-DURAND et Jérôme THIBAUT

Laboratoire junior Géophysique et fluides planétaires

École normale supérieure de Lyon - 69007 Lyon

samuel.boury@ens-lyon.fr

*L*ONGTEMPS INEXPLIQUÉS, LES TSUNAMIS sont aujourd'hui des phénomènes océaniques relativement bien compris, notamment depuis la découverte des solitons hydrodynamiques par John Scott Russel au milieu du XIX^e siècle. Cet article présente un dispositif expérimental simple permettant de reproduire qualitativement le phénomène de tsunami et d'en étudier quantitativement différents aspects comme la vitesse de propagation ou le déferlement. Un modèle théorique, basé sur l'équation non linéaire de Korteweg-de Vries, est également proposé.

INTRODUCTION

Occasionnellement, des vagues géantes se forment et déferlent sur les côtes : ce sont des tsunamis, terme japonais désignant des « vagues du port », fréquemment observées dans l'archipel. Il s'agit d'une grande vague, arrivant seule et pouvant être suivie de répliques plus petites, que la hauteur de plusieurs mètres voire dizaines de mètres et la vitesse d'arrivée rendent extrêmement dangereuse et destructrice. En physique, ce type de vague appartient à la catégorie des ondes solitaires. En l'occurrence, ces vagues sont créées par des événements très énergétiques correspondant à un brusque déplacement d'eau : par exemple un séisme, créant un déplacement d'eau sous-marin, ou la chute d'objets très massifs dans l'eau comme une météorite ou des blocs de glace dans les fjords.

L'étude et la compréhension des tsunamis revêt une importance toute particulière aujourd'hui, du fait de la densification de l'habitat sur les côtes et de l'installation d'équipements et d'infrastructures dont l'endommagement aurait des effets néfastes pour l'homme et l'environnement : industries chimiques et les centrales nucléaires par exemple (on peut citer notamment l'accident nucléaire de Fukushima, conséquence du tsunami de 2011 au large du Japon). À terme, une meilleure connaissance des tsunamis permettrait d'en améliorer la prévention, la détection et d'en limiter les dégâts.

Pour modéliser ces phénomènes géophysiques, nous distinguons différentes étapes : une phase de génération plutôt localisée en haute mer, une phase de propaga-

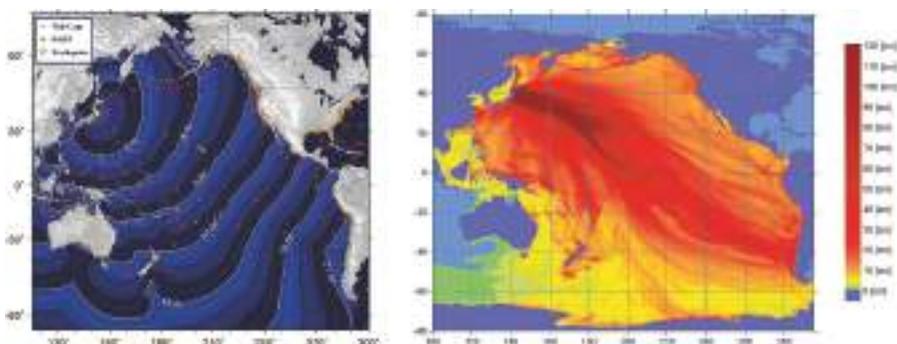


Figure 1 - Temps de propagation (gauche) et amplitude (droite) de la vague du tsunami généré lors du séisme de Sendai (Japon), le 11 mars 2011. Ce tsunami est notamment à l'origine de la catastrophe nucléaire de Fukushima.

tion, et une phase de déferlement proche des côtes. Nous proposons une étude expérimentale appuyée par des considérations théoriques pour décrire ces différents aspects.

1. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Nous proposons une étude expérimentale du phénomène de soliton hydrodynamique et d'un modèle qualitatif de tsunami illustrant la génération de l'onde, sa propagation et le déferlement ayant lieu sur les côtes. Le dispositif utilisé a fait l'objet d'une étude présentée en [1].

1.1. Dispositif expérimental et protocole

Nos expériences ont été réalisées à l'aide d'une cuve en plexiglas de 2 m de longueur, 0,4 m de hauteur et 0,2 m de profondeur (cf. figure 2). Cette cuve, beaucoup plus petite en largeur qu'en longueur, permet de se placer dans l'approximation d'un océan à deux dimensions (hauteur et longueur), et d'une onde de surface ne se propageant que selon une direction. La cuve est remplie d'eau douce jusqu'à une hauteur h . Cette eau a été colorée à l'aide d'un colorant alimentaire bleu hautement miscible dans l'eau pour permettre des mesures précises des déplacements de la surface libre.

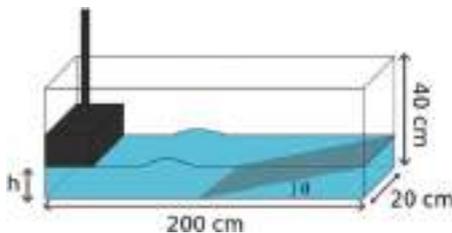


Figure 2 - Schéma du dispositif expérimental.

La génération de la vague solitaire est réalisée grâce à un déplacement brusque d'une quantité d'eau non négligeable. Pour cela, nous utilisons un « marteau » (bloc de plexiglas) d'une largeur proche de celle de la cuve à une extrémité du dispositif. Le marteau est tenu à la surface de l'eau et lâché sans vitesse initiale de sorte que l'énergie injectée soit la même dans chaque réalisation d'une même expérience. Comme la dispersion des mesures le montre dans les parties suivantes, ces conditions ne sont pas parfaitement reproductibles et introduisent un biais dans les résultats obtenus. Ce mécanisme de génération est similaire à celui proposé notamment dans [2] où un volume d'eau est retenu à une extrémité de la cuve puis relâché grâce à une paroi amovible. Une unique vague est alors créée et se propage vers l'autre extrémité de la cuve.

Afin de modéliser le littoral, qui consiste en une diminution progressive de la profondeur d'eau, nous ajoutons une pente partiellement immergée à l'extrémité opposée au marteau. Elle crée ainsi un littoral modèle d'inclinaison constante, et il est facile d'en changer l'angle avec l'horizontale.

Une caméra est placée parallèlement à la face principale de la cuve transparente pour visualiser le phénomène. Chaque vague réalisée est ainsi enregistrée et peut être traitée grâce au logiciel de traitement d'images *ImageJ*.

Au cours de nos expériences, nous avons cherché à étudier l'impact de la hauteur d'eau h sur les caractéristiques de la vague ainsi créée, que ce soit au niveau de sa propagation ou de son déferlement lors de son arrivée sur les côtes.

1.2. Propagation de l'onde

La propagation d'une onde s'effectue sans déplacement de matière et dans le cas d'une surface vibrante chaque point de la surface oscille verticalement [3]. Pour une onde hydrodynamique se propageant à l'interface eau-air, le passage de l'onde impose un mouvement local au fluide qui prend la forme d'une boucle fermée en ellipse, d'autant plus petite que la particule fluide considérée est située en profondeur. Si la profondeur est très grande devant la longueur d'onde, ces ellipses deviennent des cercles [4–5].

Dans le cas d'un milieu peu profond devant l'amplitude de l'onde, le mouvement de la surface n'est pas de nature parfaitement ondulatoire et les particules fluides décrivent, loin des bords de la cuve, des cycloïdes et non des ellipses fermées [5]. Dans le cas de notre expérience, un aller-retour de l'onde grâce aux rebonds de la vague aux extrémités de la cuve est nécessaire afin que les particules de fluide retrouvent leur emplacement initial. Le déplacement de la surface libre est présenté figure 3 (cf. page ci-après) avec une chronophotographie montrant le mouvement d'une balle de ping-pong à la surface de l'eau lors du passage de la vague (gauche), ainsi que le suivi du mouvement du sommet de la vague et du centre de la balle sur ces différentes images (droite). Ce type d'onde particulier, où l'influence de la faible profondeur se fait sentir sur le mouvement latéral de la surface, s'appelle onde cnoidale.

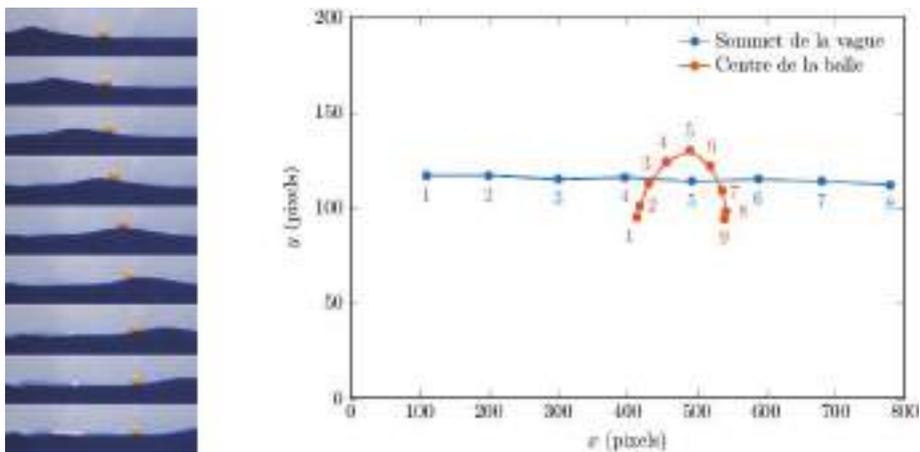


Figure 3 - Chronophotographie du passage de la vague à 0,08 s d'intervalle (gauche) et déplacements mesurés du sommet de la vague et du centre de la balle de ping-pong (droite).

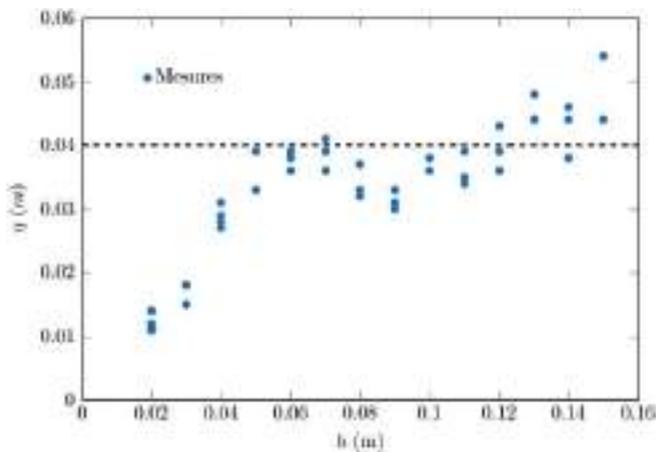


Figure 4 - Évolution de la hauteur de la vague η en fonction de la hauteur d'eau h .

1.3. Caractérisation de la vague

Nous présentons figure 4 (cf. page ci-contre) l'évolution de la hauteur de la vague η en fonction de la hauteur d'eau au repos h , pour l'intervalle $h \in [0,02 \text{ m} ; 0,15 \text{ m}]$. Trois (voire quatre) solitons indépendants ont été étudiés pour chaque hauteur d'eau h . On observe tout d'abord que ces mesures sont très reproductibles : pour une même hauteur h , la vague obtenue est toujours d'une taille similaire. Cependant, une certaine dispersion apparaît selon les réalisations expérimentales, probablement due à une génération imparfaite de l'onde (le marteau injectant plus d'énergie dans la vague s'il est un peu poussé au lieu d'être simplement lâché). Pour des petites hauteurs h , l'amplitude de la vague augmente, passant de $\eta = 1 \text{ cm}$ pour $h = 2 \text{ cm}$ à $\eta = 4 \text{ cm}$ pour $h = 6 \text{ cm}$. Pour des valeurs de h supérieures à 6 cm , on remarque une stabilisation de la hauteur de la vague autour de 4 cm (ligne en pointillés).

De façon conjointe à ce phénomène, on observe qualitativement un étalement longitudinal de la vague, et donc son aplatissement, pour des hauteurs au repos h supérieures à 6 cm .

L'amplitude de la vague formée est non négligeable devant la hauteur d'eau (à titre d'exemple, le rapport η/h varie de 50% à $h = 2 \text{ cm}$, à de 25% à $h = 15 \text{ cm}$), la hauteur judicieuse pour notre étude sera l'altitude totale de l'eau $h + \eta$, ce qui sera justifié dans la modélisation proposée ci-après.

Nous avons mesuré la vitesse de propagation de l'onde pour les différentes expériences en utilisant des diagrammes spatio-temporels réalisés dans le logiciel libre *ImageJ*, indiquant le déplacement de la crête de la vague. Pour chaque vidéo enregis-

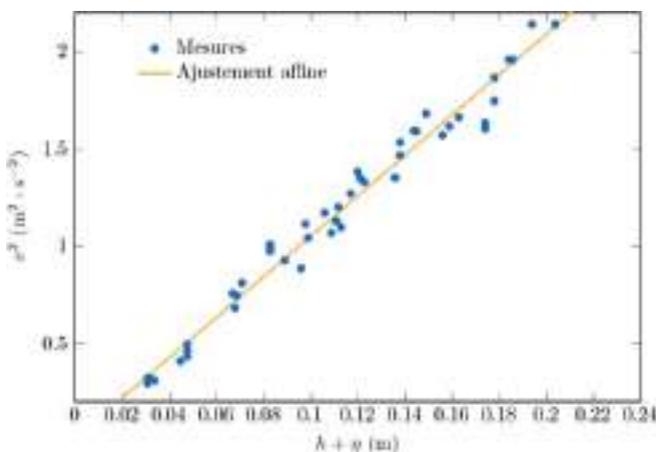


Figure 5 - Mesures de la vitesse de la vague en fonction de la longueur $h + \eta$, où h est la hauteur d'eau au repos et η la hauteur de la vague (voir mesures figure 4, page ci-contre).

trée, la vitesse mesurée est représentée en fonction de $h + \eta$, η ayant été préalablement mesuré (cf. figure 4, pages précédentes). On remarque alors que le carré de la vitesse suit une tendance linéaire en fonction de $h + \eta$, ce que nous justifierons avec le modèle proposé.

1.4. Arrivée sur la côte et déferlement

Comme l'indiquent les relevés océanographiques de la figure 1 (droite), la vague de tsunami peut grandir lors de son arrivée sur le littoral. Cet accroissement peut être la source d'un déferlement particulièrement dévastateur lorsque la vague se brise. Pour explorer qualitativement ce phénomène, nous utilisons la pente inclinée et regardons l'influence de l'angle entre la pente et l'horizontale.

Deux situations peuvent être identifiées, comme montrées sur la figure 6 :

- ◆ la présence d'un déferlement, avec formation d'un rouleau, quand la vague s'effondre sur elle-même (figure 6, gauche) ; et
- ◆ l'absence de déferlement, lorsque la vague s'aplatit et monte sur le plan incliné (figure 6, droite).

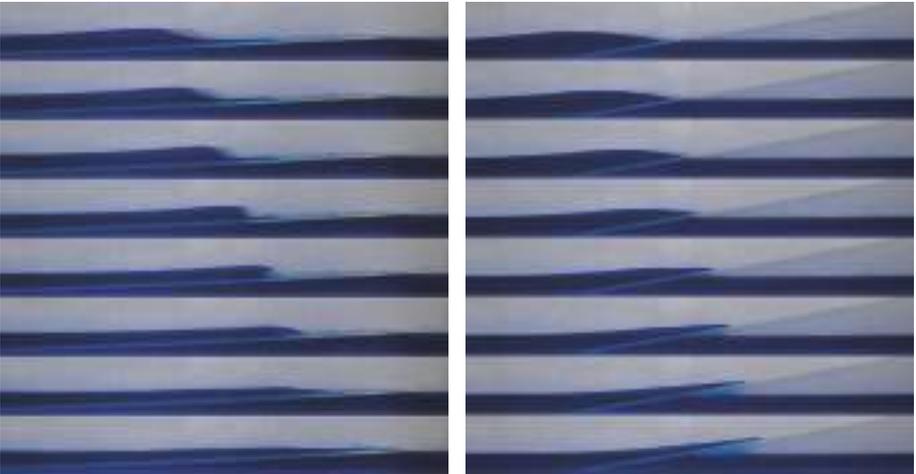


Figure 6 - Chronophotographies de l'arrivée de la vague sur une pente inclinée : dans un cas avec déferlement (gauche) et dans un cas sans déferlement (droite). Temps entre deux images de 0,04 s.

En faisant varier l'angle entre la pente et l'horizontale, il est possible de repérer cette transition d'une situation « propice au déferlement » à une situation « sans déferlement ». Les données figure 7 montrent la probabilité qu'à la vague de déferler en fonction de l'angle de la pente, pour des angles entre 4° et 18° , dans le cas où la hauteur

d'eau au repos est de 6 cm. Les déferlements, observés à petits angles, disparaissent au-delà d'une inclinaison de 8° . Un ajustement par une tangente hyperbolique (courbe figure 7) permet de visualiser cette tendance. Le comportement à très petit angle n'a cependant pas été étudié et il est probable qu'à de très petits angles la probabilité de déferler retombe à zéro, puisqu'un déferlement ne peut pas, semble-t-il, être observé à angle nul.

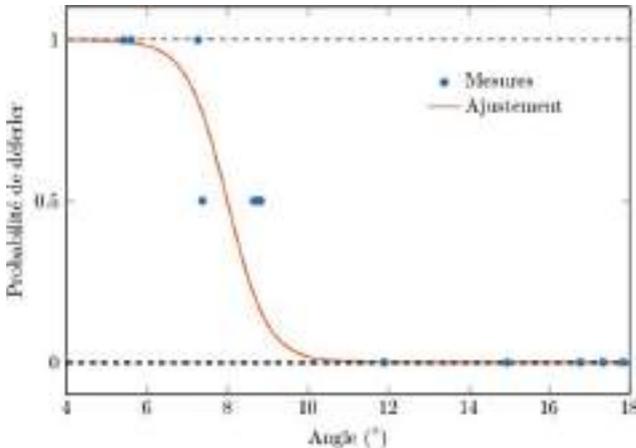


Figure 7 - Présence d'un déferlement en fonction de l'angle, pour une hauteur d'eau de 6 cm.

Cette étude pourrait être affinée en changeant la hauteur d'eau au repos h et en répétant les mesures, mais notre dispositif expérimental ne permet pas d'étudier de façon précise les déferlements à trop petite ou trop grande hauteur d'eau (la pente se mettant à flotter). Néanmoins, il est possible d'observer qualitativement qu'il existe des angles propices au déferlement quand d'autres ne le sont pas, ce qui explique que certains littoraux soient plus facilement sujets aux tsunamis que d'autres.

2. MODÉLISATION

Pour comprendre plus en détail les phénomènes observés, nous proposons une modélisation simple basée sur la théorie des solitons, présentée notamment dans [2, 4] et [6].

2.1. Ondes gravito-capillaires et solitons

On considère un fluide parfait, incompressible, de masse volumique ρ , de tension de surface γ et soumis au champ de pesanteur supposé uniforme g . La surface libre,

prise à une dimension pour simplifier le problème, peut être déformée verticalement et on note alors η l'élévation d'un point de la surface.

Sous l'effet d'une déformation de la surface libre, deux forces différentes agissent de façon à restaurer l'interface horizontale [2, 4] :

- ◆ la force liée à la gravité, à grande échelle, qui tend à restaurer l'équilibre hydrostatique ;
- ◆ la force liée à la tension de surface, à petite échelle, qui tend à privilégier des interfaces ayant la plus petite superficie possible correspondant, ici, à une interface horizontale plane.

La dynamique des ondes ainsi créées, appelées *ondes gravito-capillaires*, est régie par la relation de dispersion suivante, qui découle des équations de Navier-Stokes, reliant la pulsation de l'onde ω au vecteur d'onde k [2, 4] :

$$\omega = \sqrt{\left(gk + \frac{\gamma}{\rho} k^3\right) \tan h(kh)} .$$

Dans nos réalisations expérimentales, les longueurs d'ondes considérées sont toujours supérieures au centimètre et, de fait, la partie *capillaire* peut être négligée devant la partie *gravité* des ondes. La relation de dispersion se réécrit donc :

$$\omega = \sqrt{gk \tan h(kh)} .$$

La vitesse de phase v de l'onde, qui est également la vitesse de l'onde dans ce cas, se calcule simplement en utilisant que $v = \omega/k$. On a alors :

$$v = \sqrt{\frac{g}{k} \tan h(kh)} .$$

On considère le régime d'eau peu profonde, quand $kh \ll 1$, ce qui signifie que la longueur d'onde est grande comparée à la profondeur d'eau au repos h . La tangente hyperbolique peut alors être approximée comme :

$$\tan h(kh) \simeq kh - \frac{(kh)^3}{3} ,$$

d'où l'on déduit :

$$\omega \simeq \sqrt{ghk} \left(1 - \frac{(kh)^2}{6}\right) .$$

Ainsi, à l'ordre zéro en kh , on a l'approximation $\omega \simeq \sqrt{ghk}$, d'où découle une expression approchée de la vitesse de l'onde en régime d'eau peu profonde [2, 4] :

$$v \simeq \sqrt{gh} .$$

Par la suite, on notera $c = \sqrt{gh}$ la vitesse des ondes linéaires en eau peu profondes dans le cas d'un milieu non dispersif.

Dans le cas du soliton, présenté ici, le modèle de l'onde de surface proposé ne peut être directement appliqué. En effet, la hauteur de la vague ne peut pas être négligée devant la hauteur d'eau au repos du fait de la longueur d'onde très grande comparée à

la hauteur d'eau au repos. Pour tenir compte de cet effet, le modèle peut être adapté en considérant non plus la hauteur au repos h seule, mais la hauteur totale donnée par la hauteur au repos h et la hauteur de la vague η [2]. La vitesse du soliton est donnée par :

$$v = \sqrt{g(h + \eta)} \simeq c \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\eta}{h} \right).$$

La figure 5 (cf. pages précédentes) montre les mesures effectuées pour différentes hauteurs $h + \eta$ ainsi qu'un ajustement affine, d'équation : $v^2 = a(h + \eta) + b$, avec $a = 10,0 \pm 0,5 \text{ kg} \cdot \text{ms}^{-2}$ et $b = 0,007 \pm 0,005 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$. Le modèle est donc vérifié et la valeur obtenue pour le coefficient directeur, a , est cohérente avec la valeur prédite $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. L'ordonnée à l'origine est, quant à elle, due à l'incertitude de mesure et ne traduit pas d'écart systématique.

En réalité, un tsunami dans l'océan a une vitesse plus grande que celle mesurée dans nos expériences de plusieurs ordres de grandeur.

2.2. Soliton : équation de Korteweg-de Vries

La relation de dispersion totale, prenant en compte la propagation linéaire ainsi que les effets non linéaires et la dispersivité du milieu, s'écrit [2] :

$$\omega \simeq ck \left(1 - \frac{(kh)^2}{6} + \frac{3}{2} \frac{\eta}{h} \right).$$

Cette relation est associée à l'équation différentielle suivante :

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + c \left(1 + \frac{3}{2} \frac{\eta}{h} \right) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{6} ch^2 \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} = 0.$$

que l'on peut redémontrer à partir des équations de Navier Stokes décrivant la dynamique du fluide [6].

Si l'on note η_0 l'amplitude de la vague, la contribution des termes dispersifs et non linéaires peut être quantifiée par le rapport :

$$\left[\frac{3}{2} \frac{\eta}{h} \right] / \left[\frac{h^2 k^2}{6} \right] \sim \frac{\eta_0}{h^3 k^2},$$

définissant un nombre sans dimension appelé *nombre d'Ursell*. Ainsi, lorsque le nombre d'Ursell est petit devant 1 les effets dispersifs dominent et, au contraire, s'il est grand devant 1 les effets non linéaires dominent la dynamique.

Un changement de variables $s = x - ct$ permet de se placer dans le référentiel de la vague linéaire, et on obtient dans ce cas l'équation de Korteweg-de Vries décrivant l'évolution des solitons hydrodynamiques :

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{3}{2} c \frac{\eta}{h} \frac{\partial \eta}{\partial s} + \frac{ch^2}{6} \frac{\partial^3 \eta}{\partial s^3} = 0.$$

Afin de simplifier l'interprétation de cette équation, on pose $\phi = \eta/h$, $\xi = s/h$ $\tau = t\sqrt{g/h}$ et $\xi = s/h$, variables sans dimension de l'amplitude de la vague, de temps et

de distance. L'équation de Korteweg-de Vries se réécrit alors :

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} + \frac{3}{2} \phi \frac{\partial \phi}{\partial \xi} + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 \phi}{\partial \xi^3} = 0.$$

Cette expression fait intervenir différents termes régissant le comportement de l'onde. Le terme d'évolution temporelle de l'amplitude, tout d'abord :

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau},$$

est relié à un terme caractérisant une propagation dispersive :

$$\frac{1}{6} \frac{\partial^3 \phi}{\partial \xi^3},$$

et à un terme non linéaire :

$$\frac{3}{2} \phi \frac{\partial \phi}{\partial \xi}.$$

La propagation dispersive, d'une part, a tendance à aplatir la vague et à l'étaler, donc à limiter la croissance de l'amplitude. Au contraire, le terme non linéaire tend à resserrer la vague et la faire croître verticalement d'autant plus que l'amplitude est grande. Des raisonnements en ordre de grandeur sur les différents termes permettent de voir quel comportement domine selon la situation, par l'intermédiaire du nombre d'Ursell défini précédemment.

Remarquons également que l'équation est intégrable et admet une solution exacte de la forme :

$$\phi(\xi, \tau) = \phi_0 \operatorname{sech}^2 \left(\sqrt{\frac{3\phi_0}{4}} (\xi - \tau) \right).$$

qui, comme le montre la figure 8, décrit de manière qualitativement satisfaisante le phénomène observé en laboratoire. Cette solution décrit une onde solitaire se type soliton se propageant selon les abscisses positives. Une seconde solution, périodique, existe également, décrivant des ondes cnoïdales [5] qui pourraient être un meilleur modèle de la vague observée dans nos expériences du fait des paramètres utilisés, notamment la très faible profondeur d'eau. Son expression est néanmoins plus complexe et nous ne l'aborderons pas dans cet article.

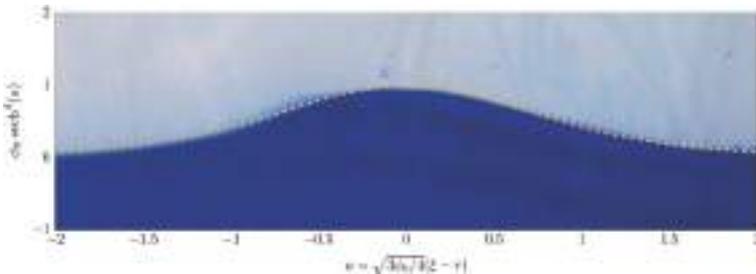


Figure 8 - Modèle théorique (solution des équations de Korteweg-de Vries) superposé à une vague solitaire créée expérimentalement (hauteur d'eau au repos 8 cm).

2.3. Une explication simple du déferlement

En eau très peu profonde, la contribution du terme non linéaire dans l'équation de Korteweg-de Vries peut devenir très importante du fait de la divergence en $1/h$. Ainsi, même pour une vague de faible amplitude, les non-linéarités peuvent devenir un phénomène majeur lorsque la vague créée dans l'expérience se rapproche de la pente ou, dans l'océan, lorsque le tsunami arrive sur le littoral.

Dans l'équation décrivant la dynamique de l'interface, le terme non linéaire agit comme un amplificateur : sa contribution tend à resserrer l'étendue longitudinale de la vague tout en la faisant croître verticalement, et cet effet devient d'autant plus important que l'amplitude de la vague est grande. Lorsque la vague commence à monter sur la pente, h diminue et la contribution des termes non linéaires augmente, conduisant à l'augmentation de l'amplitude η de la vague.

D'autre part, la vitesse de la vague est donnée par la relation :

$$v = \sqrt{g(h + \eta)} \simeq c \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\eta}{h} \right),$$

qui indique une variation de la vitesse avec la hauteur de la vague. On remarque notamment que le sommet de la vague, pour lequel η est maximale, a la vitesse de propagation la plus élevée. Le haut de la vague avançant plus vite en hauteur qu'à sa base, elle devient asymétrique et tend à basculer vers l'avant. À terme, si la vague croît suffisamment, elle peut se casser et déferler [2, 7].

CONCLUSION

À partir d'un modèle simple de génération, propagation et déferlement d'une vague solitaire, nous avons pu mettre en évidence différentes caractéristiques des tsunamis en lien avec la physique des ondes : déplacement d'énergie et non de matière, longueur d'onde et célérité notamment. Nous avons vu que, près des côtes, la hauteur de la vague augmente et mène à un phénomène de déferlement très dangereux. Le dispositif expérimental proposé dans cet article permet d'illustrer de façon qualitative ces différentes étapes, et de vérifier quantitativement certaines lois comme celle donnant la vitesse de propagation de l'onde.

Aujourd'hui, des modèles analogues permettent de mieux comprendre et d'anticiper les tsunamis. Si le phénomène de génération en lui-même (un séisme) ne peut être prédit, la détection de ces vagues a pu être améliorée grâce à des systèmes de balises et de bouées, permettant d'alerter les populations sur les côtes. L'évacuation, permettant d'alerter à temps les populations sur les côtes, ou la présence d'abris en hauteur, peuvent alors sauver des milliers de vies.

BIBLIOGRAPHIE ET NETOGRAPHIE

- [1] C. Brouzet, P. Maurer, et V. de Zotti, « Fabriquons des tsunamis ! », *Culture sciences physiques*, mars 2016. Consultable à l'adresse : <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/tsunami.xml>
- [2] M. Remoissenet, *Waves Called Solitons*, Springer, 1999.
- [3] A. P. French, *Vibrations and Waves*, CBS Publishers and Editors, 2003.
- [4] E. Guyon, J.-P. Hulin et L. Petit, *Hydrodynamique physique*, 3^e éd., EDP Sciences, 2012.
- [5] A. Leroux, *Mise en évidence de nouveaux types de vagues de très grandes amplitudes* (thèse), 2013.
- [6] T. Dauxois, M. Peyrard, *Physics of Solitons*, Cambridge University Press, 2006.
- [7] G. B. Airy, *Tides and Waves*, Fellowes, 1845.

Paru dans Le Bup

- ◆ G. Bouyrie, « L'arpenteur du web : Physique des vagues », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 109, n° 977, p. 1265-1296, octobre 2015.



Samuel BOURY

Doctorant au Laboratoire de physique
École normale supérieure de Lyon (ENS)
Lyon (Rhône)



Lucas MENOUE

Doctorant au Laboratoire de physique
École normale supérieure de Lyon (ENS)
Lyon (Rhône)



Raphaël MENU

Doctorant au Laboratoire de physique
École normale supérieure de Lyon (ENS)
Lyon (Rhône)



Hélène PIOT-DURAND

Doctorante au Laboratoire de physique
École normale supérieure de Lyon (ENS)
Lyon (Rhône)



Jérôme THIBAUT

Doctorant au Laboratoire de physique
École normale supérieure de Lyon (ENS)
Lyon (Rhône)

Mouvement relatif d'un point soumis à l'attraction d'une planète avec un satellite *Évitement ou capture ?*

par Luc DETTWILLER

Lycée Blaise Pascal - 63037 Clermont-Ferrand Cedex

luc.dettwiller@ac-clermont.fr

ON ÉTUDIE, DANS LE CHAMP gravitationnel d'un astre tel que Saturne par exemple, les rencontres rapprochées d'un satellite et d'une particule (comme celle d'un anneau planétaire), en considérant que le mouvement du satellite est toujours circulaire uniforme (dans le référentiel barycentrique de l'astre) ainsi que celui de la particule avant la rencontre (mais avec un rayon légèrement différent). Pour certaines de ces conditions initiales, il est bien connu que la particule évite le satellite malgré son attraction : nous retrouvons ce résultat classique, puis nous montrons comment préciser des caractéristiques de certaines trajectoires après perturbation par le satellite. De plus, nous contraignons numériquement les conditions initiales compatibles avec une capture de la particule par le satellite : c'est un résultat notable, et utile pour l'astronautique.

INTRODUCTION

La mission spatiale de la sonde Cassini, lancée le 15 octobre 1997 et mise en orbite autour de Saturne le 1^{er} juillet 2004, a produit, jusqu'à sa mort programmée par désintégration dans l'atmosphère saturnienne le 15 septembre 2017, une moisson scientifique d'une ampleur exceptionnelle : sur dix ans, accomplissant deux cent six révolutions autour de Saturne, elle a effectué cent trente-deux survols rapprochés des satellites et en a découvert sept dont Daphnis (cf. figures 1 et 2, page ci-après), elle a pris trois cent trente-deux mille photos et transmis 514 Gb de données scientifiques, qui ont fourni matière à trois mille trente-neuf articles de recherche.

Les figures 1 et 2 (cf. page ci-après) montrent un sillon très fin (42 km de largeur maximale) à l'échelle des anneaux de Saturne (le rayon extérieur de l'anneau A valant 136775 km) : c'est la division (ou lacune) de Keeler, creusée par Daphnis (dont la grande dimension vaut 8 km).

L'existence de celle-là n'est pas entretenue par les chocs entre Daphnis et les particules d'anneaux de Saturne, mais par les interactions à distance qui, paradoxalement, ont une apparence répulsive : c'est un des principes de base des « satellites berger » [1]. D'autres jouent aussi ce rôle : Prométhée (cf. figure 3, pages ci-après) est situé du

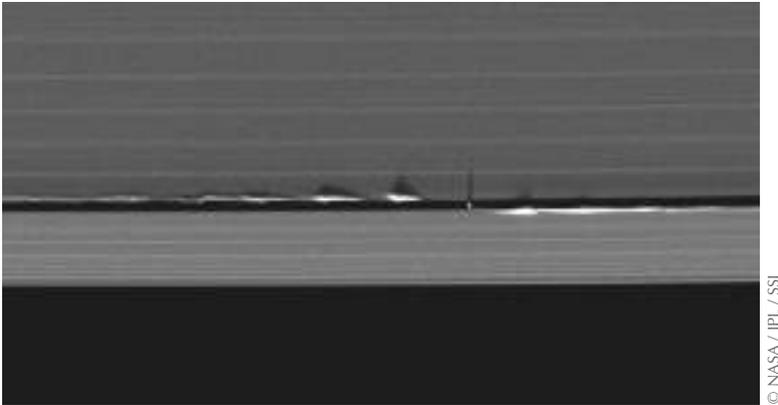


Figure 1 - Découvert par la sonde Cassini en 2005, le satellite Daphnis est responsable de la lacune de Keeler (42 km de large au maximum, située dans l'anneau A de Saturne, tout près du bord extérieur de celui-là visible en bas de cette photo) qui est vue ici par Cassini à quelques jours de l'équinoxe saturnien de 2009. Les vagues soulevées dans l'anneau A sont dues à la petite inclinaison orbitale ($0,0036^\circ$) de Daphnis par rapport au plan des anneaux ; leur hauteur (4 km) est facilement mesurable grâce à leur grande ombre portée en ces jours particuliers.



Figure 2 - Daphnis dans la lacune de Keeler, le 16 janvier 2017 ; son ombre ne s'étend plus sur l'anneau, car l'éclairage solaire n'y est plus rasant comme sur la figure 1.

côté intérieur de l'anneau F, mais le confine des deux côtés, selon un mécanisme plus subtil récemment mis à jour [2] – une antirésonance entre l'anneau et le mouvement radial de Prométhée (d'excentricité orbitale $0,0023$). Quant à Pandore, orbitant juste à l'extérieur de l'anneau F, son rôle dans la finesse de cet anneau (30-500 km) est négligeable, car le confinement dû à l'antirésonance avec Prométhée est plus efficace quand les perturbations dues à Pandore sont négligeables ! [2]

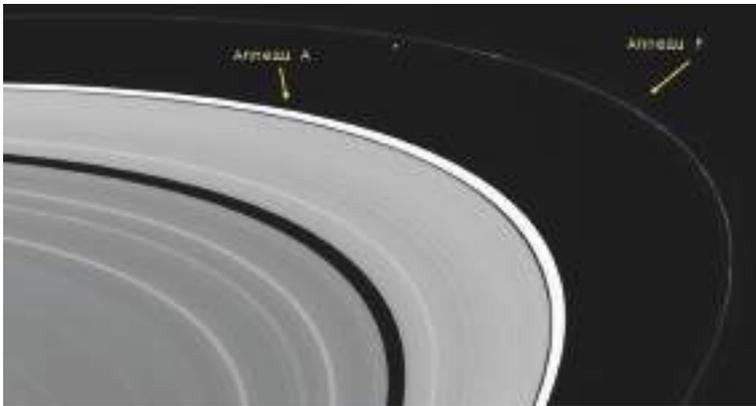


Figure 3 - Anneau A (incluant les lacunes d'Encke puis de Keeler), petit satellite Prométhée (86 km de dimension moyenne), anneau F.

En supposant que l'orbite du satellite est circulaire dans le référentiel barycentrique (\mathcal{B}) de la planète, on ne peut donc plus étudier cette antirésonance subtile, mais il reste qu'on peut comprendre l'apparence répulsive des interactions entre un satellite et des particules d'anneaux – ou au contraire la capture de particules par le satellite – dans ce cadre simplifié : c'est le principe de base du satellite berger – ou de l'insertion en orbite – qui s'avère accessible aux élèves de CPGE (Classe préparatoire aux grandes écoles) ! En les aidant à mettre ce problème en équations, ils peuvent produire en TIPE (Travaux d'initiative personnelle encadrés) des résultats très significatifs à l'aide de *Python*, comme ce fut le cas pour un étudiant de PC* du Lycée Blaise Pascal (Puy-de-Dôme) en 2017-2018, et c'est ce que cet article va montrer.

Pour cela, on commence par mettre en équations le mouvement d'un point matériel P dans un référentiel (\mathcal{R}) – cf. figure 4, page ci-après – où le centre d'inertie O du satellite est fixe (ce choix permettant de visualiser plus facilement l'évolution de l'écart entre P et le satellite) ; la complexité des équations n'est pas un obstacle si on vise seulement l'obtention de solutions numériques approchées avec un ordinateur, mais pour faire apparaître une propriété simple de similitude (bien utile pour transposer facilement les résultats obtenus à d'autres systèmes) on adopte quand même certaines approximations classiques [3-4]. Ensuite, on discute les propriétés des trajectoires de P dans (\mathcal{R}) tracées numériquement par *Python*, avec des conditions initiales correspondant à un mouvement de P coplanaire avec celui de O dans (\mathcal{B}), et circulaire uniforme comme ce dernier avant que P s'approche trop de ce satellite ; on classe les trajectoires en différentes catégories, on indique celles ne présentant pas de capture, et on démontre que les caractéristiques de certaines d'entre elles peuvent se comprendre facilement à l'aide de constantes du mouvement perturbé – ou non – par le satellite. Enfin, on montre (par une représentation en perspective) des trajectoires pour des conditions

initiales correspondant à un mouvement de P circulaire dans (\mathcal{B}) , mais non coplanaire avec celui de O , comme c'est le cas pour les particules d'anneau décrivant les vagues montrées sur la figure 1.

1. MISE EN ÉQUATIONS

1.1. Principe fondamental dans le référentiel (\mathcal{R}) tournant avec le satellite

Commençons par considérer le mouvement d'un satellite (de masse m et assimilé au point O) dans (\mathcal{B}) associé à la planète et supposé galiléen en négligeant les perturbations dues aux autres astres qu'elle – en particulier le Soleil. Pour une planète à symétrie sphérique de centre C et de masse M (valant $568,46 \cdot 10^{24}$ kg *i.e.* 95,152 masses terrestres dans le cas de Saturne), la vitesse angulaire du mouvement circulaire uniforme (de rayon R) du satellite s'écrit

$$\omega = \sqrt{\mathcal{G}M/R^3} \quad (1)$$

où \mathcal{G} désigne la constante de gravitation. Dans cet article, on applique ce résultat au cas de Daphnis (son excentricité orbitale est indécélable, probablement inférieure à 10^{-5}) : sa période de révolution est $2\pi/\omega \cong 14$ h 17 min, car $R \cong 136\,504$ km.

Pour mieux visualiser l'action du satellite sur un point matériel P (par exemple, une particule d'anneau), on étudie désormais les mouvements dans le référentiel (\mathcal{R}) des repères orthonormés directs $Oxyz$ et $Cxyz$ où Cy est dirigé par \mathbf{CO} , Cz étant normal au plan de l'orbite de O dans (\mathcal{B}) – cf. figure 4. Donc C est fixe dans (\mathcal{R}) , qui n'est pas galiléen – dans la base orthonormée directe $(\mathbf{u}_x, \mathbf{u}_y, \mathbf{u}_z)$ associée à $Cxyz$, le vecteur rotation de (\mathcal{R}) par rapport à (\mathcal{B}) est constant si on néglige l'action de la particule sur le satellite (comme dans le « problème à trois corps restreint ») et s'écrit $\boldsymbol{\Omega} = -\omega \mathbf{u}_z$, car nous prenons le sens de Cz du nord vers le sud de Saturne.

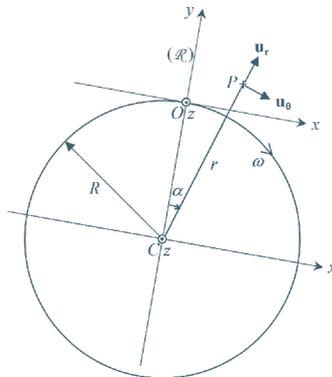


Figure 4 - Vue du côté sud de la trajectoire circulaire de O dans (\mathcal{B}) , et repère $Oxyz$ du référentiel (\mathcal{R}) servant à étudier le mouvement du point P – de coordonnées cylindriques (r, α, z) .

D'après le théorème de la résultante dynamique dans (\mathcal{R}) , l'accélération de P dans (\mathcal{R}) s'écrit (en tenant compte des accélérations d'entraînement et de Coriolis)

$$\mathbf{a} = -\mathcal{G}M \frac{\mathbf{CP}}{\|\mathbf{CP}\|^3} - \mathcal{G}m \frac{\mathbf{OP}}{\|\mathbf{OP}\|^3} - \boldsymbol{\Omega} \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{CP}) - 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v} \quad (2)$$

où \mathbf{v} désigne sa vitesse dans (\mathcal{R}) . Notons au passage qu'en décomposant \mathbf{CP} en $\mathbf{CO} + \mathbf{OP}$ puis en sommant les termes $-\mathcal{G}M \frac{\mathbf{CP}}{\|\mathbf{CP}\|^3}$ et $-\boldsymbol{\Omega} \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{CO})$, on fait apparaître le champ de marée dû à la planète au voisinage de son satellite, auquel se rajoute le terme « centrifuge » $-\boldsymbol{\Omega} \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{OP})$ par rapport à celui-ci. En projetant sur $(\mathbf{u}_x, \mathbf{u}_y, \mathbf{u}_z)$ et en notant (x, y, z) les coordonnées de P dans le repère $Oxyz$, il vient

$$\ddot{x} = -\mathcal{G}M \frac{x}{[x^2 + (R + y)^2 + z^2]^{3/2}} - \mathcal{G}m \frac{x}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} + \omega^2 x - 2\omega \dot{y} \quad (3)$$

$$\ddot{y} = -\mathcal{G}M \frac{R + y}{[x^2 + (R + y)^2 + z^2]^{3/2}} - \mathcal{G}m \frac{y}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} + \omega^2 (R + y) + 2\omega \dot{x} \quad (4)$$

$$\ddot{z} = -\mathcal{G}M \frac{z}{[x^2 + (R + y)^2 + z^2]^{3/2}} - \mathcal{G}m \frac{z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}}. \quad (5)$$

Or, à l'ordre total 1 en (x, y, z) ,

$$\frac{\mathcal{G}M}{[x^2 + (R + y)^2 + z^2]^{3/2}} \cong \omega^2 \left(1 - 3 \frac{y}{R}\right) \quad (6)$$

donc à cet ordre les équations précédentes se simplifient pour $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \ll R$:

$$\ddot{x} = -2\omega \dot{y} - \mathcal{G}m \frac{x}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \quad (7)$$

$$\ddot{y} = 2\omega \dot{x} + 3\omega^2 y - \mathcal{G}m \frac{y}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \quad (8)$$

$$\ddot{z} = -\omega^2 z - \mathcal{G}m \frac{z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}}. \quad (9)$$

Ces équations sont celles de Hill qui visent à étudier de manière simplifiée le mouvement du centre P de la Lune, O et C étant ceux de la Terre et du Soleil respectivement [3] ; malgré la simplification assumée, elles ne donnent qu'une seule intégrale première et ne forment pas un système intégrable, alors pour étudier leurs solutions on fait appel à des développements en série, ou à d'autres approximations analytiques ou numériques. Notons que si on annule m dans les équations (7)-(9), on retrouve les équations bien connues de Clohessy-Wiltshire [4], qui forment un système intégrable et même linéaire, très utile pour gérer les rendez-vous orbitaux – entre la station spatiale internationale (ISS pour *International Space Station*) et les cargos ravitailleurs automatisés ATV (*Automated Transfer Vehicle*), par exemple.

1.2. Obtention d'équations adimensionnées

Dans la perspective de devoir rechercher informatiquement une approximation numérique des solutions du système différentiel (7)-(9), il est bon de présenter celui-ci

sous une forme adimensionnée, avec des coefficients de l'ordre de l'unité [5]. Pour y parvenir, on procède en deux temps.

Première étape

On considère des fonctions, non plus de la variable t , mais de la variable adimensionnée $\tau := \omega t$ (qui varie de 2π sur une période orbitale du satellite) ; cela donne

$$\frac{d^2x}{d\tau^2} = -2 \frac{dy}{d\tau} - \frac{Gm}{\omega^2} \frac{x}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \quad (10)$$

$$\frac{d^2y}{d\tau^2} = 2 \frac{dx}{d\tau} + 3y - \frac{Gm}{\omega^2} \frac{y}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \quad (11)$$

$$\frac{d^2z}{d\tau^2} = -z - \frac{Gm}{\omega^2} \frac{z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}}. \quad (12)$$

Deuxième étape

On utilise, comme échelle de longueur naturelle a de notre problème, le rayon de Hill du satellite par rapport à la planète (en omettant son préfacteur sans dimension) [6] :

$$a := (m/M)^{1/3} R. \quad (13)$$

Alors on considère les grandeurs adimensionnées $X := x/a$, $Y := y/a$ et $Z := z/a$; il vient

$$\frac{d^2X}{d\tau^2} = -2 \frac{dY}{d\tau} - \frac{X}{(X^2 + Y^2 + Z^2)^{3/2}} \quad (14)$$

$$\frac{d^2Y}{d\tau^2} = 2 \frac{dX}{d\tau} + 3Y - \frac{Y}{(X^2 + Y^2 + Z^2)^{3/2}} \quad (15)$$

$$\frac{d^2Z}{d\tau^2} = -Z - \frac{Z}{(X^2 + Y^2 + Z^2)^{3/2}}. \quad (16)$$

Nous utiliserons *Python* pour traiter numériquement le système différentiel (14)-(16). Pour discuter les propriétés de ses solutions, nous nous servirons de l'intégrale première

$$E := \frac{1}{2} \left[\left(\frac{dX}{d\tau} \right)^2 + \left(\frac{dY}{d\tau} \right)^2 + \left(\frac{dZ}{d\tau} \right)^2 \right] - \frac{3Y^2}{2} + \frac{Z^2}{2} - \frac{1}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}} \quad (17)$$

– $dE/d\tau$ étant évidemment nul car dans son expression les dérivées premières s'éliminent à cause de (14)-(16), conformément à la nullité de la puissance de la force de Coriolis.

1.3. Conditions initiales

Sauf mention contraire, nous nous restreignons dorénavant aux mouvements qui ont lieu dans le plan xOy – ce qui est possible moyennant des conditions initiales

(position de P et vitesse) dans ce plan, faisant que la fonction $z = 0$ est solution de l'équation (5) – et donc $Z = 0$ de l'équation approximative (16) *a fortiori*. On considère ainsi les équations simplifiées

$$\frac{d^2 X}{d\tau^2} = -2 \frac{dY}{d\tau} - \frac{X}{(X^2 + Y^2)^{3/2}} \quad (18)$$

$$\frac{d^2 Y}{d\tau^2} = 2 \frac{dX}{d\tau} + 3 Y - \frac{Y}{(X^2 + Y^2)^{3/2}}. \quad (19)$$

Loin de la sphère d'influence du satellite (donc si et seulement si $X^2 + Y^2 + Z^2 \gg 1$), toute particule P d'anneau a dans (\mathcal{B}) , en première approximation, un mouvement quasi circulaire dans le plan xCy et képlérien, essentiellement régi par l'attraction de la planète. Alors dans (\mathcal{R}) , le mouvement de P est aussi circulaire de centre C , puisque sa distance à C reste encore constante et que xCy est fixe dans (\mathcal{R}) ; mais la vitesse angulaire n'est pas la même que dans (\mathcal{B}) . De plus, dans l'approximation d'ordre total 1 en (x, y) , le mouvement de P dans (\mathcal{R}) est rectiligne uniforme parallèle à Ox , conformément à l'équation (14) avec $(X^2 + Y^2 + Z^2)^{3/2} \gg 1$ (la courbure de la trajectoire vers C étant insensible tant que $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \ll R$, *i.e.* $\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \ll (M/m)^{1/3}$ qui vaut $19 \cdot 10^3$ dans le cas de Saturne avec Daphnis), donc $d^2 Y/d\tau^2$ est nul et $dX/d\tau$ vaut $-3Y/2$ d'après (15) avec $(X^2 + Y^2 + Z^2)^{3/2} \gg 1$; la force de Coriolis compense la résultante de l'attraction par la planète et de la force d'inertie d'entraînement.

Notre but est d'étudier les perturbations de ce mouvement simple dues à l'approche progressive entre P et O , *i.e.* à la diminution de $|x|/a$ à partir de valeurs grandes devant 1. Ainsi, comme conditions initiales (désignées par l'indice 0), nous prendrons

$$1 \ll |X_0| \ll (M/m)^{1/3} \quad \text{et} \quad \left(\frac{dX}{d\tau}\right)_0 = -\frac{3}{2} Y_0 ; \left(\frac{dY}{d\tau}\right)_0 = 0 \quad (20)$$

et $|Y_0| \ll (M/m)^{1/3}$ mérite alors d'être appelé « paramètre d'impact réduit ».

2. CODE PYTHON

La programmation ne présente aucune difficulté, et se trouve résumée sur la figure 5 (cf. page ci-après).

3. DISCUSSION DES MOUVEMENTS DANS LE PLAN ORBITAL DU SATELLITE

L'approximation d'ordre 1 en (x, y) , puis l'obtention d'équations adimensionnées, fait apparaître une propriété de similitude : si (M, R) change, l'ensemble des mouvements est changé en un ensemble similaire, où seule diffère l'échelle spatio-temporelle. Ainsi, les trajectoires réduites montrées par les figures 6 à 8 (cf. pages ci-après) sont valables quel que soit (M, R) .

La famille de trajectoires obtenue numériquement dans le plan XOY avec les

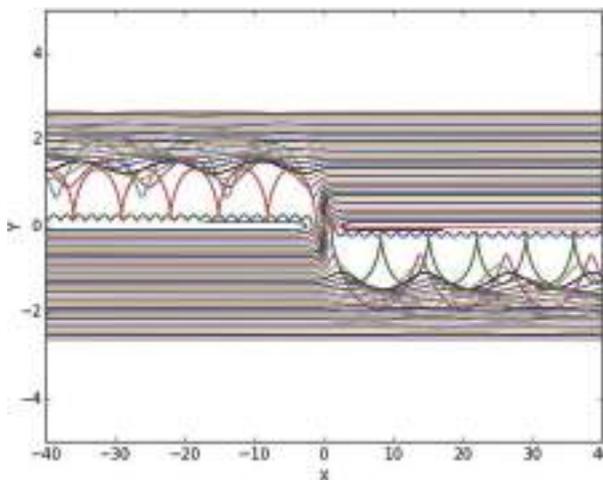
```

22 def deriv(syst, t):
23     [x,y,z,vx,vy,vz] = syst
24     dxdt = vx
25     dydt = vy
26     dzdt = vz
27     dvxdt = -2*vy*x/(x**2+y**2+z**2)**3/2
28     dvydt = 2*vz*y/(x**2+y**2+z**2)**3/2
29     dvzdt = -z-z/(x**2+y**2+z**2)**3/2
30     return [dxdt, dydt, dzdt, dvxdt, dvydt, dvzdt]
31
32 start = -100
33 end = 100
34 numsteps = 10000
35 t = linspace(start, end, numsteps)
36
37 for j in range(1,30):
38     for i in range(1,30):
39         xlabel("X")
40         ylabel("Y")
41         xlim(-8,8)
42         ylim(-2,2)
43         pas = 8*10**(-2)
44         x0, y0, z0 = 8*(-1)**j, 1*pas*(-1)**j, 0
45         vx0, vy0, vz0 = -3*y0/2, 0, 0
46         syst_CI = array([x0, y0, z0, vx0, vy0, vz0])
47         Sols = odeint(deriv,syst_CI,t)
48         pyplot.plot ( Sols[:, :6] , Sols[:, :3])
49
50 pyplot.show()
51

```

© Mathieu Boschat (TIPE)

Figure 5 - Partie du code *Python* écrit afin de tracer trente trajectoires pour trente paramètres d'impact différents.



© Mathieu Boschat (TIPE)

Figure 6 - Trajectoires pour divers paramètres d'impact réduits, multiples successifs de 0,09 – quand ils sont négatifs (resp. positifs) le déplacement initial est dans le sens des X croissants (resp. décroissants).

conditions initiales (20) est représentée sur les figures 6 (cf. page ci-contre) et 7 (cf. page ci-après), pour τ variant de -100 à 100 (ce qui correspond à $200/2\pi \cong 31,8$ révolutions de O dans (\mathcal{B}) autour de C).

3.1. Types de trajectoires

On voit bien que les trajectoires à grand paramètre d'impact ($|Y_0| \gg 1$) et donc à grande vitesse relative ($|dX/d\tau| \gg 1$) sont, sur la figure 6 (cf. page ci-contre), quasi rectilignes. Pour elles en effet : d'une part $\sqrt{X^2 + Y^2} \gg 1$ donc le mouvement de P dans (\mathcal{B}) est régi presque uniquement par l'attraction de la planète, et vu les conditions initiales la trajectoire est quasiment circulaire uniforme de centre C , même dans (\mathcal{R}) ; d'autre part la courbure de cette trajectoire est imperceptible sur la figure 6, puisque sur elle $\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \ll (M/m)^{1/3}$ conformément à la condition énoncée au sous-paragraphe 1.3. En diminuant progressivement $|Y_0|$, la perturbation du mouvement de P par le satellite devient de plus en plus sensible, comme le montrent les figures 6 (cf. page ci-contre) et 7 (cf. page ci-après) dont nous résumons les enseignements en distinguant cinq types de trajectoires, par ordre de paramètre d'impact décroissant :

- i. celles qui ont un paramètre d'impact assez élevé devant a restent quasi rectilignes horizontales – comme cela correspond au mouvement *sans la perturbation due au satellite*, on peut le qualifier de « régime libre » ;
- ii. celles qui ont un paramètre d'impact légèrement plus grand que a : l'abscisse change encore de signe, et elles présentent ensuite des oscillations de l'ordonnée (entre Y_m et Y_M qui ont même signe que Y_0) – d'abord un rapprochement du satellite, puis un éloignement à cause du changement de la force de Coriolis dû à celui de la vitesse. L'amplitude de ces oscillations augmente lorsque la valeur absolue du paramètre d'impact diminue, et pour $|Y_0|$ très proche de 1 (voir les courbes rouge et verte pour $Y_0 = \pm 1,0$ sur la figure 7 zoomée – cf. page ci-après), la trajectoire présente une boucle près de O , avant de sortir presque verticalement de cette figure ;
- iii. celles qui ont un paramètre d'impact réduit compris entre 0,3 et 1,0 : sous l'effet du satellite, elles s'en approchent si près qu'on ne sait pas, d'après l'examen des figures 6 (cf. page ci-contre) et 7 (cf. page ci-après), ce qu'elles deviennent ensuite – il n'est pas exclu que P soit capturé par le satellite, *i.e.* se mette à tourner autour de lui, ou même qu'il arrive en O ;
- iv. celles qui ont un paramètre d'impact réduit compris entre 0,1 et 0,3 : l'ordonnée change de signe, mais pas l'abscisse, et elles présentent ensuite des oscillations de l'ordonnée sans changement ultérieur de signe de celle-ci. Comme en ii., la période de $Y(\tau)$ est alors très proche de 2π , car le demi-grand axe de l'ellipse dans (\mathcal{B}) correspondant au cas du régime libre reste très proche de R . Si la période de $Y(X)$ change notablement, c'est donc que la moyenne de $dX/d\tau$ sur une période change beaucoup avec Y_0 (et on note $(dX/d\tau)_m$ – resp. $(dX/d\tau)_M$ – la valeur de $dX/d\tau$

quand Y vaut Y_m – resp. Y_M) ; pour la trajectoire rouge (cf. figure 6, pages précédentes), la moyenne de $dX/d\tau$ est beaucoup plus grande que pour la trajectoire verte en valeur absolue – quel changement pour une si petite variation de $|Y_0|$, de 0,27 à 0,18 ! En dessous de 0,27, on observe que l'amplitude des oscillations de Y diminue lorsque $|Y_0|$ décroît ;

- v. celles qui ont un paramètre d'impact réduit inférieur à 0,1 ne présentent plus d'oscillations sensibles, mais seulement un demi-tour dans (\mathcal{R}) (cf. figure 7) : à très petit paramètre d'impact, quand la force due au satellite n'est pas négligeable elle est quasi orthoradiale, la trajectoire initialement circulaire dans (\mathcal{B}) le reste, mais avec un rayon changé – il passe de l'autre côté de celui de l'orbite du satellite. Même dans ce cas l'interaction a une apparence répulsive, et une capture de P par le satellite semble ne jamais se produire avec $|Y_0| < 0,1$. La vitesse initiale tend vers 0 quand $|Y_0|$ tend vers 0, alors le mouvement de P est de plus en plus lent : sur la figure 6 (cf. pages précédentes), on voit en effet que les trajectoires (bleues) correspondant à $|Y_0|$ le plus petit sont aussi les plus courtes.

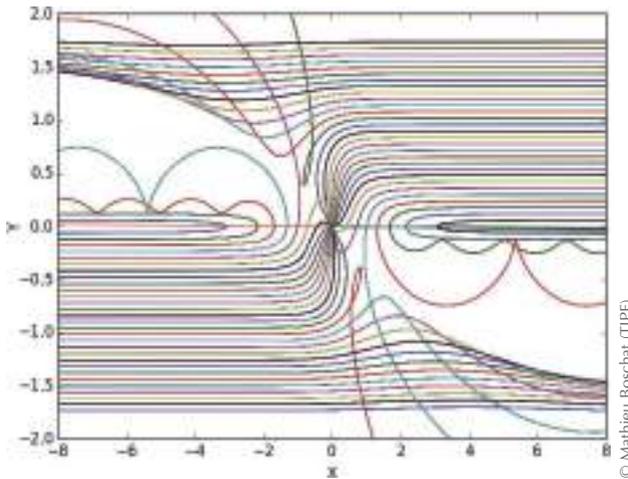


Figure 7 - Zoom sur les trajectoires proches du satellite O (situé à l'origine), leurs paramètres d'impact réduits étant des multiples successifs de 0,06 (cf. figure 5)

3.2. Utilisation de la loi des aires en régime libre

Nous considérons ici le mouvement de P lorsqu'il est sorti de la sphère d'influence du satellite.

Les ondulations dans (\mathcal{R}) , décrites pour les trajectoires de type ii. et iv., sont quasi périodiques pour $\sqrt{X^2 + Y^2} \gg 1$ – donc quand le mouvement de P est périodique et régi presque uniquement par l'attraction de la planète ; sa trajectoire dans (\mathcal{B}) est alors

quasiment une ellipse dont C est un foyer. Cela correspond à un autre régime libre. La perturbation par le satellite est dominante au voisinage de O seulement, au niveau d'une portion où $\sqrt{X^2 + Y^2} < 1$, minime à l'échelle de la figure 6 (cf. pages précédentes). Si le paramètre d'impact est assez grand, les ondulations sont quasi sinusoïdales [7].

Les différences relatives entre les écarts d'abscisses entre sommets successifs de l'ondulation pour différentes trajectoires sont dues aux différences relatives de $dX/d\tau$ associées à celles de Y , qui ne sont pas du tout négligeables en vertu de la loi des aires. En effet, la constante des aires s'écrit

$$C = r^2 (\omega + \dot{\alpha}) \quad (21)$$

où α désigne l'angle de \mathbf{CO} vers \mathbf{CP} – cf. figure 1. Or pour un mouvement dans xOy on a

$$r^2 = x^2 + (R + y)^2 \quad \text{et} \quad \alpha = \arctan \frac{x}{R + y} \quad \text{si} \quad R + y > 0. \quad (22)$$

À l'ordre total 1 en (x, y) on a

$$C \cong (R^2 + 2Ry) \left(\omega + \frac{\dot{x}}{R} \right) \cong R^2 \omega + 2R\omega y + R \dot{x} \quad (23)$$

donc

$$\dot{C} \cong 2R\omega \dot{y} + R \ddot{x} = 0 \quad (24)$$

en vertu de l'équation (7) avec $m = 0$. On en déduit que quand y augmente, \dot{x} diminue (loi des aires avec $m = 0$). En variables adimensionnées, on trouve

$$\frac{dX}{d\tau} + 2Y := K \text{ constant si } (X^2 + Y^2)^{3/2} \gg 1. \quad (25)$$

Avec les conditions initiales (20) cela donne $K = Y_0/2$ avant que l'interaction avec le satellite soit notable, et $E = -3Y_0^2/8$.

Pour les trajectoires de type v., K a changé de signe à l'occasion du passage auprès de O : auparavant il valait quasiment $Y_0/2$, et après ce passage rapproché il vaut $Y/2$ avec Y de signe contraire à Y_0 , donc $Y = -Y_0$ à cause de la conservation de E lors du passage rapproché ; cette relation est bien corroborée par la figure 7 (cf. page ci-contre). Pour les trajectoires de type iv. et ayant (voir la rouge et la verte correspondant à $Y_0 = \pm 0,27$ sur la figure 6, pages précédentes) des points de rebroussement (d'ordonnée Y_m de signe contraire à Y_0 – cf. sous-paragraphe 3.3.), K a aussi changé de signe à l'occasion du passage auprès de O , car aux points de rebroussement $dX/d\tau$ est nul, donc bien après ce passage rapproché $K \cong 2Y_m$. Pour les trajectoires des types i. et ii., K ne change pas de signe.

À gauche de O les ondulations sont telles que $dX/d\tau = K - 2Y < 0$ donc $|dX/d\tau|$ croît avec Y .

3.3. Propriétés des extrema d'ordonnée en régime libre

Sachant que $dY/d\tau$ est nul aux extrema de Y , les constantes du mouvement E

et K (dans le régime libre seulement pour la seconde) permettent de trouver des propriétés de ces extrema. En effet, en régime libre (donc loin de la sphère d'influence du satellite), on a

$$(dX/d\tau)_M^2 - 3Y_M^2 = (dX/d\tau)_m^2 - 3Y_m^2 = -3Y_0^2/4 \quad (26)$$

et
$$(dX/d\tau)_M + 2Y_M = (dX/d\tau)_m + 2Y_m. \quad (27)$$

On en tire

$$(dX/d\tau)_M + (dX/d\tau)_m = \frac{(dX/d\tau)_M^2 - (dX/d\tau)_m^2}{(dX/d\tau)_M - (dX/d\tau)_m} = \frac{3(Y_M^2 - Y_m^2)}{2(Y_M - Y_m)} = -3 \frac{Y_M + Y_m}{2} \quad (28)$$

et
$$(dX/d\tau)_M - (dX/d\tau)_m = -2(Y_M - Y_m). \quad (29)$$

Ainsi, pour Y_0 donné, si en plus on connaît une des grandeurs parmi Y_m , Y_M , $(dX/d\tau)_m$ et $(dX/d\tau)_M$, l'ensemble des trois autres peut être déterminé moyennant une équation du second degré, donc il y a en général deux possibilités pour ce triplet.

Un exemple intéressant d'une telle situation est fourni par les points de rebroussement présents sur certaines trajectoires, car pour eux $(dX/d\tau)_m = 0$. Alors la comparaison de (28) et (29) donne

$$3(Y_M + Y_m) = 4(Y_M - Y_m) \quad \text{d'où} \quad Y_M = 7Y_m, \quad (30)$$

et de plus (26) fournit $3Y_m^2 = 3Y_0^2/4$ donc $|Y_m| = |Y_0|/2$, (31)

puis enfin (27) donne $(dX/d\tau)_M = -12Y_m$ (32)

donc pour $(Y_m, Y_M, (dX/d\tau)_M)$ il y a deux possibilités : $(Y_0/2, 7Y_0/2, -6Y_0)$ et $(-Y_0/2, -7Y_0/2, +6Y_0)$. Les trajectoires rouge et verte correspondant à $Y_0 = \pm 0,27$ sur la figure 6 (cf. pages précédentes) corroborent bien Y_m et Y_M de la seconde solution.

3.4. Contraintes concernant les cas de capture de P par le satellite

Si le mouvement de P était purement képlérien – par exemple s'il n'y avait que le deuxième terme du membre de droite dans les équations (3)-(5) – les trajectoires dans (\mathcal{R}) seraient des coniques, et quelles que soient les conditions initiales il n'y aurait jamais de capture. Celle-ci n'est réalisable que grâce aux perturbations du mouvement képlérien ; l'étude correspondante est délicate, donc tout résultat est le bienvenu sur ce sujet. Numériquement nous en avons obtenu un : avec nos conditions initiales (20), une capture de P par O ne semble possible que pour les trajectoires de type iii. – cf. la discussion du sous-paragraphe 3.1. Cela pourrait être une capture temporaire [8] – i.e. un mouvement dans le référentiel barycentrique de O donnant temporairement à P une orbite quasi elliptique (dont O est un foyer) suivie au moins sur un tour. Par exemple, les comètes P/Gehrels 3 et P/Helin-Roman-Crockett ont été temporairement capturées par Jupiter [9-10] : pour la dernière, ce fut le cas peu avant sa découverte en janvier 1989, probablement de décembre 1973 à juillet 1985 ; les figures 2 et 5 de [10] montrent respectivement sa trajectoire dans (\mathcal{R}) pour cet épisode récent et celle qui sera

suivie lors de la future capture encore par Jupiter vers 2075. Dans le domaine de l'astro-nautique, de tels effets sont intéressants aussi, notamment pour la sonde BepiColombo qui est partie le 19 octobre 2018 et devrait se mettre en orbite autour de Mercure le 5 décembre 2025 ; comme cette planète n'a pas d'atmosphère, on ne peut compter sur l'aérofreinage pour effectuer la mise en orbite, donc on compte sur une approche assez douce obtenue au bout de neuf assistances gravitationnelles (une par la Terre, deux par Vénus et six par Mercure) pour que l'insertion en orbite puisse avoir lieu même sans allumer les propulseurs.

4. ÉTUDE DES PETITS ÉCARTS PAR RAPPORT AU PLAN ORBITAL DU SATELLITE

Dans le cadre du TIPE de Mathieu Boschat, a été proposée une rapide discussion des vagues soulevées dans les anneaux (cf. la figure 1, pages précédentes) juste après le passage rapproché de Daphnis, à cause de sa légère inclinaison orbitale par rapport au plan des anneaux. Quoique faute de temps ce ne soit qu'une ébauche, nous en présentons ici un des résultats : une vue en perspective des trajectoires obtenues pour des conditions initiales correspondant à un mouvement de P circulaire dans (\mathcal{B}) , mais non coplanaire avec celui du satellite – cf. figure 8.

Elle fait comprendre que le passage rapproché du satellite envoie progressivement les particules non capturées sur des trajectoires elliptiques dans (\mathcal{B}) qui ne sont plus dans le plan des anneaux : sur cette figure 8, on reconnaît les ondulations typiques du régime libre déjà discuté au paragraphe précédent, mais on voit qu'elles semblent se pencher quand elles sont assez loin du satellite – ceci étant dû à la vue en perspective de leur sortie du plan des anneaux.

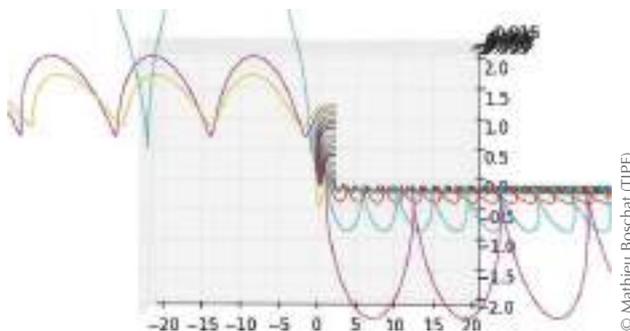


Figure 8 - Vue en perspective de trajectoires sortant du plan équatorial de la planète.

CONCLUSION

Au terme de notre étude, il y a pour le TIPE de l'élève l'immense satisfaction

d'avoir obtenu des tracés de trajectoires très ressemblants à ceux publiés dans des articles de recherche traitant de ce sujet en utilisant probablement d'autres outils informatiques. En plus, pour les trajectoires présentant des points de rebroussement, nous donnons – voir les équations (30)-(32) – des propriétés inédites, à notre connaissance. Il nous paraît intéressant aussi de constater que, si on souhaite produire (par exemple pour une sonde spatiale) un mouvement tel qu'il y ait une capture de P par le satellite (*i.e.* une insertion de P en orbite autour de lui sans allumage des propulseurs) avec les conditions initiales que nous avons considérées, il faut non seulement que le paramètre d'impact soit assez petit (*i.e.* inférieur à a), mais pas trop (*i.e.* supérieur à $0,3 a$) !

Cependant pour l'étude des mouvements de P dans le référentiel (\mathcal{R}) associé à Daphnis, les valeurs numériques $m \cong 84 \cdot 10^{12}$ kg et donc $a \cong 53 \cdot 10^{-6} R \cong 7,2$ km nous obligent à dire que notre modèle n'est pas du tout réaliste ! En effet, comme tous les petits corps, Daphnis n'est pas du tout sphérique (cf. figure 2, pages précédentes) et la faiblesse de sa masse m comparée à celle de Saturne (M), avec le fait que R est à peine supérieur au diamètre équatorial saturnien (120 536 km), font que le rayon a de la sphère d'influence de Daphnis est plus petit que sa grande dimension (8 km) ! Donc dans cette sphère, où passent les trajectoires les plus perturbées par Daphnis, il n'est guère légitime d'approximer son champ gravitationnel par $-Gm \frac{\mathbf{OP}}{\|\mathbf{OP}\|^3}$ comme dans [1-3,7-8,10] et comme nous l'avons fait dans l'équation (2)... L'étude fine du mouvement de P perturbé par le satellite se trouve donc loin d'être achevée.

À titre d'ouverture supplémentaire, si on considère maintenant que P et le satellite ont des masses comparables, au point que celui-ci soit aussi une particule d'anneau, alors il n'est plus acceptable de dire que le mouvement de O dans (\mathcal{B}) est circulaire uniforme – on ne peut plus négliger l'action de P sur le satellite de masse m ! La situation est encore plus complexe que précédemment, où la masse de P était très petite devant m . Les types de trajectoires se classent toujours en fonction du paramètre d'impact, mais les valeurs intéressantes de celui-ci se regroupent en un ensemble du type de celui de Cantor : la diffusion mutuelle des deux particules est chaotique ! [11]

BIBLIOGRAPHIE

- [1] P. Goldreich and S. Tremaine, "Towards a theory for the Uranian rings", *Nature*, **277**, p. 97-99, 1979.
- [2] J. N. Cuzzi, A. D. Whizin, R. C. Hogan, A. R. Dobrovolskis, L. Dones, M. R. Showalter, J. E. Colwell and J. D. Scargle, "Saturn's F Ring core: Calm in the midst of chaos", *Icarus*, **232**, p. 157-175, 2014.
- [3] G. W. Hill, "Researches in the lunar theory", *Am. J. Math.*, **1**, p. 5-26, 1878.

- [4] W. H. Clohessy and R. S. Wiltshire, “Terminal Guidance System for Satellite Rendezvous”, *Journal of Aerospace Sciences*, **27**, p. 653–658, 1960.
- [5] M. Renard et L. Dettwiller, « Les “dix commandements” de la simulation numérique en sciences physiques illustrés par l’étude des points de Lagrange », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 98, n° 868 (2), p. 87–109, novembre 2004.
- [6] S. Raymond, “Hill Radius / Sphere”, in M. Gargaud et al. (éds), *Encyclopedia of Astrobiology*, Berlin : Springer, 2011.
- [7] M. R. Showalter and J. A. Burns, “A numerical study of Saturn’s F ring”, *Icarus*, **52**, p. 526–544, 1982.
- [8] K. C. Howell, B. G. Marchand and M. W. Lo, “Temporary satellite capture of short-period Jupiter family comets from the perspective of dynamical systems”, *Journal of the Astronautical Sciences*, **49**, p. 539–557, 2001.
- [9] H. Rickman, “Recent Dynamical History of the Six Short-Period Comets Discovered in 1975”, in R. L. Duncombe éd., *Dynamics of the Solar System*, D. Reidel Publ. Co., Hollande : Dordrecht, 1979.
- [10] G. Tancredi, M. Lindgren and H. Rickman, “Temporary satellite capture and orbital evolution of comet P/Helin-Roman-Crockett”, *Astron. Astrophys.*, **239**, p. 375–380, 1990.
- [11] J. M. Petit and M. Hénon, “Satellites encounters”, *Icarus*, **66**, p. 536–555, 1986.



Luc DETTWILLER

Professeur en PC*

Lycée Blaise Pascal

Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme)

Projet Rétinac : voir le son

Partie 1 : les interférences acoustiques

par Jean-Christophe JOUAN, Yves CHRIQUI,
Violette KUBIACZYK et Ambre DESHAYES

Lycée militaire de Saint-Cyr-l'École - 78210 Saint-Cyr-l'École
jean-christophe.jouan1@ac-versailles.fr
yves.chriqui@ac-versailles.fr

NOUS PROPOSONS UN MONTAGE qui traduit visuellement les phénomènes acoustiques, notamment la répartition de l'intensité acoustique dans l'espace. Il est ensuite utilisé pour visualiser et étudier les phénomènes d'interférences et de diffraction dans le domaine des ultrasons.

INTRODUCTION

Cet article reprend et prolonge le travail effectué par des élèves dans le cadre d'un projet présenté aux Olympiades de Physique France en 2019 [1], au cours duquel ils ont développé une rétine acoustique permettant de visualiser les phénomènes acoustiques et la répartition de l'intensité acoustique dans l'espace. Le montage nous a permis de revisiter quelques expériences classiques d'interférences et de diffraction et d'obtenir des figures inédites dans le domaine de l'acoustique. Après une description de la rétine acoustique, nous présentons les figures obtenues dans le cadre des interférences ultrasonores et leur exploitation. Les figures de diffraction feront l'objet d'un prochain article⁽¹⁾.

1. DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT DE LA RÉTINE ACOUSTIQUE

1.1. Principe

L'étude est menée dans le domaine des ultrasons, produits par un ou plusieurs émetteurs piézoélectriques qui génèrent une onde ultrasonore sinusoïdale de fréquence $f = 40$ kHz. Nous cherchons à mesurer et à enregistrer l'intensité acoustique I (en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) en différents points de l'espace puis à générer une image à partir des valeurs mesurées.

(1) *NDLR* : la seconde partie de cet article paraîtra dans un prochain bulletin.

1.2. Description

La rétine acoustique (cf. figure 1) est constituée d'une barette verticale de sept microphones (transducteurs piézoélectriques) que l'on déplace dans l'espace à l'aide d'un moteur pas à pas. L'utilisation d'un tel moteur permet d'atteindre une résolution horizontale minimale de 0,8 mm (un pas du moteur). Quant à la résolution verticale, elle est limitée par la taille des microphones (diamètre de 1,0 cm) : dans la barette réalisée, ils sont distants de 1,6 cm.



Figure 1 - Photo du montage.

Pour chaque position de la barette, l'acquisition de la tension aux bornes de chacun des microphones est réalisée successivement. Elle est faite sur une durée de 0,10 ms avec une fréquence d'échantillonnage de 500 kHz ce qui correspond à $N = 50$ points de mesure. La valeur efficace est ensuite extraite des N valeurs de la tension échantillonnée. À l'issue du déplacement horizontal de la barette, sur une distance d avec un pas p , nous disposons donc d'un tableau (à sept lignes et d/p colonnes) des $7 \times d/p$ valeurs efficaces enregistrées qu'il faut ensuite présenter sous forme d'image.

Le moteur ainsi que l'acquisition sont pilotés par le langage *Python* et la biblio-

thèque *Pycanum* écrite par Frédéric Legrand [2] via la carte d'acquisition SYSAM-SP5 (Eurosmart).

Pour l'affichage, nous utilisons la fonction *Imshow* de la bibliothèque *Matplotlib* [3]. L'image est affichée en 256 niveaux de gris : le niveau 0 est affecté à la valeur minimale du tableau et le niveau 255 à la valeur maximale, ce qui permet de maximiser le contraste. L'image obtenue est ensuite filtrée par un algorithme de lissage (noyau de convolution lanczos [3]) ce qui a pour effet de faire disparaître la pixellisation et d'améliorer la lisibilité.

1.3. Relation entre tension mesurée et intensité acoustique

Dans le cas d'un émetteur supposé ponctuel en O , l'onde acoustique générée est une onde sphérique de fréquence $f = 40$ kHz et de longueur d'onde $\lambda = 0,85$ cm (pour une célérité du son dans l'air $c = 340$ m · s⁻¹). La surpression acoustique, en tout point de l'espace, est donnée par la relation :

$$p(r, t) = \frac{p_m}{r} \cos\left(2\pi f \times t - 2\pi \frac{f}{c} \times r\right). \quad (1)$$

Expérimentalement, nous étudions les phénomènes acoustiques dans une région de l'espace telle que $r \gg \lambda$ (zone de champ lointain) pour laquelle le vecteur de Poynting acoustique est donné par la relation :

$$\mathbf{\Pi} = p \times \mathbf{v} = \frac{p^2}{Z} \mathbf{e}_r, \quad (2)$$

où v représente la vitesse des particules de fluide au passage de l'onde, et $Z = \rho_0 c$ l'impédance acoustique de l'air, soit $Z = 408$ Pa · s · m⁻¹ (pour une masse volumique au repos $\rho_0 = 1,2$ kg · m⁻³). L'intensité acoustique I , énergie acoustique reçue par unité de temps et de surface normale à la direction de propagation (ou puissance acoustique surfacique normale), est donnée par la relation :

$$I = \|\mathbf{\Pi}\| = \frac{p_m^2}{2Zr^2}. \quad (3)$$

Un microphone, supposé ponctuel, placé à la distance r de l'émetteur, est sensible à la surpression acoustique qu'il détecte et génère une tension électrique $u(t)$ proportionnelle à cette surpression :

$$u(t) = a \times \frac{p_m}{r} \cos(2\pi f \times t + \phi), \quad (4)$$

dont la valeur efficace u_{rms} est donnée par la relation :

$$u_{rms} = \frac{u}{\sqrt{2}} = \frac{\alpha p_m}{\sqrt{2} r}. \quad (5)$$

L'intensité acoustique I est donc proportionnelle au carré de la tension efficace mesurée par le microphone. Les images affichées correspondent aux valeurs efficaces des tensions mesurées par les microphones donc à la racine carrée de l'intensité acous-

tique. Notons qu'en acoustique, les détecteurs sont sensibles aux variations temporelles du signal, alors qu'en optique, les détecteurs ne permettent d'accéder qu'à l'intensité lumineuse c'est-à-dire à la valeur moyenne dans le temps du carré du signal.

En pratique, les microphones utilisés ne sont pas ponctuels. Quelle conséquence cela a-t-il sur la réponse de ces capteurs ? Pour simplifier, assimilons un microphone à une surface carrée de côté $b \sim 0,5$ cm. Comme b est négligeable devant la distance r , nous pouvons assimiler localement l'onde sphérique à une onde plane. Plaçons-nous dans la configuration simplifiée de la figure 2, pour laquelle la direction de propagation de l'onde et la normale au microphone sont dans le plan de la figure, et désignons par θ l'angle entre la normale au microphone et la direction de propagation de l'onde.

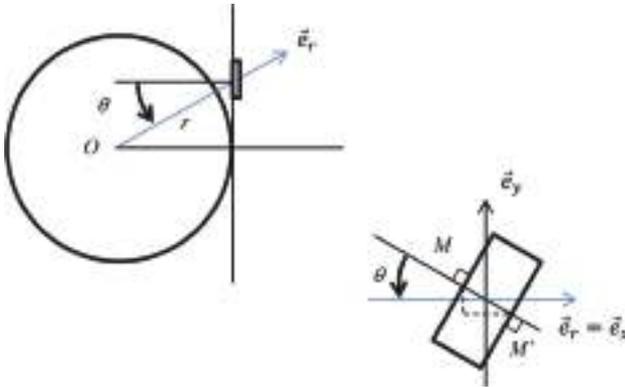


Figure 2 - Influence de l'orientation du microphone sur le signal mesuré.

Envisageons le cas d'un microphone à gradient de pression, assimilé à une membrane vibrante d'épaisseur e , soumise à deux forces pressantes, l'une sur sa face avant et l'autre sur sa face arrière. Comme le montre la figure 2, on peut mettre en bijection la face avant et la face arrière, en associant M avec M' dont la distance à O est $OM' \cong OM + e \cos \theta$. Donc la résultante F de ces forces pressantes, normale au plan de la membrane, s'écrit :

$$F = [p(r, t) - p(r + e \cos(\theta), t)] b^2 \approx -\frac{\partial p}{\partial r} e \cos(\theta) b^2. \quad (6)$$

Toujours dans un souci de simplification, nous supposons que la présence du microphone ne modifie pas le champ de pression $p(r, t)$ de l'onde incidente, mais comme cette dernière n'est pas uniforme sur la surface du microphone, il convient d'écrire cette force sous la forme d'une intégrale :

$$F \approx \int -\frac{\partial p}{\partial r} e \cos(\theta) b \, dl = \int_{r_0 - \frac{b}{2} \sin(\theta)}^{r_0 + \frac{b}{2} \sin(\theta)} -\frac{\partial p}{\partial r} e \cos(\theta) \frac{b \, dx}{\sin(\theta)}, \quad (7)$$

avec les notations de la figure 2 et où r_0 représente la distance OM . Nous voyons donc,

sur cette expression, que la réponse du microphone dépend d'une part de son orientation, par le paramètre θ , et d'autre part, que la réponse apparaît comme une grandeur moyennée à l'échelle de la surface du microphone.

Le calcul de (7) est compliqué par le fait que la surface de détection n'est pas plane et par la présence du boîtier entourant la membrane qui modifie localement le champ de pression de l'onde incidente. Aussi, les constructeurs caractérisent-ils la réponse d'un microphone par sa sensibilité s , rapport entre la tension efficace délivrée et la valeur efficace de la surpression acoustique incidente. La dépendance angulaire de la sensibilité est donnée par une fonction $h(\theta)$ appelée directivité, rapport entre la sensibilité pour une onde incidente se propageant dans la direction faisant un angle θ avec la normale à l'axe du microphone, et la sensibilité dans l'axe ($\theta = 0$). La directivité est renseignée par le constructeur sous la forme d'un diagramme de directivité. Pour les microphones utilisés, le diagramme indique que l'atténuation est supérieure à 6 dB par rapport à la réponse dans l'axe, pour des angles $\theta \geq 35^\circ$. En toute rigueur, il conviendrait donc de prendre la précaution d'orienter l'axe de chaque microphone selon la direction de propagation de l'onde incidente pour faire les mesures, ce qui n'est pas toujours le cas dans le montage réalisé, car la barette est déplacée en translation.

2. APPLICATION DU MONTAGE À L'ÉTUDE DU SIGNAL ÉMIS PAR UN ÉMETTEUR

Le montage a tout d'abord été testé pour visualiser et étudier l'émission acoustique d'un émetteur seul positionné dans le plan horizontal du microphone central de la barette. La barette est déplacée horizontalement dans une direction perpendiculaire à l'axe de l'émetteur, à une distance D de ce dernier (cf. figure 3).

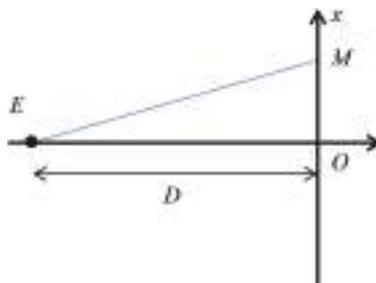


Figure 3 - Montage pour la visualisation de l'émission d'un émetteur seul.

2.1. Résultats expérimentaux

L'enregistrement a été réalisé pour deux distances D mesurées depuis la face avant

de l'émetteur⁽²⁾ : $D = (5,0 \pm 0,2)$ cm puis $D = (10,0 \pm 0,2)$ cm. La barette est déplacée sur une distance $d = 30,0$ cm avec un pas de 8 mm. Nous obtenons les images de la figure 4 : sans lissage à gauche où la pixellisation révèle la position des microphones, puis avec lissage.

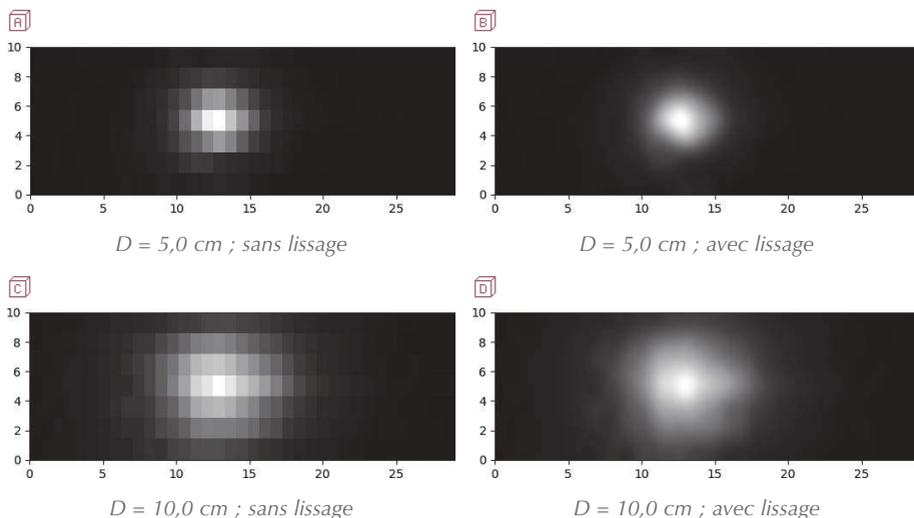


Figure 4 - Visualisation de l'émission d'un émetteur seul (les échelles des axes sont en cm).

Le graphique de la figure 5 (cf. page ci-contre) représente l'évolution de la valeur efficace mesurée par le microphone central en fonction de sa position dans l'espace repérée par l'abscisse x dont l'origine correspond à la position de la première mesure. La valeur efficace a été normalisée – *i.e.* divisée par la plus grande valeur mesurée par le microphone lors de son déplacement.

2.2. Interprétation

À partir des courbes obtenues, nous pouvons estimer l'angle d'ouverture correspondant à la largeur à mi-hauteur soit un angle voisin de 40° . Par ailleurs, le diagramme de rayonnement de l'émetteur a été mesuré expérimentalement (cf. figure 6, page ci-contre). L'angle d'ouverture à mi-hauteur, mesuré à partir du diagramme de rayonnement, est de l'ordre 50° . L'écart entre les deux valeurs est lié à l'effet d'orientation des microphones.

(2) Sauf mention contraire, les incertitudes sont des incertitudes majorées.

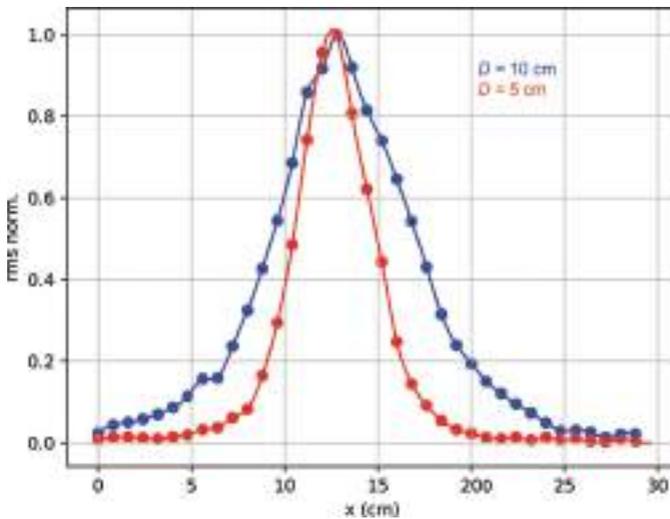


Figure 5 - Tension efficace normalisée en fonction de la position du microphone.

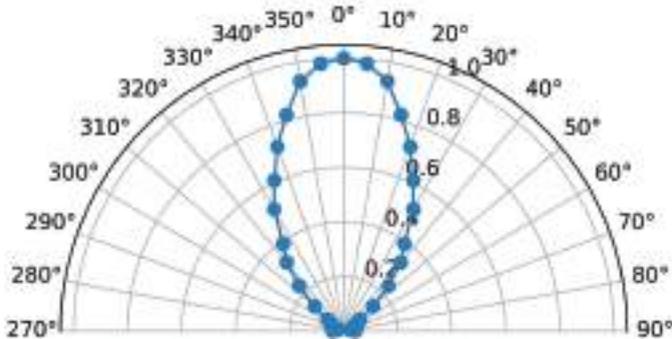


Figure 6 - Diagramme de rayonnement de l'émetteur.

3. APPLICATION DU MONTAGE À L'ÉTUDE DES INTERFÉRENCES ACOUSTIQUES

Le montage réalisé nous a permis de visualiser et d'étudier des phénomènes acoustiques pour lesquels il y a une modulation spatiale de l'intensité acoustique, tels que des franges d'interférences.

Le phénomène d'interférences est une manifestation de la nature ondulatoire du son. Il résulte de la superposition de deux ondes cohérentes entre elles. L'observation d'interférences est plus aisée en acoustique qu'en optique en raison de la facilité à obtenir deux sources acoustiques cohérentes entre elles. Par ailleurs, la longueur d'onde des ultrasons $\lambda = 8,5 \text{ mm}$ (pour une fréquence $f = 40 \text{ kHz}$ et une célérité dans l'air

$c = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) permet de travailler avec des dispositifs interférentiels dont les dimensions sont de l'ordre de la dizaine de centimètres. Mais il faudra tenir compte du phénomène d'atténuation des ultrasons dans l'air comme le montre la courbe en annexe. Cette atténuation nécessite d'observer les phénomènes à distance finie afin de garder un niveau de signal significatif, et rend difficile leur observation à l'infini comme ils sont souvent présentés en optique.

3.1. Franges d'interférences

3.1.1. Description de l'expérience

Les ondes ultrasonores sont produites par deux émetteurs E_1 et E_2 distants de a et alimentés par le même générateur basse fréquence. Les émetteurs et le microphone central de la barette sont positionnés dans un même plan horizontal. L'observation des franges se fait dans un plan vertical parallèle à la droite (E_1E_2) , à la distance D , comme le montre le schéma de la figure 7.

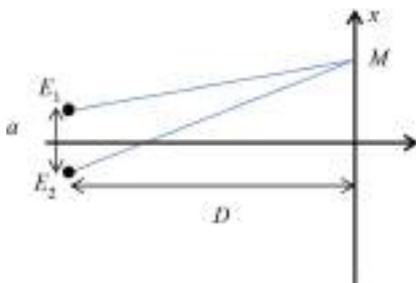


Figure 7 - Montage pour l'observation des franges d'interférences.

La distance a entre les centres des émetteurs est fixée à $a = (5,2 \pm 0,1) \text{ cm}$, et la distance D mesurée depuis la face avant des émetteurs à $D = (30,0 \pm 0,2) \text{ cm}$. La barette est déplacée sur une distance $d = 30,0 \text{ cm}$ avec un pas de 8 mm . On obtient les images de la figure 8, sans lissage (cf. figure 8A) puis avec lissage (cf. figure 8B).

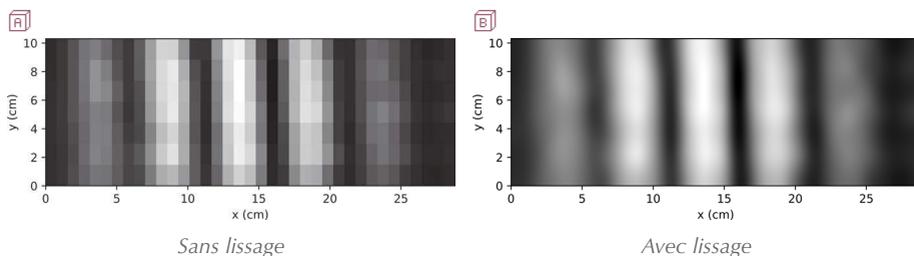


Figure 8 - Franges d'interférences ; $a = 5,2 \text{ cm}$; $D = 30,0 \text{ cm}$.

L'origine de l'axe (Ox) correspond à la position de la première mesure.

3.1.2. Résultats expérimentaux

Le graphique de la figure 9 représente l'évolution de la valeur efficace détectée par le microphone central en fonction de sa position repérée par son abscisse x . Les mesures s'échelonnent depuis $x = 0$ (correspondant à la position de la première mesure) jusqu'à $x = 36 \times 0,8 \text{ cm} = 28,8 \text{ cm}$ (dernière mesure). Les valeurs relevées sont celles avant application du lissage numérique de la figure 8B (cf. page ci-contre) et ont été normalisées comme précédemment.

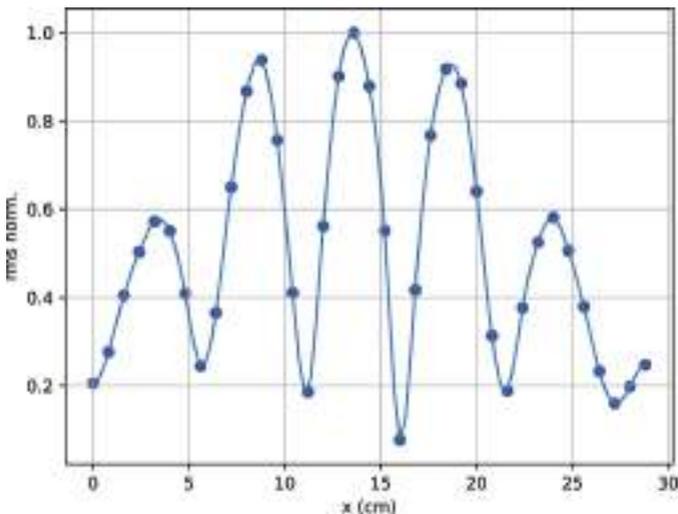


Figure 9 - Tension efficace normalisée en fonction de la position du microphone.

3.1.2.1. Interprétation du nombre de franges observées

Cherchons, dans un premier temps, à interpréter le nombre de franges observées. Dans le cas des interférences à deux ondes, émises par deux sources ponctuelles monochromatiques, la différence de marche δ au point M d'abscisse x , dont l'origine O est prise dans le plan médiateur du segment $[E_1 E_2]$, est donnée par :

$$\delta = E_2 M - E_1 M = \sqrt{D^2 + \left(x + \frac{a}{2}\right)^2} - \sqrt{D^2 + \left(x - \frac{a}{2}\right)^2}. \quad (8)$$

Sur la figure 10 (cf. page ci-après), pour laquelle les proportions des longueurs ont été respectées par rapport à l'expérience, nous avons représenté les hyperboles correspondant aux lieux d'interférences constructives ($\delta = p \times \lambda$ avec $p = -5, -4, \dots, 0, \dots, 4, 5$) ainsi que la trace correspondant au déplacement du microphone.

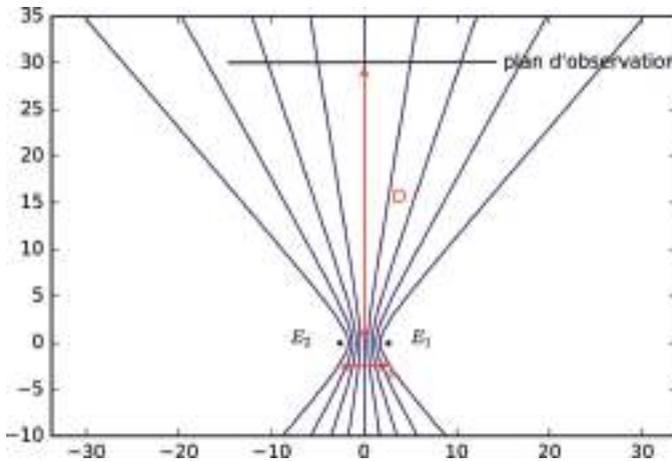


Figure 10 - Lieux d'interférences constructives.

Nous retrouvons bien les cinq franges d'interférences constructives. Remarquons que le nombre maximum de franges visibles expérimentalement est limité par la largeur du champ d'interférences lui-même lié à l'ouverture angulaire des faisceaux émis par les émetteurs.

Notons également que l'interfrange i n'est pas constant en accord avec le graphique de la figure 9 (cf. page précédente) et ne peut être approximé par la relation $i \cong \frac{\lambda D}{a}$ qui nécessiterait de se placer dans des conditions expérimentales telles que : $D \gg a$ et $D \gg |x|$ (conditions généralement satisfaites en optique). Avec $x = N i$ où N est le nombre de franges brillantes visibles de part et d'autre du centre de la figure, la deuxième relation impliquerait : $a \gg N \lambda$.

Compte tenu de la longueur d'onde des ultrasons $\lambda = 0,85 \text{ cm}$, pour avoir $N = 2$ avec $i \cong \frac{\lambda D}{a}$, il conviendrait de prendre $a \sim 10 N \lambda \sim 17 \text{ cm}$ et $D \sim 10 a \sim 1,70 \text{ m}$. Cette dernière condition est difficile à mettre en œuvre expérimentalement en raison de l'atténuation des ultrasons et de leur réflexion sur les supports.

3.1.2.2. Modélisation de la courbe expérimentale

Dans un deuxième temps, nous avons cherché à modéliser la courbe expérimentale. Dans le cas d'interférences à deux ondes, émises par deux sources ponctuelles monochromatiques, l'amplitude du signal résultant au point M d'abscisse x , dont l'origine O est prise sur le plan médiateur du segment joignant les deux sources, est donnée

par la relation (9) :

$$A(x)^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos\left(\frac{2\pi\delta(x)}{\lambda}\right), \quad (9)$$

où A_1 et A_2 désignent les amplitudes au point M des signaux émis par E_1 et E_2 respectivement.

Nous superposons aux points expérimentaux, la courbe représentant l'amplitude normalisée $\frac{A}{A_{\max}}$ en fonction de x , que l'on a pris soin de centrer sur l'abscisse $x = 13,5$ cm comme le montre la figure 11A, qui a été tracée pour deux amplitudes A_1 et A_2 identiques, et la figure 11B pour deux amplitudes A_1 et A_2 différentes. En effet, lors de sa propagation, l'onde ultrasonore s'atténue comme le montre la courbe de l'annexe. Les amplitudes A_1 et A_2 dépendent ainsi de la distance parcourue selon le modèle donné en annexe. Les valeurs de a et D ont été ajustées dans les modèles de façon à faire coïncider les abscisses des extrema des courbes expérimentale et théorique. Les valeurs retenues, sont $a = 5,1$ cm et $D = 30,0$ cm.

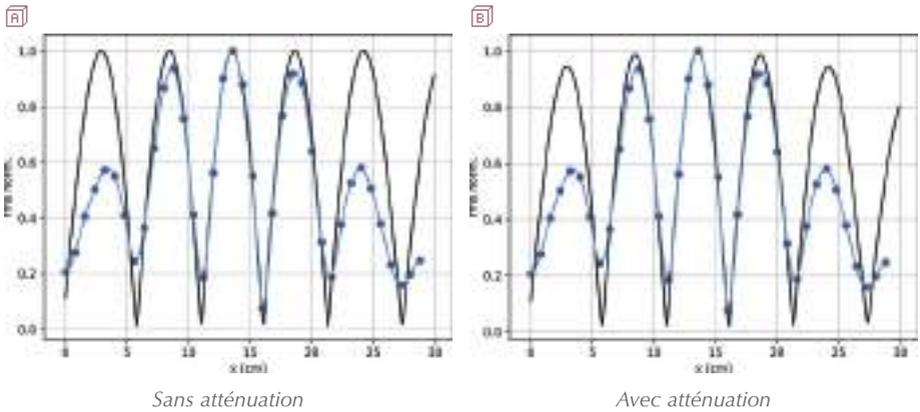


Figure 11 - Tension efficace normalisée en fonction de la position ; courbe expérimentale et modélisation (émetteurs ponctuels).

Nous constatons que la prise en compte de l'atténuation, due à la propagation sur des distances différentes des signaux que l'on superpose au point M , ne permet pas de rendre compte de la diminution du contraste des franges d'interférences que l'on observe sur la courbe expérimentale ainsi que sur les bords de l'image de la figure 8B.

Pour interpréter la diminution du contraste, nous devons prendre en compte le caractère non ponctuel des sources, spatialement cohérentes en acoustique. Une simulation informatique basée sur le principe de Huygens-Fresnel a permis d'obtenir les courbes de la figure 12 (cf. page ci-après). Les sources ont été modélisées par cent éléments ponctuels localisés à l'intérieur d'un carré de côté $b = 0,9$ cm et vibrant en

phase. Nous sommes au point M les amplitudes complexes des signaux dus à chacun des éléments, en prenant en compte ou non l'atténuation due à la propagation.

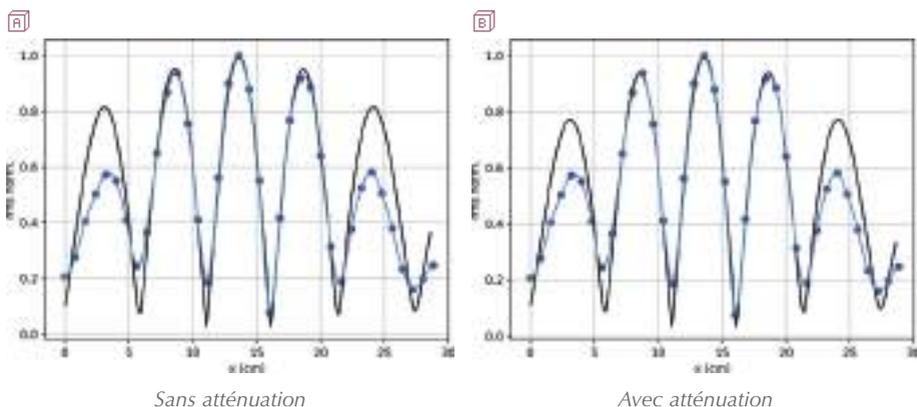


Figure 12 - Tension efficace normalisée en fonction de la position ;
courbe expérimentale et modélisation (émetteurs étendus)

Le caractère non ponctuel des sources permet ainsi d'expliquer la diminution du contraste qui trouve son origine dans le phénomène de diffraction lié à la largeur finie des sources : la figure d'interférences est affectée par une figure de diffraction (les écarts résiduels peuvent être imputés à l'atténuation de la réponse des microphones quand leur axe s'éloigne de la direction de propagation de l'onde qu'ils reçoivent). Remarquons, pour finir, que dans le domaine de l'optique, la diminution du contraste due à la largeur d'une source étendue incohérente et éclairant un interféromètre, est liée au problème de cohérence spatiale. Il convient alors dans ce cas de sommer les intensités au point M et non les amplitudes complexes.

3.1.3. Influence de la résolution horizontale

Afin de tester la résolution horizontale du montage, nous avons réalisé une nouvelle acquisition dans les mêmes conditions que précédemment en prenant pour pas la plus petite valeur possible, à savoir 0,8 mm – soit un dixième de la longueur d'onde. Nous obtenons les images de la figure 13 (cf. page ci-contre), sans lissage (cf. figure 13A, page ci-contre) puis avec lissage (cf. figure 13B, page ci-contre), ainsi que les points expérimentaux relevés par le microphone central (cf. figure 14, page ci-contre).

La figure 14 (cf. page ci-contre) montre l'intérêt du moteur pas à pas pour réaliser le déplacement de la barette.

En effet, la résolution atteinte serait difficilement accessible par un déplacement manuel de la barette. Une telle résolution est accessible, car la longueur caractéristique des variations spatiales de l'intensité acoustique, ici l'interfrange, est grande devant le

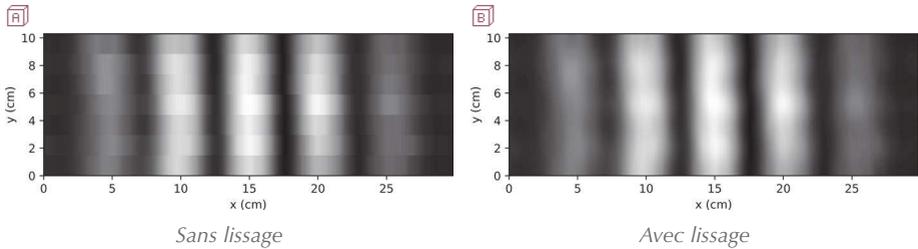


Figure 13 - Franges d'interférences à résolution maximale.

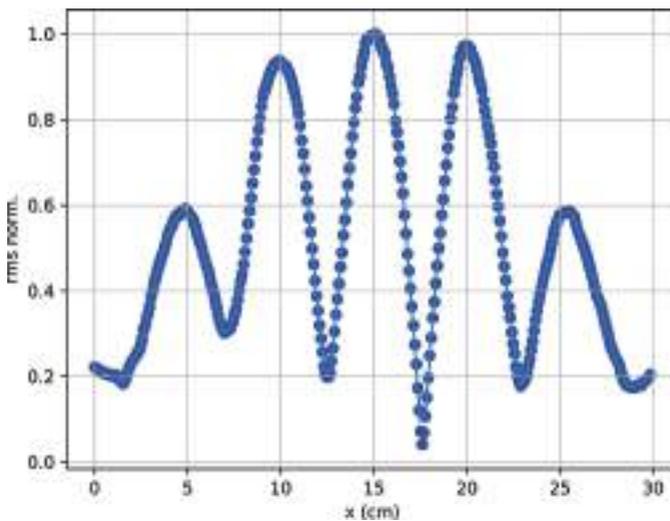


Figure 14 - Tension efficace normalisée du microphone central en fonction de sa position.

pas de déplacement et le diamètre du microphone. Dans le cas contraire, le microphone opérerait un moyennage spatial de la surpression acoustique détectée au niveau de sa surface ne permettant pas de visualiser ses variations. Il est intéressant de constater que, malgré cette opération de moyennage, le microphone détecte néanmoins des variations de signal sur des déplacements correspondants au dixième de son diamètre.

3.2. Anneaux d'interférences

3.2.1. Description de l'expérience

Afin de visualiser des anneaux d'interférences, nous observons maintenant la figure d'interférences dans un plan perpendiculaire à la droite (E_1E_2) joignant les émetteurs, distants de a et toujours positionnés dans le plan horizontal contenant le microphone central de la barette. Le plan d'observation est situé à la distance D de E_1 comme le

montre le schéma de la figure 15.

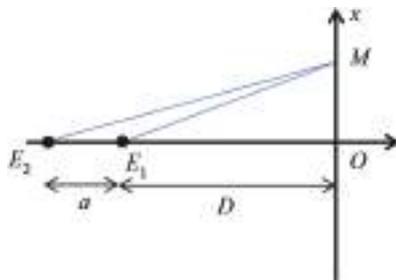


Figure 15 - Montage pour l'observation des anneaux d'interférences.

Les distances a et D , mesurées depuis les faces avant des émetteurs, ont été fixées à : $a = (20,0 \pm 0,1)$ cm et $D = (10,8 \pm 0,2)$ cm. La barette est déplacée sur une distance $d = 30,0$ cm avec un pas de 8 mm. Nous obtenons les images de la figure 16, sans lissage (cf. figure 16A) puis avec lissage (cf. figure 16B).

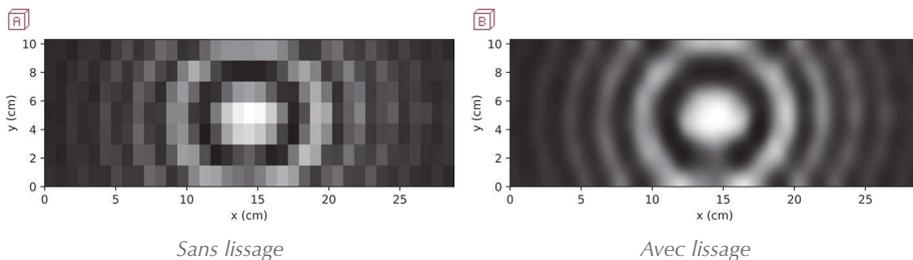


Figure 16 - Anneaux d'interférences (pour $a = 20,0$ cm et $D = 10,8$ cm).

La visualisation d'anneaux d'interférences en acoustique est ainsi plus facile à réaliser qu'en optique où elle nécessite des dispositifs interférentiels plus difficiles à mettre en œuvre.

3.2.2. Résultats expérimentaux

Le graphique de la figure 17 (cf. page ci-contre) représente l'évolution de la valeur efficace de la tension aux bornes du microphone central en fonction de sa position ($x = 0$ correspondant à la première mesure effectuée). La valeur efficace a été divisée par la plus grande valeur mesurée par le microphone lors de son déplacement.

Nous superposons, sur la figure 18 (cf. page ci-contre), aux points expérimentaux, un premier modèle, toujours donné par la relation (9) pour laquelle nous supposons les signaux de même amplitude, mais en adaptant l'expression de la différence de marche

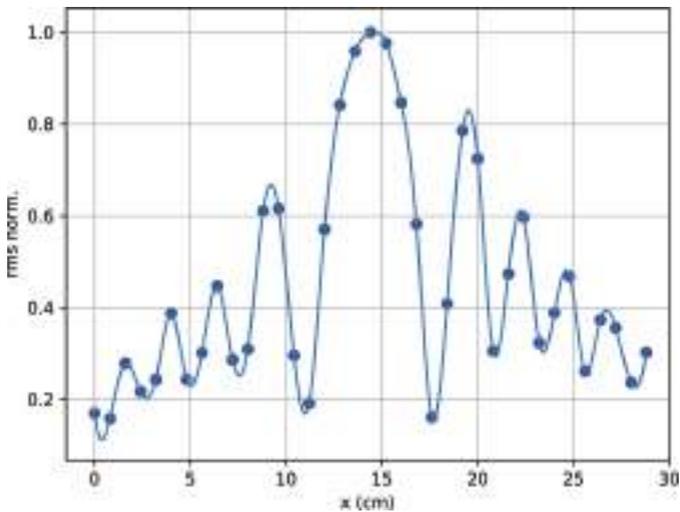


Figure 17 - Tension efficace normalisée en fonction de la position du microphone.

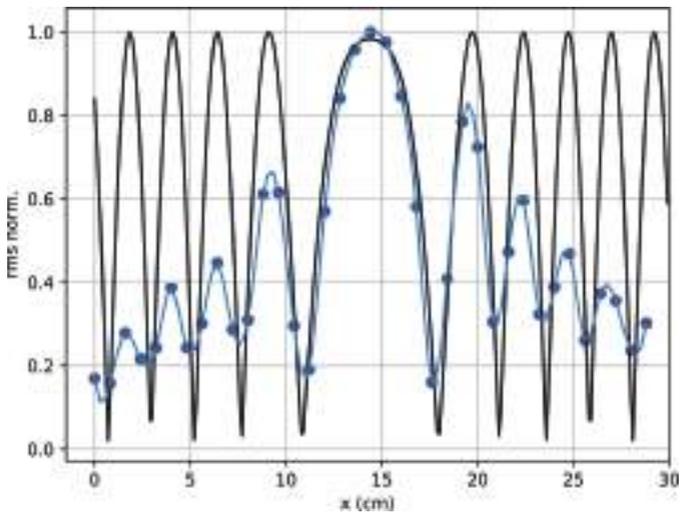


Figure 18 - Tension efficace normalisée en fonction de la position ; points expérimentaux et modélisation (avec des sources ponctuelles et sans atténuation).

à la nouvelle configuration, soit :

$$\delta(x) = E_2 M - E_1 M = \sqrt{x^2 + (D + a)^2} - \sqrt{x^2 + D^2}. \quad (10)$$

Comme précédemment, le modèle théorique a été recentré autour de $x = 14,0$ cm et les valeurs des paramètres a et D ont été ajustées, dans l'intervalle d'incertitude, de façon

à faire coïncider les abscisses des extrema des courbes expérimentale et théorique. Les valeurs retenues sont $a = 19,5$ cm et $D = 10,5$ cm.

Une simulation informatique prenant en compte l'atténuation des ultrasons lors de leur propagation ainsi que le caractère étendu des sources permet un meilleur ajustement de la courbe expérimentale comme le montre la figure 19.

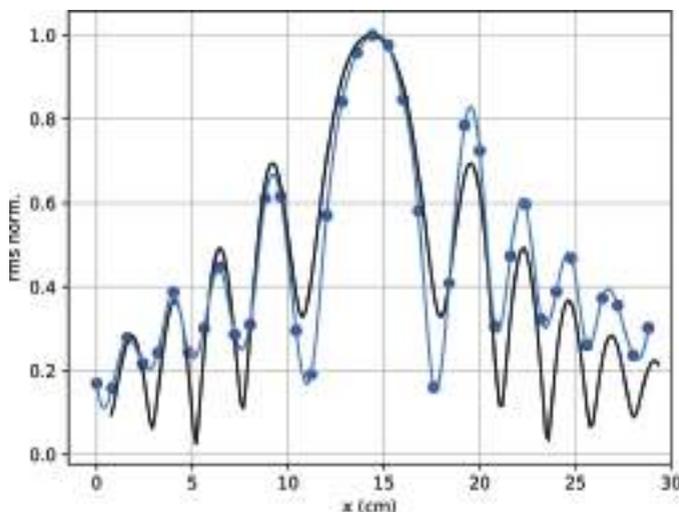


Figure 19 - Tension efficace normalisée en fonction de la position ; points expérimentaux et modélisation (avec sources étendues et atténuation).

Il resterait à prendre en compte l'effet de diffraction de l'émetteur E_1 sur l'onde émise par E_2 . En effet, les émetteurs utilisés ont un diamètre $b = 1,0$ cm soit de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde des ultrasons. Il conviendrait alors de sommer au point M les amplitudes complexes des signaux émis par E_1 et par E_2 , en tenant compte de la diffraction par E_1 . Ce phénomène pourrait expliquer les écarts observés entre la simulation et la courbe expérimentale.

CONCLUSION

Nous avons réalisé un montage permettant de visualiser la répartition de l'intensité acoustique dans l'espace (plus précisément, les figures obtenues correspondent à la valeur efficace du signal acoustique). Le dispositif utilisé nous a permis de revisiter quelques expériences classiques d'interférences et d'obtenir des figures inédites dans le domaine de l'acoustique avec une résolution inférieure à la longueur d'onde des ultrasons.

Au-delà de l'étude physique sur les interférences réalisée dans cet article, la rétine acoustique est un outil d'investigation intéressant pour la visualisation et l'étude d'autres phénomènes acoustiques pour lesquels il y a une modulation spatiale de l'intensité acoustique. La visualisation et l'étude des phénomènes de diffraction feront ainsi l'objet d'un prochain article.

Ce travail a également été l'occasion de développer un parallélisme entre l'optique et l'acoustique. L'ordre de grandeur de la longueur d'onde des ultrasons permet d'étudier les phénomènes dans des régimes différents de ceux de l'optique, complétant ainsi leur compréhension – comme le montrent aussi d'autres articles récents dans *Le Bup* [5-6].

BIBLIOGRAPHIE ET NETOGRAPHIE

- [1] https://odpf.org/images/archives_docs/26eme/memoires/EquipeY/memoire.pdf
- [2] <http://www.f-legrand.fr/scidoc/>
- [3] https://matplotlib.org/api/_as_gen/matplotlib.pyplot.imshow.html
- [4] A. Ballory, A. Deiber, O. Kempf et Groupe GRESEP, « Interférences ultrasonores : apports d'une acquisition informatisée », *Bull. Un. Phys.*, vol. 93, n° 818, p. 1629-1646, novembre 1999.
- [5] L. Dettwiller, C. Mulet-Marquis et T. Robin, « Comparaison de techniques de calcul de diffraction – Partie 1 : Application aux réseaux zonés et à leur apodisation longitudinale », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 112, n° 1007, p. 1079-1112, octobre 2018.
- [6] L. Dettwiller, C. Mulet-Marquis et T. Robin, « Comparaison de techniques de calcul de diffraction – Partie 2 : Étude expérimentale », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 112, n° 1008, p. 1221-1235, novembre 2018.

Annexe

Absorption des ultrasons dans l'air

Nous avons mesuré la valeur efficace de la tension aux bornes d'un microphone en fonction de sa distance r à l'émetteur placé en $r = 0$. Émetteur et récepteur sont placés dans un même plan horizontal. Les résultats sont présentés sur la figure 20.

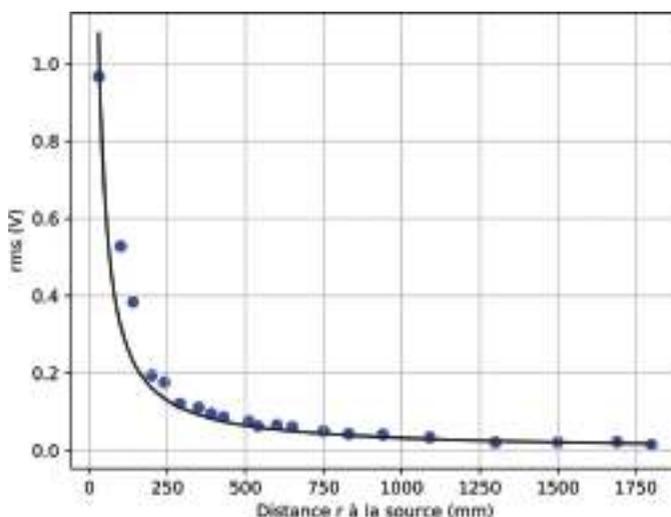


Figure 20 - Évolution de la valeur efficace de la tension aux bornes d'un microphone en fonction de sa distance r à l'émetteur. Résultats expérimentaux et modélisation.

La courbe montre une atténuation des ultrasons dans l'air lors de leur propagation. La courbe a été modélisée par une fonction inverse :

$$rms = \frac{\kappa}{r}, \quad (11)$$

avec $\kappa = (3,23 \pm 0,04) \cdot 10^3 \text{ mV} \cdot \text{cm}$ (95 %)

La modélisation de la courbe par une fonction inverse montre que l'effet principal est une atténuation d'origine géométrique liée à la dilution de l'énergie acoustique dans l'espace. À cet effet se mêlerait une décroissance de l'amplitude due à l'absorption caractérisée par un facteur exponentiel.

Il convient de noter que la valeur de κ déterminée est associée à un couple émetteur-récepteur donné, mais n'intervient pas dans les simulations numériques, car nous étudions les réponses normalisées.



Jean-Christophe JOUAN
Professeur en MPSI
Lycée militaire de Saint-Cyr-l'École
Saint-Cyr-l'École (Yvelines)



Yves CHRIQUI
Professeur de sciences physiques
Lycée militaire de Saint-Cyr-l'École
Saint-Cyr-l'École (Yvelines)



Violette KUBIACZYK
Élève en terminale S
Lycée militaire de Saint-Cyr-l'École
Saint-Cyr-l'École (Yvelines)



Ambre DESHAYES
Élève en terminale S
Lycée militaire de Saint-Cyr-l'École
Saint-Cyr-l'École (Yvelines)

Projet de renforcement des enseignements relatifs au changement climatique, à la biodiversité et au développement durable (cycles 3 et 4)

Comparaison du programme de 2015 avec le projet de 2019

par **Cécile DUSSINE**

Collège Jean Renoir - 69250 Neuville-sur-Saône
cecile.dussine@outlook.fr

et **Florent GOITIA**

Collège REP+ Romain Rolland - 93390 Clichy-sous-Bois
f.goitia@protonmail.com

CET ARTICLE a pour vocation de mettre en exergue les modifications envisagées par le Conseil supérieur des programmes (CSP) dans le projet de « renforcement des enseignements relatifs au changement climatique, à la biodiversité et au développement durable » publié en décembre 2019 en lien avec le programme de sciences et technologie de cycle 3 et le programme de physique-chimie de cycle 4. Ces modifications prennent aussi en compte, en partie, le projet d'ajustement et de clarification décidé en juin 2018 par le CSP, mais qui n'a jamais été mis en œuvre au collège.

INTRODUCTION

Comme il a été indiqué dans deux articles déjà publiés dans *Le Bup physique-chimie* [1-2], le programme de sciences et technologie de cycle 3 et le programme de physique-chimie de cycle 4 [3] contenaient quelques erreurs de formulation. Les modifications proposées en décembre 2019 par le CSP [4] reprennent une partie du projet d'ajustement et de clarification publié en 2018 [5]. À ces premiers travaux, le CSP propose d'ajouter la prise en compte de l'éducation au changement climatique, à la biodiversité et au développement durable, faisant suite à la lettre de saisine du Ministre, datée du 20 juin 2019 [6].

L'UdPPC a souhaité mettre à nouveau à la disposition de ses lecteurs un texte qui permette la mise en regard du programme (BO 2015) avec le projet de renforcement diffusé en décembre 2019. L'article qui suit reprend donc le programme de physique-chimie de 2015 tout en mettant en valeur les modifications envisagées. Aucune distinction ne sera faite entre les ajouts qui viennent du projet de 2018 et ceux proposés

en 2019. Pour apporter une plus-value au document du CSP et que cet article fasse sens, nous nous proposons de ne mettre en valeur que les modifications importantes. Ainsi le choix a été fait de ne pas faire apparaître les modifications de grammaire (on pourra → on peut) ou de mise en forme du texte (Relation → relation). Pour faciliter la lecture de l'article, le programme n'est pas reproduit entièrement et les paragraphes retirés sont repérés par [...].

Rappelons enfin que nous ne connaissons pas encore la date à laquelle ces modifications entreront en vigueur.

Légendes utilisées

- ▶ Texte inchangé (par rapport au programme de 2015)
- ▶ Texte supprimé (par rapport au programme de 2015)
- ▶ Texte ajouté (dans la publication du CSP de décembre 2019 par rapport au programme de 2015)
- ▶ [...] remplace les parties du programme qui ne contiennent pas de proposition de modification et qui ne sont pas reproduites.

1. LE PROGRAMME DE CYCLE 3

1.1. Introduction du programme

Les modifications apportées à l'introduction du programme de sciences et technologie de cycle 3 ne représentent que deux ajouts, reproduits ci-après :

[...]

[Les élèves] sont sensibilisés aux enjeux du changement climatique, de la biodiversité et du développement durable.

[...]

Toutes les disciplines scientifiques et la technologie concourent à la construction d'une première représentation globale, rationnelle et cohérente du monde dans lequel l'élève vit. Le programme d'enseignement du cycle 3 y contribue en s'organisant autour de thématiques communes qui conjuguent des questions majeures de la science et des enjeux sociétaux contemporains (changement climatique, biodiversité, développement durable).

[...]

1.2. Matière, mouvement, énergie, information

Attendus de fin de cycle

[...]

- ◆ Identifier différentes **sources d'énergie** **ressources en énergie** et connaître quelques conversions d'énergie.

[...]

Connaissances et compétences associées	Exemples de situations, d'activités et de ressources pour l'élève
<i>Décrire les états et la constitution de la matière à l'échelle macroscopique</i>	
<p>[...]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Diversité de la matière : métaux, minéraux, verres, plastiques, matière organique sous différentes formes issue du vivant. <p>[...]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Quelques propriétés de la matière solide ou liquide (par exemple : densité, solubilité, élasticité... approche qualitative). <p>[...]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ La masse est une grandeur physique qui caractérise un échantillon de matière. ◆ Tout objet matériel possède une masse qui lui est propre et qui peut être mesurée. <p>[...]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ La matière qui nous entoure (à l'état solide, liquide ou gazeux), résultat d'un mélange résulte souvent de l'association de différents constituants. 	<p>Observer la diversité de la matière, à différentes échelles, dans la nature et dans la vie courante (matière inerte – naturelle ou fabriquée –, matière vivante).</p> <p>La distinction entre Distinguer différents matériaux peut se faire à partir de leurs propriétés physiques (par exemple : densité, élasticité, conductivité thermique ou électrique, magnétisme, solubilité dans l'eau, miscibilité avec l'eau...) ou de leurs caractéristiques (matériaux bruts, conditions de mise en forme, procédés...).</p> <p>Observation qualitative d'effets résultant d'actions à distances (aimants, électricité statique).</p> <p>L'utilisation de la loupe et du microscope permet : l'observation de structures géométriques de cristaux naturels et de cellules.</p> <p>Utiliser la loupe et le microscope pour l'observation de structures géométriques de cristaux naturels, d'organisation du vivant à différentes échelles comme des vaisseaux conducteurs (plantes et animaux) des tissus différents (fruit, graine...) ou encore observer des cellules animales ou végétales.</p> <p>Des activités de séparation de constituants peuvent être conduites : décantation, filtration, évaporation.</p> <p>Observation qualitative d'effets à distances (aimants, électricité statique).</p> <p>Richesse et diversité des usages possibles de la matière : se déplacer, se nourrir, construire, se vêtir, faire une œuvre d'art.</p> <p>[...]</p> <p>La question de la toxicité de certaines substances pour les milieux naturels peut être abordée.</p> <p>Séparer des constituants par décantation, filtration, évaporation.</p> <p>Les mélanges gazeux pourront être abordés à partir du cas de l'air.</p>

Connaissances et compétences associées	Exemples de situations, d'activités et de ressources pour l'élève
<i>Décrire les états et la constitution de la matière à l'échelle macroscopique (suite)</i>	
	<p>Richesse et Diversité des usages possibles de la matière : se déplacer, se nourrir, construire, se vêtir, faire une œuvre d'art.</p>
<i>Observer et décrire différents types de mouvements</i>	
<p>[...]</p> <p>◆ Mouvements dont la valeur de la vitesse (module) est constante ou variable (accélération, décélération) dans un mouvement rectiligne.</p>	<p>L'élève part d'une situation où il est acteur qui observe en mouvement (en courant, faisant du vélo, passer d'un train ou d'un avion), à celles où il n'est qu'observateur immobile (des observations faites dans la cour de récréation ou lors d'une expérimentation en classe, jusqu'à l'observation du ciel : mouvement des planètes et des satellites artificiels à partir de données fournies par des logiciels de simulation).</p>
<i>Identifier différentes ressources en énergie et connaître quelques conversions d'énergie</i>	
<p>Identifier des sources et des formes d'énergie et des ressources en énergie.</p> <p>◆ L'énergie existe sous différentes formes (énergie associée à un objet en mouvement, énergie thermique, électrique, lumineuse...).</p> <p>Prendre conscience que l'être humain a besoin d'énergie pour vivre, se chauffer, se déplacer, s'éclairer...</p> <p>◆ Exemples de ressources sources d'énergie utilisées par les êtres humains : charbon, pétrole, bois, uranium, aliments, vent, Soleil, eau, mers et rivières ; et barrage, pile...</p> <p>◆ Ressources renouvelables et non renouvelables.</p> <p>[...]</p> <p>◆ Exemples de dispositifs de stockage : pile, barrage ;</p> <p>◆ Exemples de convertisseurs : lampe, éolienne, panneau solaire.</p> <p>◆ Notion d'énergie renouvelable.</p> <p>[...]</p> <p>Identifier quelques-uns des besoins en énergie de l'être humain, pour le fonctionnement du corps et pour la vie quotidienne (se chauffer, se déplacer, s'éclairer...)</p> <p>◆ Quelques dispositifs visant à économiser optimiser la consommation d'énergie.</p>	<p>[...]</p>

Connaissances et compétences associées	Exemples de situations, d'activités et d'outils pour l'élève
<i>Identifier un signal et une information</i>	
Identifier différentes formes de différents signaux (sonores, lumineux, radio...) ♦ Nature d'un Distinction entre signal, nature d'une et information, dans une application simple de la vie courante. ♦ Transmission d'une information par un signal.	[...] Élément minimum d'information (oui/non) et représentation par 0, 1 0 et 1.

1.3. Le vivant, sa diversité et les fonctions qui le caractérisent

Attendus de fin de cycle

[...]

- ♦ Expliquer l'origine de la matière organique des êtres vivants et son devenir.
- ♦ Mettre en évidence la place et l'interdépendance des différents êtres vivants dans un réseau trophique.

Connaissances et compétences associées	Exemples de situations, d'activités et de ressources pour l'élève
<i>Classer les organismes, exploiter les liens de parenté pour comprendre et expliquer l'évolution des organismes</i>	
Unité, diversité des organismes vivants [...] ♦ La cellule, unité structurelle du une structure commune aux êtres vivants. [...] ♦ Caractère commun, hérédité et relation de parenté. [...] ♦ Biodiversité : diversités actuelle et passée des espèces. ♦ Évolution des espèces vivantes. ♦ Évolution à l'échelle des espèces ou des populations. ♦ Appréhender les différentes échelles de temps : l'échelle des temps géologiques (notion de temps long) et celle de l'histoire de l'être humain récemment apparu sur Terre.	[...] Ils font le lien entre l'aspect d'un animal ou d'un végétal et son milieu. Ils appréhendent la notion de temps long (à l'échelle des temps géologiques) et la distinguent de celle de l'histoire de l'être humain récemment apparu sur Terre. Ils découvrent quelques modes de classification adaptés à différents objectifs (écologique, phylogénétique...). Pour la classification phylogénétique, ils interprètent les groupes emboîtés en terme de permettant de rendre compte des degrés de parenté entre les espèces. et donc de comprendre leur histoire évolutive. Les élèves constatent les modifications à différentes échelles de temps dans les peuplements des milieux : les peuplements changent au cours des saisons, l'association des espèces change à l'échelle des temps géologiques.

Connaissances et compétences associées	Exemples de situations, d'activités et de ressources pour l'élève
<i>Expliquer les besoins variables en aliments de l'être humain ; l'origine et les techniques mises en œuvre pour transformer et conserver les aliments</i>	
<p>Les fonctions de nutrition</p> <p>[...]</p> <p>Relier l'approvisionnement des organes aux fonctions de nutrition (digestion, respiration, circulation).</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Apports discontinus de nourriture à l'échelle de l'organisme (repas) et besoins apports continus de nutriments à l'échelle des organes. ◆ Organes de stockage. <p>[...]</p>	<p>[...]</p> <p>Ils réalisent des visites dans des lieux d'élevage ou de culture, mais aussi dans des entreprises de fabrication d'aliments à destination humaine.</p> <p>[Les élèves] réalisent des visites dans des lieux d'élevage ou de culture, mais aussi dans des entreprises de fabrication d'aliments à destination humaine (boulangerie, pâtisserie, poissonnerie, laiterie, etc.).</p> <p>[...]</p> <p>Ils décrivent des habitudes et des choix de consommations, et identifient certaines de leurs conséquences.</p> <p>[...]</p> <p>Une mise en relation peut être établie avec la partie « les êtres vivants dans leur environnement ».</p>
<i>Décrire comment les êtres vivants se développent et deviennent aptes à se reproduire</i>	
<p>[...]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Modifications de l'organisation et du fonctionnement d'une plante à fleurs ou d'un animal au cours du temps, en lien avec sa nutrition et sa reproduction. <p>[...]</p>	<p>[...]</p>
<i>Expliquer l'origine de la matière organique des êtres vivants et son devenir Mettre en évidence la place et l'interdépendance des différents êtres vivants dans un réseau trophique</i>	
<p>Découvrir que tout être vivant produit sa matière à partir de celle qu'il prélève.</p> <p>Relier la production de matière par les besoins des organismes chlorophylliens plantes vertes et leurs besoins. leur place particulière dans les réseaux trophiques.</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Besoins des organismes chlorophylliens plantes vertes : lumière, eau, sels minéraux, dioxyde de carbone. <p>Relier la production de matière par les animaux et leur consommation de nourriture provenant d'autres êtres vivants.</p> <p>Identifier les matières échangées entre un être vivant et son milieu de vie.</p> <p>[...]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Devenir de la matière d'un organisme lorsqu'il est mort. organique n'appartenant plus à un organisme vivant. 	<p>[...]</p> <p>À partir des observations de l'environnement proche, les élèves identifient la place et le rôle des organismes végétaux chlorophylliens en tant que producteurs primaires d'un réseau trophique de la chaîne alimentaire.</p> <p>[...]</p>

1.4. Matériaux et objets techniques

[...]

Connaissances et compétences associées	Exemples de situations, d'activités et de ressources pour l'élève
<i>Identifier les principales évolutions du besoin et des objets</i>	
[...]	[...]
<i>Décrire le fonctionnement d'objets techniques, leurs fonctions et leurs constitutions</i>	
[...]	[...]
<i>Identifier les principales familles de matériaux</i>	
[...]	[...]
<i>Concevoir et produire tout ou partie d'un objet technique en équipe pour traduire une solution technologique répondant à un besoin</i>	
[...]	En groupe, les élèves sont amenés à résoudre un problème technique, imaginer et réaliser des solutions techniques en effectuant des choix de matériaux et des moyens de réalisation dans le respect de contraintes notamment environnementales (réduire la consommation d'énergie, utiliser des matériaux recyclables, ...) .
[...]	[...]
<i>Repérer et comprendre la communication et la gestion de l'information</i>	
[...]	[Les élèves] sont sensibilisés à la relation entre les usages d'outils numériques, leur consommation énergétique et les dangers pour la santé dans leur usage intensif.

1.5. La planète Terre. Les êtres vivants dans leur environnement

Attendus en fin de cycle

[...]

Connaissances et compétences associées	Exemples de situations, d'activités et de ressources pour l'élève
<i>Situer la Terre dans le système solaire et caractériser les conditions de la vie terrestre</i>	
[...] Caractériser les conditions de vie sur Terre (atmosphère , température, présence d'eau liquide). [...]	[...]
[...]	[...] Réaliser des mesures en lien avec la météo (thermomètres, hygromètres, baromètres...). Réaliser une station météorologique, une serre (mise en évidence de l'effet de serre) (sensibilisation à l'effet de serre au coeur du changement climatique, analogue lointain de l'effet thermique d'une serre). [...]
<i>Identifier des enjeux liés à l'environnement</i>	
Répartition des êtres vivants et peuplement des milieux [...] ♦ Notion d'écosystème. [...] ♦ Écosystèmes (milieu de vie avec ses caractéristiques et son peuplement); [...] Identifier quelques impacts humains dans un environnement (comportements , aménagement, impacts de certaines technologies ...) [...]	Observations et analyses de données recueillies lors de sorties, recherches documentaires. et par des observations lors de sorties. Utilisation de documents. Répertorier les êtres vivants dans la cour de récréation ou dans l'environnement proche ; réaliser des mesures et des constats tout au long de l'année pour étudier les peuplements : comparer la répartition des êtres vivants dans des milieux d'expositions différentes, au cours des saisons, etc. Observer et décrire le peuplement d'un sol ; suivre son évolution au cours des saisons. Décrire l'impact d'espèces invasives sur la biodiversité. Permettre aux élèves de s'impliquer dans des actions et des projets concrets en lien avec des thématiques liées à l'EDD (création d'un espace vert, tri des déchets, ...). Permettre aux élèves de découvrir la notion d'engagement individuel et/ou collectif, notamment dans le cadre d'un travail partenarial, et en lien avec l'EMC.
[...]	[...]

2. LE PROGRAMME DE CYCLE 4

2.1. Introduction du programme

Dans cette introduction du programme revisité, une finalité de l'enseignement de la physique-chimie est ajoutée, et une autre est modifiée, à la fin de la liste, en partie reproduite ci-après :

Les sciences expérimentales et d'observation, dont font partie la physique et la chimie, explorent la nature pour en découvrir et expliciter les lois, acquérant ainsi du pouvoir sur le monde réel. Les finalités de leur enseignement au cours du cycle 4 sont de permettre à l'élève :

◆ [...]

◆ d'approfondir la connaissance des notions indispensables à une bonne compréhension de l'origine du changement climatique et ses conséquences ;

◆ d'agir en exerçant des choix éclairés, y compris dans ses choix d'orientation ;

◆ d'exercer ~~de vivre et préparer~~ une citoyenneté responsable, en particulier dans les domaines de la santé et de l'environnement :

– en construisant sa relation **à son propre corps, à l'autre et** au monde, ~~à l'autre, à son propre corps,~~

– en intégrant les évolutions économiques et technologiques, pour assumer en citoyen les responsabilités sociales et éthiques qui en découlent.

Au cours du cycle 4, l'étude des sciences – physique, chimie, sciences de la vie et de la Terre – permet aux jeunes de se distancier **de leurs croyances dans leur vision du monde et d'une vision anthropocentrée du monde et de leurs croyances,** pour entrer dans une relation scientifique avec les phénomènes naturels, le monde vivant, et les techniques. [...]

Ensuite, parmi les compétences, certaines ont été revues. Ces dernières sont reproduites dans le tableau ci-après. Les lignes du tableau qui ne contiennent pas de proposition de modification ne sont pas reproduites.

Compétences travaillées	Domaine du socle
Pratiquer des langages <ul style="list-style-type: none"> ◆ Lire et comprendre des documents scientifiques. ◆ Utiliser la langue française, à l'écrit comme à l'oral, en cultivant précision, richesse de vocabulaire et syntaxe pour rendre compte des observations, expériences, hypothèses et conclusions. ◆ S'exprimer à l'oral lors d'un débat scientifique. ◆ Passer d'une forme de langage scientifique à une autre. 	1
Adopter un comportement éthique et responsable <ul style="list-style-type: none"> ◆ Expliquer les fondements des règles de sécurité en chimie, électricité, optique et acoustique. ◆ Réinvestir ses connaissances, notamment celles sur les ressources et l'énergie, pour agir de façon responsable et respectueuse de l'environnement. ◆ S'impliquer dans un projet ayant une dimension citoyenne. 	3,5
Se situer dans l'espace et dans le temps <ul style="list-style-type: none"> ◆ Expliquer, par l'histoire des sciences et des techniques, comment les sciences évoluent et influencent la société et l'environnement. ◆ Identifier les différentes échelles de structuration de l'Univers. 	5

2.2. Organisation et transformations de la matière

[...]

Connaissances et compétences associées	Exemples de situations, d'activités et de ressources pour l'élève
<i>Décrire la constitution et les états de la matière</i>	
<p>[...]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Espèce chimique et mélange. ◆ Notion de Corps pur et mélange. ◆ Masse volumique : relation $m = \rho \cdot V$, influence de la température. <p>[...]</p>	<p>Dans la continuité du cycle 2 au cours duquel l'élève s'est initié les différents états de la matière, ce thème a pour but de lui faire découvrir la nature microscopique de la matière et le passage de l'état physique aux constituants chimiques.</p> <p>[...]</p> <p>L'étude expérimentale des changements d'état est l'occasion de mettre l'accent sur les transferts d'énergie et d'aborder l'impact du réchauffement climatique sur les glaciers et la banquise lors des changements d'état.</p> <p>[...]</p> <p>La variation de la masse volumique avec la température permet d'aborder une cause de l'élévation du niveau des mers et océans en lien avec le réchauffement climatique.</p> <p>[...]</p>
<p>[...]</p>	<p>Ces études sont l'occasion d'aborder la dissolution de gaz (notamment celle du CO₂) dans l'eau au regard de problématiques liées à la santé et l'environnement.</p> <p>Ces études peuvent prendre appui ou illustrer les différentes méthodes de traitement de eaux. (dépollution, purification, désalinisation...). Elles permettent de sensibiliser les élèves au traitement des solutions avant rejet.</p>

Connaissances et compétences associées	Exemples de situations, d'activités et de ressources pour l'élève				
<i>Décrire et expliquer des transformations chimiques</i>					
<p>[...]</p> <p>Interpréter une formule chimique en termes atomiques.</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Dioxygène, dihydrogène, diazote, eau, dioxyde de carbone, méthane, protoxyde d'azote. 	<p>[...]</p>				
<p>Propriétés acidobasiques de quelques transformations chimiques</p> <p>[...]</p> <p>Identifier les gaz à effet de serre produits lors de transformations chimiques.</p> <p>[...]</p> <table border="1" data-bbox="116 638 546 874"> <tr> <td data-bbox="116 638 546 740" style="text-align: center;"><i>Avant</i></td> </tr> <tr> <td data-bbox="116 740 546 874"> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Réactions entre solutions acides et basiques. ◆ Réactions entre solution acides et métaux. </td> </tr> <tr> <td data-bbox="116 740 546 874" style="text-align: center;"><i>Après</i></td> </tr> <tr> <td data-bbox="116 740 546 874"> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Combustions dans l'air. ◆ Réactions de corrosion d'un métal. ◆ Gaz à effet de serre. </td> </tr> </table>	<i>Avant</i>	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Réactions entre solutions acides et basiques. ◆ Réactions entre solution acides et métaux. 	<i>Après</i>	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Combustions dans l'air. ◆ Réactions de corrosion d'un métal. ◆ Gaz à effet de serre. 	<p>[...]</p> <p>Elles permettent d'aborder des sujets liés à la sécurité, à notre impact sur le climat et l'environnement (émission de gaz à effets de serre, acidification des océans) et de proposer des pistes pour le limiter (ressources d'énergie décarbonée, traitement des déchets, recyclage, captation du dioxyde de carbone). C'est l'occasion de sensibiliser ainsi les élèves à la notion d'empreinte (ou bilan) carbone.</p> <p><i>La pratique expérimentale et les exemples de transformations abordées sont l'occasion de travailler sur des problématiques liées à la sécurité et à l'environnement.</i></p>
<i>Avant</i>					
<ul style="list-style-type: none"> ◆ Réactions entre solutions acides et basiques. ◆ Réactions entre solution acides et métaux. 					
<i>Après</i>					
<ul style="list-style-type: none"> ◆ Combustions dans l'air. ◆ Réactions de corrosion d'un métal. ◆ Gaz à effet de serre. 					
<i>Décrire l'organisation de la matière dans l'Univers</i>					
<p>[...]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Ordres de grandeur de quelques des distances astronomiques. <p><i>Connaître et comprendre l'origine de la matière.</i></p> <p><i>Comprendre que la matière observable est partout de même nature et obéit aux mêmes lois.</i></p> <p><i>Comparer les ressources terrestres de certains éléments.</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ <i>La matière constituant la Terre et les étoiles.</i> ◆ Les éléments sur Terre et dans l'Univers, (hydrogène, hélium, éléments lourds : oxygène, carbone, fer, silicium, terres rares...). <p>[...]</p>	<p>[...]</p>				

2.3. Mouvement et interactions

Attendus de fin de cycle

- ◆ Caractériser un mouvement.
- ◆ Modéliser une **interaction action exercée sur un objet** par une force caractérisée par un **point d'application**, une direction, un sens et une valeur.

Connaissances et compétences associées	Exemples de situations, d'activités et de ressources pour l'élève
<i>Caractériser un mouvement</i>	
[...]	[...]
<i>Modéliser une interaction action exercée sur un objet par une force caractérisée par un point d'application, une direction, un sens et une valeur</i>	
Identifier les inter actions mises en jeu (de contact ou à distance) et les modéliser par des forces. Associer la notion d'interaction à la notion de force. [...] <ul style="list-style-type: none"> ◆ Force : point d'application direction, sens et valeur. ◆ Force de pesanteur et son expression $P = mg$. 	[...] <p>Expérimenter des situations d'équilibre statique (balance, ressort, muscles force musculaire).</p> <p>Expérimenter la persistance du mouvement rectiligne uniforme en l'absence d'interaction (frottement).</p> <p>Expérimenter des actions produisant un mouvement (fusée, moteur à réaction).</p> <p>L'étude de la loi de gravitation est l'occasion d'aborder qualitativement la notion d'interaction.</p> [...]

2.4. L'énergie, ses transferts et ses conversions

[...]

Connaissances et compétences associées	Exemples de situations, d'activités et de ressources pour l'élève
<i>Identifier les sources, les transferts, les conversions et les formes d'énergie Utiliser la conservation de l'énergie</i>	
<p>[...]</p> <p>Identifier un dispositif de conversion d'énergie dont le fonctionnement s'accompagne d'une émission de dioxyde de carbone.</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Énergies cinétique (relation $E_c = \frac{1}{2} mv^2$), potentielle (dépendant de la position), thermique, électrique, chimique, nucléaire, lumineuse. <p>Identifier les sources, les transferts et les conversions d'énergie.</p> <p>[...]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Conversion d'une forme type d'énergie en une autre. <p>Analyser une situation où, pour un système donné, les valeurs des transferts d'énergie entrant et sortant sont différentes.</p> <p>[...]</p>	<p>[...]</p> <p>Les activités proposées permettent de différencier transferts et conversions d'énergie et de souligner que toutes les formes d'énergie ne sont pas équivalentes ni également utilisables.</p> <p>Ce thème permet d'aborder un vocabulaire scientifique visant à clarifier les termes souvent rencontrés dans la vie courante : chaleur, production, pertes, consommation, gaspillage, économie d'énergie, stockage d'énergie, énergies dites renouvelables.</p> <p>Ce thème fournit l'occasion d'analyser un bilan qualitatif d'énergie pour le système Terre-atmosphère.</p>
<p>Associer l'émission et l'absorption d'un rayonnement à un transfert d'énergie.</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Rayonnement émis par un objet. ◆ Absorption d'un rayonnement par un objet. ◆ Transfert d'énergie par rayonnement. ◆ Absorption du rayonnement terrestre par les gaz à effet de serre. 	<p>L'étude privilégiée des situations concrètes: chauffage par absorption d'un rayonnement, images thermographiques (images satellitaires, d'habitations, d'objets de la vie quotidienne, d'êtres vivants, ...).</p>
<i>Réaliser des circuits électriques simples et exploiter les lois de l'électricité</i>	
<p>Élaborer et mettre en œuvre un protocole expérimental simple visant à réaliser un circuit électrique répondant à un cahier des charges simple ou à vérifier une loi de l'électricité.</p> <p>[...]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Loi d'unicité des tensions. <p>[...]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Puissance électrique $P = U.I$. <p>[...]</p>	<p>[...]</p> <p>Les activités proposées permettent de sensibiliser les élèves aux enjeux d'économies d'énergie (éclairage, chauffage, ...) pour développer des comportements responsables et citoyens. L'évaluation d'un coût énergétique associé à une utilisation du numérique en est également une illustration pertinente.</p> <p>Cette thématique fournit l'occasion de présenter des dispositifs permettant de convertir de l'énergie électrique dans un objectif de stockage.</p>

2.5. Des signaux pour observer et communiquer

Connaissances et compétences associées	Exemples de situations, d'activités et de ressources pour l'élève
Signaux lumineux [...]	[...] Les élèves découvrent différents types de rayonnements (lumière visible, ondes radio, rayons X...)
Signaux sonores [...]	[...]
Signal et information Comprendre que l'utilisation du son et de la lumière permettent d'émettre, de transporter un signal donc une information.	Case vide.

2.6. Croisements entre enseignements

[...]

Sécurité, de la maison aux lieux publics : usage raisonné des produits chimiques, notamment pour le respect de l'environnement, pictogrammes de sécurité, gestion et stockage des déchets chimiques au laboratoire, pictogrammes de sécurité, risque électrique domestique.

[...]

Chimie et environnement : transformations chimiques : sources de pollution, dépollution biochimique, chimie verte, matériaux innovants, matières plastiques bio-sourcées ou biodégradables.

Recyclage des matériaux : tri des déchets, traitement des matières plastiques, protection de l'environnement.

[...]

CONCLUSION

Dans un deuxième article, une interprétation et une analyse sont faites de ces modifications, qui nous amènent à formuler des remarques et des propositions d'améliorations.

REMERCIEMENTS

Cet article est le fruit d'une collaboration active au sein de l'UdPPC. Merci au groupe des correspondants collège pour leur aide précieuse ainsi qu'à Vincent Parbelle et Marie-Thérèse Lehoucq pour leurs relectures et conseils.

BIBLIOGRAPHIE ET NETOGRAPHIE

- [1] F. Goitia, «Projet d'ajustement et de clarification des programmes (cycle 3) : comparaison du programme de 2015 avec le projet de 2018», *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 113, n° 1014, p. 603-618, mai 2019.
- [2] F. Goitia, «Projet d'ajustement et de clarification des programmes (cycle 4) : comparaison du programme de 2015 avec le projet de 2018», *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 112, n° 1009, p. 1367-1380, décembre 2018.
- [3] B.O. spécial n° 11 du 26 novembre 2015 :
http://cache.media.education.gouv.fr/file/MEN_SPE_11/67/3/2015_programmes_cycles234_4_12_ok_508673.pdf
- [4] Projet de renforcement des enseignements relatifs au changement climatique, à la biodiversité et au développement durable :
https://cache.media.education.gouv.fr/file/CSP/18/5/Renforcement_Cycle_4_Climat-DD-biodiversite_1215185.pdf
- [5] Projets d'ajustement et de clarification des programmes de quatre enseignements pour la scolarité obligatoire (cycles 2, 3 et 4) :
http://cache.media.education.gouv.fr/file/CSP/87/2/Projet_ajustement_et_clarification_Programmes_de_sciences_C_2-3-4_14_juin_2018_VDEF_978872.pdf
- [6] Lettre de saisine du Ministre :
https://cache.media.education.gouv.fr/file/CSP/07/5/Lettre_saisine_Climat_Dev_durable_Biodiversite_20062019_1146075.pdf



Cécile DUSSINE

Professeure de physique-chimie
Coresponsable collège national de l'UdPPC
Collège Jean Renoir
Neuville-sur-Saône (Rhône)



Florent GOITIA

Professeur de physique-chimie
Coresponsable collège national de l'UdPPC
Collège REP+ Romain Rolland
Clichy-sous-Bois (Seine-Saint-Denis)

Le tableau de Dmitri Mendeleïev

Académie de Rennes

Troisième prix collège

par **Patricia LEMAÎTRE**
Collège Le Volozen - 22800 Quintin
patricia.lemaitre@ac-rennes.fr

L S'AGIT D'UN PROJET impliquant tous les élèves de la classe. Le sujet concernant le tableau périodique des éléments chimiques peut paraître difficile pour des élèves de collège. C'est pourquoi, l'approche est restée vague au départ permettant ainsi aux élèves de proposer des idées originales concernant ce tableau affiché au mur de la salle de physique-chimie. La problématique choisie est la réalisation d'un clip original en arts plastiques sur la classification périodique des éléments, à partir des productions d'une classe de trente élèves. Les élèves sont amenés à faire preuve de créativité en utilisant plusieurs techniques dans la pratique plastique. Tout le travail de recherche, de conception et de réalisation a été réalisé en classe avec le matériel et l'espace dont nous disposons.

1. DÉMARCHE SUIVIE

Les objectifs du projet sont :

- ◆ exploiter les idées des élèves sur un sujet scientifique ;
- ◆ faire preuve d'initiative pour créer un clip ;
- ◆ faire un projet collaboratif avec l'ensemble des élèves d'une classe.

Il était important de faire participer tous les élèves d'une même classe en développant des compétences. Tout au long du projet, les compétences travaillées par les élèves sont :

- ◆ extraire, organiser les informations utiles et les transcrire dans un langage adapté ;
- ◆ faire preuve de créativité, mobiliser ses connaissances ;
- ◆ mobiliser des moyens divers (matériaux, techniques...) dans différents champs de la pratique plastique pour servir un projet ;
- ◆ concevoir, créer, réaliser des productions plastiques ;
- ◆ utiliser des outils numériques au service d'un projet ;
- ◆ développer l'autonomie.

1.1. Recherche d'informations sur le tableau des éléments

Ces recherches ont permis aux élèves de découvrir qui était Dmitri Mendeleïev

et de trouver des informations sur les éléments présents dans le tableau...

- ◆ *Activité documentaire* : «Mendeleïev, un chimiste russe du XIX^e siècle».
- ◆ *Recherche Internet sur le tableau périodique* : travail en binôme sur une case du tableau à l'aide des tablettes. Chaque élément fait l'objet d'une fiche. Avec tous les élèves de troisième du collège : toutes les fiches ont été placées dans un porte-vues. Il s'agit d'un travail collaboratif : c'est une base de travail qui va servir aux classes de troisième retenues pour créer le clip.

1.2. Réflexion collective sur le projet

Les pistes de travail envisagées sont :

- ◆ qui était Mendeleïev ;
- ◆ histoire du tableau ;
- ◆ que trouve-t-on dans le tableau ;
- ◆ comment donner de l'originalité au projet.

1.3. Investigation

Les élèves ont été répartis par groupe avec une feuille de route permettant de programmer et de répartir les tâches de chacun :

- ◆ réflexion sur la problématique choisie par le groupe ;
- ◆ mise en place du matériel : recherche d'informations et de photos, découpage d'un tableau périodique photocopié, matière, musique... ;
- ◆ prise d'initiatives dans les groupes ;
- ◆ prise de vue, enregistrement de voix ;
- ◆ discussion pour faire des choix pertinents.

1.4. Montage vidéo en salle informatique et finalisation du projet

Les élèves ont utilisé le logiciel *Movie Maker*. Les élèves ont déjà utilisé ce logiciel depuis le niveau sixième au collège.

Des discussions collectives ont permis de se mettre d'accord sur les titres, sur les transitions entre chaque production... Des remarques constructives ont permis :

- ◆ de bien traduire le projet de chaque groupe ;
- ◆ de modifier la durée de certaines parties pour respecter les trois minutes : durée d'apparition de certaines photos, défilement accéléré...

2. CONDITIONS DE MISE EN ŒUVRE

Il s'agit d'un projet de classe : tous les élèves ont participé à l'élaboration du clip. Les élèves se sont placés en petit groupe de trois à quatre élèves selon leurs affinités : chacun a commencé à réfléchir à une idée autour du tableau.

Lors de la réalisation, les difficultés rencontrées ont été de :

- ◆ rendre cohérent l'ensemble des productions de chaque groupe d'élèves ;
- ◆ faire travailler tous les élèves de la classe ;
- ◆ tenir compte des idées, faire des choix pertinents au sein d'un même groupe ;
- ◆ corriger les erreurs.

Tout le projet a été travaillé sur les heures d'enseignement de physique-chimie et d'arts plastiques avec le matériel et l'espace dont nous disposons au collège. Plusieurs séances ont été menées en co-animation par les deux professeurs, permettant d'allier rigueur scientifique et créativité artistique.

Répartition horaire

- ◆ 1 h 30 : recherche sur la vie de Mendeleïev et sur les éléments du tableau périodique.
- ◆ 3 h : exploitation des idées, prises de vue et enregistrement des voix en salle d'arts plastiques.
- ◆ 4 h : montage vidéo, ajout des voix et de la musique en salle informatique.
- ◆ 1 h : finaliser le clip.

3. RÉSULTAT FINAL

Il s'agit d'un clip de trois minutes correspondant aux productions de tous les élèves de la classe.

- ◆ Brève présentation de Mendeleïev : utilisation de plusieurs techniques d'art plastique pour pré-senter le chimiste :
 - *groupe A* : portrait de Mendeleïev à la craie.
 - *groupe B* : portrait de Mendeleïev en pop art : apporter une touche originale au projet.
 - *groupe C* : résumé de la vie de Mendeleïev : dates, famille, ses recherches.
- ◆ Évolution du tableau à partir de la proposition de Mendeleïev :
 - *groupe A* : portrait de Mendeleïev à la craie.
 - *groupe D* : à partir du tableau de Mendeleïev de 1869, explication sur le classement proposé, apparition des éléments prévus par Mendeleïev puis la découverte des gaz rares.
 - *groupe E* : comment le tableau a évolué pour intégrer ces gaz rares ?

- ◆ Que trouve-t-on dans le tableau actuel ?
 - *groupe F* :
 - lecture du titre en russe : les familles des éléments chimiques dans le tableau périodique ;
 - faire apparaître les familles d'éléments dans le tableau en couleur.
- ◆ Choix de présentation d'éléments présents dans notre environnement : utilisation de la matière :
 - *groupe G* : petite animation pour la présentation de cette partie.
 - *groupe H* : petites vidéos sur des éléments de la vie quotidienne : fluor, titane, sodium, étain, aluminium, phosphore, lithium.

CONCLUSION

Le travail des élèves a permis de réaliser de belles productions créatives et originales. Le clip est le fruit du travail d'une classe ; tous les élèves ont participé. Un enthousiasme réel et une volonté de bien faire ont été relevés tout au long du projet. Enfin, après tout le travail fourni autour du projet, les élèves n'ont plus le même regard sur la classification périodique des éléments.



Les élèves primés à l'Université de Rennes 1 le 2 mai 2019.

SOURCES UTILISÉES

- ◆ Jeulin, Tableau périodique mural.
- ◆ Wikipédia : <https://www.wikipedia.org>
- ◆ CEA : <http://www.cea.fr/multimedia/pages/editions/posters/le-tableau-de-mendeleiev.aspx>
- ◆ Culture Sciences chimie : <http://culturesciences.chimie.ens.fr>

Complément de l'article

Cet article comporte un complément nommé :

- ◆ *Clip vidéo sur Dmitri Mendeleïev.mp4*

Il est disponible sur le site de l'UdPPC sous la forme d'un fichier zippé 10210209.



Patricia LEMAÎTRE

*Professeure de sciences physiques
Collège Le Volozen
Quintin (Côtes d'Armor)*

L'Actualité Chimique

communiqué

contact **Séverine BLÉNEAU-SERDEL**
Société chimique de France - 75005 Paris
bleneau@lactualitechimique.org

SOMMAIRE DE FÉVRIER 2020

n° 448 (60 pages - version papier hors abonnement 20 € - version électronique 15 €)

à télécharger dès maintenant sur <http://www.lactualitechimique.org>

- ◆ **Des outils connectés et ludiques pour enseigner la chimie**, c'est ce que nous proposons trois projets très différents. Le premier utilise la réalité virtuelle pour observer et manipuler les molécules, support pour l'enseignement et la compréhension de systèmes complexes. Le second présente deux exemples d'enseignement, « Projet de chimie » pour étudiants chimistes et « Petits meurtres entre atomes » pour étudiants de tous horizons. Enfin, le troisième nous emmène explorer CHIMACTIV, un site pour se former à l'analyse chimique.
- ◆ **Et aussi... Du nano au macro** : de nouveaux matériaux transparents, flexibles et très bons conducteurs électriques. Histoire : de l'étude des pierres à la radiocristallographie. Les bétons de demain. Saviez-vous que nous devons le kevlar à la chimiste Stephanie Kwolek ?



Éditorial

La chimie omniprésente, pas toujours là où vous l'attendez.

Clin d'œil étymologique

À propos du kevlar.

À propos de

Brevets : votre invention est-elle plausible ? ◆ La demande sociale doit-elle piloter la recherche ?

Recherche et développement

Les thiosucres : réactivités et applications ♦ Du nano au macro : de nouveaux matériaux à la fois transparents, flexibles et très bons conducteurs électriques.

Principes et substances actifs

Nouveaux principes actifs pharmaceutiques et nouvelles substances actives phytopharmaceutiques.

Enseignement et formation

Scruter les molécules en réalité virtuelle, pour quoi faire ? ♦ Petits meurtres entre atomes : pour le chimiste... et pour les autres ! ♦ CHIMACTIV, un site pour se former à l'analyse chimique.

Que voyez-vous ?

Histoire d'estuaires.

Histoire de la chimie

De l'étude des pierres à la radiocristallographie.

Un point sur

Fiche n° 73 : Les bétons de demain.

Le sommaire détaillé, les résumés des certains articles et rubriques en téléchargement libre sont disponibles sur le site de *L'Actualité Chimique* : www.lactualitechimique.org

N'hésitez pas à visiter régulièrement le site où vous attendent aussi les archives d'une partie des anciens numéros, ainsi que les rubriques d'actualité et de nombreux articles plus récents.



Séverine BLÉNEAU-SERDEL

Rédactrice en chef adjointe

Société chimique de France

Paris

Parus au BO

Les derniers bulletins officiels

par Jean WINTHER
75015 Paris
jwinther@club_internet.fr

La sélection ci-dessous est également disponible sur le serveur de l'UdPPC :
<http://www.udppc.asso.fr> – Rubrique « Lu et testé » Dans le BO »



Bulletin Officiel spécial n° 2

13 février 2020

Épreuve orale dite « Grand oral » de la classe de terminale de la voie générale à compter de la session 2021 de l'examen du baccalauréat note de service n° 2020-036 du 11 février 2020.

Épreuve de l'enseignement de spécialité « physique-chimie » de la classe de terminale de la voie générale à compter de la session 2021 de l'examen du baccalauréat note de service n° 2020-031 du 11 février 2020.

- ◆ Épreuves des enseignements de spécialité dans la série sciences et technologies de laboratoire (STL) à compter de la session 2021 de l'examen du baccalauréat note de service n° 2020-014 du 11 février 2020.

Bulletin Officiel n° 6

6 février 2020

- ◆ Travaux d'initiative personnelle encadrés (TIPE)
Thème des TIPE en mathématique et physique (MP), physique et chimie (PC), physique et sciences de l'ingénieur (PSI), physique et technologie (PT), technologie et sciences industrielles (TSI), technologie, physique et chimie (TPC), biologie, chimie, physique et sciences de la Terre (BCPST) et technologie-biologie (TB) pour l'année scolaire 2020-2021 arrêté du 15 février 2020.

Bulletin Officiel n° 4

23 janvier 2020

- ◆ Brevet de technicien supérieur
Définition et conditions de délivrance du Brevet de technicien supérieur (BTS) Mé-

tiers de la chimie : modification arrêté du 21 novembre 2019 – J.O. du 24 décembre 2019.



Jean WINTHER

Professeur retraité

Paris

L'UdPPC au fil des jours...

FINALE NATIONALE DU CONCOURS DES OLYMPIADES DE PHYSIQUE FRANCE

(Paris, Université Paris-Diderot, les 31 janvier et 1^{er} février 2020)

La vingt-septième finale nationale des Olympiades de Physique France (OdPF) s'est déroulée du 31 janvier au 1^{er} février 2020, à l'Université Paris-Diderot. Le parrain de cette édition, Julien Bobroff, professeur à l'Université Paris-Saclay, a donné une excellente conférence intitulée *Suprématie quantique*. Il y avait là de quoi motiver toute la jeunesse pour ce champ disciplinaire.

L'organisation de ces deux jours, parfaite en tout point, a été l'occasion de découvrir des projets scientifiques et des équipes de lycéens et de lycéennes motivées, attentives, enthousiastes et désireuses de partager leurs travaux.

Le palmarès de la vingt-septième édition est disponible sur le site des Olympiades⁽¹⁾. Le prix de l'UdPPC a été remis par Marie-Thérèse Lehoucq, présidente de l'association, à une équipe corse pour son projet intitulé *Au soleil couchant*. Tout un programme. Bravo à tous !

Le Bureau national
Le 10 février 2020

(1) https://odpf.org/images/archives_docs/27eme/docs/palmares.pdf

Compte-rendu du 11^e forum des enseignants innovants

Paris (Parc des expositions de la Porte de Versailles) : samedi 23 novembre 2019

par **Philippe FARGEIX**
Lycée Jean Monnet - 03400 Yzeur
fargphi1@free.fr



Le samedi 23 novembre 2019 s'est déroulé le 11^e forum des enseignants innovants, traditionnellement organisé par le Café pédagogique. Cette année, le journal *Libération* s'est associé à cet événement.

Deux cents projets ont concouru à ce forum. Le jury, constitué de professeurs représentants de dix associations professionnelles concernant le primaire et les disciplines de l'enseignement secondaire dont l'UdPPC et de membres du Café pédagogique, a sélectionné dans un premier temps cent projets sur les deux cents proposés pour que les enseignants viennent les exposer et les présenter à Paris.

Cela a permis, lors de cette journée riche en échanges et par le partage des expériences, de tisser des liens entre enseignants de l'école primaire, de collège et de lycée puisque chacun a pu présenter son projet aux autres professeurs et, à travers la créativité, de découvrir de nouvelles pratiques pédagogiques, de nouvelles initiatives, de nouveaux projets disciplinaires ou interdisciplinaires.

La matinée commence avec la présentation des différents projets devant différents stands. Je découvre des projets très variés. Voilà quelques exemples parmi l'ensemble des projets :

- ◆ *Au niveau de l'école primaire*, un enseignant proche de la cité antique d'Alba-la-Romaine (Ardèche) a fait reconstituer les différents monuments avec des Lego® puis avec une imprimante 3D pour travailler l'histoire et les mathématiques avec la notion de proportionnalité et d'échelle. Il a terminé avec l'utilisation du jeu Minecraft pour reconstituer la cité gallo-romaine. Les élèves de plusieurs classes se sont investis au point de présenter la cité et de servir de guide au musée archéologique d'Alba-la-Romaine. Une autre enseignante a permis aux parents d'élèves de différentes nationalités de venir dans la classe pour partager les différents langages et bénéficier d'une expérience riche du vivre ensemble. Une autre, à l'école élémentaire, grâce à la langue

des signes française (LSF) a accompagné et débloqué la parole chez certains enfants (introvertis, primo-arrivants, dysphasiques, autistes). Elle a aussi grandement facilité la mémorisation des lettres de l'alphabet. Elle a développé l'observation, l'attention et la mémorisation. Elle a créé une cohésion entre tous les acteurs du projet : enfants, enseignants et familles. Elle a apporté plus de sérénité au sein de l'école.

- ◆ *Au niveau du collège*, un enseignant de Sciences de la vie et de la Terre (SVT) a entraîné ses élèves de sixième à la piscine pour leur faire une initiation à la randonnée palmée. À travers cette randonnée palmée en milieu marin et une exploration de la plage à marée basse, l'ensemble des sixièmes sont amenés à prendre conscience de la diversité et de la fragilité de l'écosystème. Ils observent, ressentent le milieu dans lequel ils ou elles se déplacent, et doivent analyser le milieu aquatique (êtres vivants, géologie). Grâce à l'enseignement spiralaire, les élèves de quatrième deviennent responsables d'un secteur marin. Faire de l'archéologie et jouer à Indiana Jones dans un collège REP+ où un archéologue de l'INRAP (Institut national de recherches archéologiques préventives) suit la classe toute l'année et les conseille de manière scientifique. Il nous permet aussi de rencontrer ses collègues comme le lithicien qui explique comment faire un feu comme les hommes préhistoriques ou le céramologue qui vient pour remonter des poteries brisées avec l'aide des enfants. Chaque apprenti archéologue de sixième est tutoré par un lycéen qui lui explique des techniques d'archéologie. Ce même sixième devient lui-même tuteur d'un petit de maternelle et lui explique les mêmes techniques avec ses propres mots. Le projet est aussi transdisciplinaire : le professeur de mathématiques présente la symétrie avec des mosaïques romaines tandis que celui de musique crée des instruments de musique préhistorique et propose un concert aux parents. Nos élèves deviennent des archéo-ambassadeurs dans la ville et expliquent l'archéologie à leur manière ; récemment, ils sont même allés dans une maison de retraite montrer les résultats de leurs dernières fouilles ; un peu comme Indiana Jones... D'autres projets en collège concernent les jeux mathématiques, la programmation pour déterminer sa moyenne au DNB (diplôme national du brevet) et comment faire pour s'améliorer, le tour du monde des îles hispaniques pour construire le programme d'espagnol en quatrième, mesurer la qualité de l'air en EST, un projet Erasmus+ pour construire une comédie musicale avec des participants de cinq pays...

- ◆ *Au niveau du lycée*, plusieurs classes d'un lycée ont créé un *escape game* autour de Turing et Enigma, le projet Twittlycée compte une vingtaine de twittclasses de lycée général, technologique et professionnel soit vingt enseignants et environ six cents élèves. Nous cherchons à accroître le nombre de twittclasses pour rendre le projet plus dynamique et plus intéressant pour les élèves et les enseignants ; comment modifier l'agencement d'une salle de classe pour travailler différemment...

D'autres projets sont résumés sur le site :

<http://enseignants-innovants-2019.net/projets.php>

En fin de matinée, Jean-Michel Blanquer, ministre de l'Éducation nationale et de la Jeunesse, est venu découvrir quelques projets. L'après-midi a été consacrée à des débats et des conférences.

Trois histoires inspirantes : celle de la vie de Germaine Tortel, une pédagogue de l'époque de Montessori peu connue racontée par Andrée Makédonsky ; l'innovation pédagogique vue d'Amérique latine (en vidéo), où se trouve Philippe Meirieu ; Lilia Ben Hamouda et Laaldja Mahamdi, deux directrices d'école racontent comment elles rivalisent d'idées pour associer les parents.

Puis un débat est présenté sur le thème *L'innovation pédagogique peut-elle changer l'école ?* Trois intervenants :

- ◆ Philippe Champy, auteur de *Vers une nouvelle guerre scolaire* (La Découverte) ;
- ◆ Yves Reuteur, auteur de *Une école Freinet : fonctionnements et effets d'une pédagogie alternative* (L'Harmattan) ;
- ◆ Catherine Robert, professeure de philosophie au lycée Le Corbusier, à Aubervilliers, qui mène un projet « anthropologie pour tous ».

Puis vers 16 heures a eu lieu la remise des prix. Dix prix au total. Cinq prix correspondent aux votes des participants (vote du public) et cinq autres prix ont été remis par les membres du jury.

Ce fut une journée vraiment très intense et très riche en échanges.

Compte-rendu du Conseil de l'UdPPC

Université Paris-Diderot (Paris 7) : samedi 18 janvier 2020

1. VIE DE L'ASSOCIATION

1.1. Le site

L'association a dû procéder au retour à l'ancien site de l'association et à la base de données gérée par la société Exalto depuis de nombreuses années. L'adhésion/abonnement « date à date » est opérationnel. Pour toutes questions à son sujet, vous pouvez consulter le secrétariat de l'association.

L'ancien site doit être révisé et actualisé. D'anciens fichiers seront archivés. Des rubriques devront être revues. Par exemple, la rubrique *positions* de l'association sera réorganisée pour expliciter les soutiens, les prises de positions et les communiqués de l'association. Les sponsors et les partenaires de l'association avec leurs logos sont déjà en ligne. La liste des sites académiques est à jour. Notons un nouveau venu, le site académique de l'académie de Nancy-Metz, fort bien fait. L'onglet *sécurité au laboratoire* pourrait être revu et actualisé par Marion Tironneau. Les consignes sont toujours d'actualité. En revanche, des références vers des textes officiels sont à reprendre. L'onglet *collège* est en cours de révision sous la responsabilité de Florent Goitia et Cécile Dussine. Pour les autres onglets, il faudra identifier des personnes pour les réactualiser. Enfin, un nouvel onglet *enseignement supérieur* sera créé.

Pour cinq mille euros, l'UdPPC souhaite moderniser l'interface de sa base de données. Dans un second temps, il pourra être envisagé de rénover l'outil BupDoc, grâce à un travail conjoint entre le développeur de la société Exalto, Pascal Gardeur, et notre collègue Olivier Kempf.

1.2. Validation d'un président académique

Paul Cousandier est validé comme président de la section académique de Strasbourg, à l'unanimité des participant-es au Conseil.

1.3. Le problème de délivrer des reçus fiscaux

L'UdPPC n'étant pas une association déclarée d'intérêt général, il ne lui est légalement pas possible de délivrer des reçus fiscaux suite à des dons. De plus, par définition, les dons sont réalisés à titre gratuit. Cotisations et dons ne peuvent donc pas être confondus sur le plan fiscal, dans la mesure où les premières entraînent des

contreparties. La pratique de délivrer un reçu fiscal en lien avec une cotisation doit donc être abandonnée. Les adhérents vont en être informés. Cependant, quel impact sur les adhésions ? La question est soulevée. Une autre question est formulée : l'association peut-elle compenser financièrement la perte de la réduction d'impôts sur l'adhésion ? Soit 20 € sur 30 €.

L'abandon des remboursements de frais de déplacement et l'abandon de droits d'auteurs sont des dons possibles. Ils pourraient donc, à l'avenir, donner droit à l'édition de reçus fiscaux.

1.4. Le bilan sur les adhésions

- ◆ 440 collectivités au 31 décembre 2019 (diminution de 25 par rapport au 31/12/2018 et diminution de 11 au 31/12/2017) ;
- ◆ 1806 particuliers au 31 décembre 2019 (augmentation de 52 par rapport au 31/12/2018).

Comment informer les étudiants MEEF (Métiers de l'enseignement, de l'éducation et de la formation) de l'existence et des actions de l'UdPPC ? Comment les inciter à adhérer ? Une présentation de l'association semble pertinente. Elle existe déjà dans l'académie de Bordeaux et dans l'académie de Reims. Il faudrait la généraliser. Il serait alors intéressant de saisir cette occasion pour proposer aux étudiants d'adhérer gratuitement à l'association, en remplissant un document papier. L'année suivante, pour toute ré-adhésion payante, la consultation annuelle du *Bup* en ligne serait offerte.

1.5. La création d'établissements secondaires – Vote du Conseil de l'association

Pour les congrès en région, certaines subventions sont difficiles à obtenir, car l'association est perçue comme « parisienne ». La création d'établissements secondaires est fort utile. C'est une procédure qui dépend de l'INSEE (Institut national de la statistique et des études économiques) et attribue un numéro SIRET local à la section académique concernée. Un établissement secondaire vient d'être créé à Bordeaux.

Le Conseil procède au vote suivant :

- ◆ création d'un établissement secondaire dans l'académie de Lille ;
- ◆ création d'un établissement secondaire dans l'académie de Clermont-Ferrand ;
- ◆ création d'un établissement secondaire dans l'académie de Rennes ;
- ◆ changement d'adresse pour l'établissement secondaire de Nancy.

Le Conseil adopte à l'unanimité des présent-es les quatre décisions soumises au vote.

1.6. La demande de subventions 2020 de la DGESCO

Il est décidé que la demande de subvention auprès de la DGESCO (Direction générale de l'enseignement scolaire) soumise par le Bureau national ne portera que sur le projet nancéien d'organisation du congrès 2020 de l'UdPPC.

2. LYCÉE GÉNÉRAL ET LYCÉE TECHNOLOGIQUE

2.1. Les Épreuves communes de contrôle continu (E3C)

Le Conseil fait remonter le manque de préparation et d'organisation des E3C. Pour la très grande majorité des collègues, le logiciel *Santorin* de correction des copies en ligne n'est pas connu. Que permet-il réellement de faire ? Une formation sera-t-elle dispensée ?

La rémunération du travail de correction est de 50 €, quelle que soit la taille du paquet de copies. Cette rémunération est apparue en cours de route. À l'origine, il n'était donc pas prévu de rémunérer les correcteurs.

Les collègues évoquent des refus de choix de sujets, la possibilité de mettre un vingt à toutes les copies. Soit des formes de résistance face à l'impréparation constatée. Ils soulignent aussi les parades mises en place par l'administration et les sanctions possibles. Par exemple, le choix des sujets peut être alors effectué par des inspecteurs pédagogiques régionaux, à la lecture des cahiers de textes numériques.

Un problème est soulevé pour les futures E3C d'enseignement scientifique. Le sujet mêlera à la fois de la physique-chimie, des mathématiques et des sciences de la vie et de la terre. Le correcteur désigné corrigera-t-il toutes les questions ? Si oui, quelles compétences peut-il avoir à corriger de la physique-chimie lorsqu'il enseigne les SVT (Sciences de la vie et de la Terre) et vice-versa ? Concernant, les sujets de physique-chimie de la spécialité abandonnée en première, la présence d'annexes à compléter n'est plus possible. Les sujets ne doivent pas être trop lourds à scanner et le format différent des feuilles concernées semble poser un problème pour l'anonymisation des copies.

2.2. La conférence des associations de professeurs spécialistes

Le compte-rendu de l'entrevue entre la conférence des associations de professeurs spécialistes et le conseiller aux affaires pédagogiques du cabinet du Ministre, Matthieu Lahaye, est en ligne. Des précisions sur le grand oral devraient sortir prochainement.

3. COLLÈGE

Le programme de la journée nationale « Collège », du samedi 21 mars 2020, est en cours de finalisation. L'inscription est obligatoire et est ouverte à tous-tes (adhérents ou non ; collège ou lycée). Lors des interventions, priorité doit être donnée aux enseignants de collège et en activité. L'équipe de CultureSciences filmiera les conférences, notamment celle sur l'Étude microscopique et macroscopique de la matière et de ses transformations.

4. FUTURS CONGRÈS

4.1. Nancy (du 25 au 28 octobre 2020)

Il est difficile d'obtenir des subventions de la région, du département, du rectorat et de la ville. Certains lieux de prestige sont chers à la location : salons de l'Hôtel de Ville, amphithéâtre Parisot et École des mines.

Trois conférences plénières sont confirmées ainsi que des ateliers (tableau périodique en bois, planétarium mobile, sécurité INRS⁽²⁾) et une table ronde sur la médiation scientifique. L'exposition *Magnétique* conçue par l'Institut Jean Lamour, unité mixte de recherche CNRS-université de Lorraine, devrait être ouverte avec Hélène Fischer comme guide. La pièce de théâtre *La vie de Galilée* est programmée pour lundi soir, et le dernier jour du congrès est réservé aux visites de laboratoires et d'entreprises. Il est prévu peu de visites touristiques (mine de sel de Varangéville et cristallerie Daum). Les inscriptions se feront sur un site spécialement conçu pour l'occasion. Les repas seront pris au Crous.

4.2. Lille (2021)

Le premier jour du congrès se déroulera dans le grand amphithéâtre de six cent cinquante places des sciences juridiques de Lille avec le restaurant universitaire juste à côté. Les deuxième et troisième jours, nous serons sur le campus universitaire de Villeneuve-d'Ascq. Le bâtiment LILLIAD sera mis gratuitement à disposition. L'affiche du congrès est prête et le titre de celle-ci est trouvé : *Sciences en Nord*. La programmation n'est pas encore définitive. Yaël Nazé, astrophysicienne belge, devrait donner une conférence sur « Astronomie et étrange ». Patrick Cordier, enseignant-chercheur dans le domaine de la minéralogie, devrait aussi être présent.

Nathalie Lebrun ajoute quelques mots sur la future loi de programmation pluriannuelle de la recherche. Les modalités de recrutement des enseignants-chercheurs devraient évoluer.

(2) Institut national de recherche et de sécurité.

4.3. Clermont-Ferrand (2022)

Des contacts ont été pris pour rechercher des lieux et des conférenciers. Les visites touristiques sont arrêtées : ville de Vichy et L'Oréal ; Puy-de-Dôme et Saint-Nectaire ; coutellerie de Thiers et industrie du papier ; la Bourboule, le puy de Sancy et les eaux du Mont d'Or.

4.4. Rennes ou Brest (2023)

Les collègues de la section académique de Rennes se sont porté-es volontaires pour organiser le congrès de 2023 et soumettent au Conseil la question : « Quelle ville choisir entre Rennes et Brest pour le congrès ? »

5. CONCOURS

5.1. Olympiades de Physique France (31 janvier et 1^{er} février 2020)

La finale se tiendra les 31 janvier et 1^{er} février 2020, à l'Université Paris-Diderot. Vingt-cinq équipes sont sélectionnées. L'Agence pour l'enseignement français à l'étranger (AEFÉ) ne finance plus les déplacements des équipes de l'étranger. L'équipe australienne a dû trouver un sponsor pour se rendre à Paris. La disparition des travaux personnels encadrés (TPE) ainsi que la mise en place de la réforme du lycée impacte le nombre d'équipes qui s'engagent dans le concours.

5.2. Olympiades nationales de la chimie (1^{er} et 2 avril 2020)

La finale se tiendra les 1^{er} et 2 avril 2020, au lycée d'Arsonval de Saint-Maur-des-Fossés. Le thème du concours est *Chimie dans la ville*. Celui de 2021 sera *Chimie et cosmétiques*. Les modalités de passation des épreuves sont inchangées. Cérémonie de remise des prix à la Bibliothèque nationale de France (BNF).

5.3. Concours Ampère

Le Musée Ampère, la maison d'Ampère et la Société de l'électricité, de l'électronique et des technologies de l'information et de la communication (SEE) organisent cette année un concours à l'occasion du 200^e anniversaire de la découverte d'André-Marie Ampère des lois de l'Électrodynamique. Dans son organisation, le concours Ampère s'inspire du concours Mendeleïev. Il y a environ une quarantaine de groupes inscrits : onze en lycée dont six en lycée professionnel, un en primaire, vingt-huit en collège. Les inscriptions sont prolongées jusqu'au 31 mars 2020, qui est aussi la date limite d'envoi des productions.

Sur votre agenda...

Retrouvez en ligne dès maintenant toutes les manifestations à partir du site de l'UdPPC :
<http://www.udppc.asso.fr/national/index.php/sur-votre-agenda>

Le samedi 14 mars 2020

Réunion pour la préparation du congrès - Paris.

Le samedi 21 mars 2020

Journée collège proposée à tous les collègues adhérents et non-adhérents.

Université Paris-Diderot (Paris 7) - Bâtiment « La Halle aux Farines » - Paris.

Les mercredi 1^{er} et jeudi 2 avril 2020

36^{es} Olympiades nationales de la chimie

Le thème : « Chimie dans la ville ».

Deux concours : scientifique (1^{er} et 2 avril 2020) et « Parlons chimie » (2 avril 2020).

Remise des prix : 3 avril 2020.

Du lundi 6 au mercredi 15 juillet 2020

Les 52^{es} Olympiades internationales de chimie (IChO)

Istanbul (Turquie).

Du samedi 18 au dimanche 26 juillet 2020

Les 51^{es} Olympiades internationales de physique (IPhO)

Vilnius (Lituanie).

Du dimanche 25 au mercredi 28 octobre 2020

68^e congrès des professeurs de physique et de chimie

Le thème : « Place aux sciences » - Nancy.

Réunions du Bureau national, Assemblée générale et du Conseil de l'association

Afin que vous puissiez soumettre des questions que vous voulez voir traitées aux instances nationales de l'association, nous faisons figurer ici les dates de ces réunions.

- ◆ Les prochaines réunions du Bureau national se tiendront les 25 mars et 13 mai 2020.
- ◆ L'Assemblée générale se tiendra le samedi 13 juin 2020 à 10 h à l'Université Paris-Diderot (Paris 7) - Bâtiment « la Halle aux Farines » - 16 rue Française Dolto - Paris 13^e. Elle sera suivie de la réunion du Conseil à 17 h.

Concours



Ouvert à tous de 7 à 77 ans
Ecoles, collèges, lycées, supérieur

En 2020, on fête le 200^{ème} anniversaire de la
découverte du courant électrique par

Ampère



Réalise un dessin, une histoire, une vidéo, une petite pièce de théâtre, une affiche, ou bien une expérience qui montre combien Ampère était un grand savant et participe au concours qui commémore le 200^{ème} anniversaire de la découverte d'Ampère.

Les meilleurs réalisations seront récompensées.

La production ne portera pas forcément sur l'électricité elle-même mais peut aussi illustrer l'aspect humain et historique.

Ouverture des inscriptions : 1 septembre 2019

Date limite d'envoi des projets : 30 mars 2020

Renseignements et règlement du concours : <http://amperemusee.fr>

Concours organisé par la maison d'Ampère : Poleymieux au Mont d'Or





36^{es} ● LYMPIADES DE CHIMIE

Mercredi 1^{er} et jeudi 2 avril 2020, renseignements et inscription
auprès de votre professeur de physique-chimie et sur olympiades-chimie.fr



AP - AOP - AOP



The poster features a dark blue background with a white central area. At the top left, the logo for 'forum international de la météo de la climat' is displayed in white and green. To the right, there are green icons of wind turbines, a sun, and solar panels. The main text, 'APPEL À CANDIDATURES PRIX DE L'ÉDUCATION POUR LE CLIMAT 2020', is written in bold green and black letters. Below the text, there are several green icons: a globe, an electric car, 'CO₂', a gas pump, a house with a leaf, and a lightbulb. A large green megaphone is on the left. At the bottom, the website 'FORUMMETEOCLIMAT.COM' and the deadline 'DATE LIMITE : LE 6 AVRIL 2020' are written in white. Logos for 'météo climat', 'ecoact', and a globe icon are at the bottom right.

forum international
de la météo
de la climat

**APPEL À
CANDIDATURES
PRIX DE
L'ÉDUCATION
POUR LE CLIMAT
2020**

FORUMMETEOCLIMAT.COM
DATE LIMITE : LE 6 AVRIL 2020

météo climat ecoact

l'actualité chimique

Abonnez votre lycée pour un an à **L'Actualité Chimique**

Tarif spécial lycée

11 numéros par an
(y compris les numéros spéciaux)

- Abonnement papier + électronique
 - France métropolitaine 120 €
 - PARCNA-COM, UE, Suisse 168 €
 - Reste du monde 175 €
- Abonnement électronique seul
 - France/étranger 70 €

L'Actualité Chimique, le journal de la Société Chimique de France, vous informe sur le monde de la chimie française, particulièrement en ce qui concerne la recherche scientifique, académique et industrielle et l'enseignement. Elle traite aussi des interfaces avec la chimie, comme le médicament, les matériaux et le génie des procédés.

Par ses numéros réguliers et ses numéros thématiques, cette revue est un outil indispensable pour tous, scientifiques et étudiants, notamment dans le cadre de la préparation des TPE ou TIPE.

Elle fournit également pour les enseignants une source irremplaçable d'articles scientifiques, d'informations et de réflexions sur la vie et l'évolution des sciences chimiques, qu'ils seront heureux de trouver pour construire leur enseignement.



Abonnements et adhésions :

SCF, 250 rue Saint-Jacques, F-75005 Paris – Tél. : + 33 (0)1 40 46 71 66/60
adhesion@societechimiquedefrance.fr – www.societechimiquedefrance.fr

Rédaction :

SCF, 28 rue Saint-Dominique, F-75007 Paris – Tél. : + 33 (0)1 40 46 71 64
redaction@actualitechimique.org – www.actualitechimique.org



CHIMIE & TERROIR

Osez l'expérience !

Ateliers, animations, rencontres

14 - 16 mai 2020

Espace André LEJEUNE, GUÉRET

Entrée libre et gratuite
www.chimieetsociete.org



(BnF) AJSPI   SIF SFdS VSMAT 

Sciences | Médias

Femmes scientifiques à la Une !

Comment améliorer la représentation des femmes scientifiques dans les médias ?

Journée de conférences et débats



Événement soutenu par :



28 mai 2020
Bibliothèque nationale de France - Paris



Inscription gratuite et obligatoire sur

www.sciencesetmedias.org

udppc

UNION DES PROFESSEURS
DE PHYSIQUE ET DE CHIMIE

Place
15

aux

ScienCeS
16 58

DU 25 AU 28 OCTOBRE 2020

68^e
Congrès
des professeurs
de physique
et de chimie

NANCY

COLLECTION
DE MINÉRAUX

EXPOSITION

DU MYTHE
À LA CLASSIFICATION
DE MENDELEÏEV

La quête des éléments

DU 4 NOV
2019

AU 10 JUL
2020

Entrée libre

Clôture le mardi, le mercredi et le jeudi.
Dernière le mardi, le mercredi et le jeudi.
Campus Pierre et Marie Curie
4 place Jussieu 75005 Paris

AMS
Association des Minéralogues de Sorbonne Université

ES2 + 6008

Le Bup

Physique - Chimie



POP chimie



N° 1022
Mars 2020
Publication mensuelle
114^e année



Siège social

Union des professeurs de physique
et de chimie

42 rue Saint-Jacques - 75005 Paris

Tél. : 01 40 46 83 80 - Fax : 01 46 34 76 61

Adhésions à l'UdPPC et abonnements au Bup

Secrétariat des abonnements

Sabine ASSAL

abonnement@udppc.asso.fr

Serveur des adhésions et abonnements

<http://adhesion.udppc.asso.fr>

Le Bup physique-chimie

Directrice de la publication

Marie-Thérèse LEHOUCQ

presidence@udppc.asso.fr

Rédacteur en chef

Gérard DUPUIS

lebug.redaction@udppc.asso.fr

Secrétariat de la rédaction

Catherine FRANÇOIS

lebug.secretaire@udppc.asso.fr

Comité de rédaction

Guy BOUYRIE, Jean DERVIEUX,

Luc DETTWILLER, Dominique DUCOURANT

et Dany LAUNER

Imprimeur

ALLIANCE PARTENAIRES GRAPHIQUES

26-30 rue du Docteur Schweitzer

51100 Reims

Commission paritaire : 0120 G 85898

Dépôt légal : 1^{er} trimestre 2020

ISSN (version papier) : 1770-1368

ISSN (version électronique) : 2491-830X



Articles scientifiques et pédagogiques

- 231** Modélisation simple de l'évolution dynamique d'un système planète-satellite due aux effets de marée : étude numérique du système Terre-Lune
L. Dettwiller et T. Moulène

Articles expérimentaux

- 261** Suivi cinétique de la formation du diiode à l'aide d'un téléphone portable
A. Saintier
- 271** POP chimie
M. Segura et J. Corominas

Lycée

- 287** Aéronautique et physique : la relation de Bernoulli
N. Cheymol, D. Ducourant, J.-J. Calliet, T. Gues et A. Lecoutre

Concours « Mendeleïev 2019 »

Académie de Toulouse

- 313** Mende : les jeux atomiques
A. Gomez

Nous avons lu et testé

- 331** L'Actualité Chimique communique
S. Bléneau-Serdel
- 335** Parus au BO
J. Winther

Informations

- 337** Prix Perrin de Brichambaut 2020 : appel à candidatures
UdPPC rédaction

Vie de l'association

- 339** L'UdPPC au fil des jours...
Le Bureau national
- 340** Sur votre agenda...
UdPPC rédaction



Renseignements utiles

- I** Les membres du Conseil
- II-III** Les membres du Bureau national
- IV** Le Bup
- V-VII** Adhésion et abonnement pour 2020
- VIII** Les publications hors abonnements et numéros anciens
- IX-XIV** Les responsables des sections académiques
- XV-XVII** Les correspondants académiques

Publicitaires

- XIX** Chimie et terroir, osez l'expérience !
- XX** Sciences et médias
- XXI** UdPPC : 68^e congrès national (Nancy)
- XXII** Exposition : la quête des éléments

Modélisation simple de l'évolution dynamique d'un système planète-satellite due aux effets de marée

Étude numérique du système Terre-Lune

par **Luc DETTWILLER**

Lycée Blaise Pascal - 63037 Clermont-Ferrand Cedex

luc.dettwiller@ac-clermont.fr

et **Thomas MOULÈNE**

École nationale supérieure des ingénieurs en arts chimiques et technologiques (ENSIACET)

31030 Toulouse Cedex 4

thomas-moulene@orange.fr

Dans un but heuristique, on présente un modèle simplifié d'un système planète-satellite, pour lequel on admet classiquement la conservation du moment cinétique propre, et où on suppose tous les axes de rotation parallèles. On étudie analytiquement puis informatiquement le régime transitoire de synchronisation des rotations propres des deux astres avec leur révolution mutuelle. Analytiquement, on montre que pour un système donné le nombre d'états totalement synchronisés en fonction des conditions initiales est 0, 1 ou 2 (un stable et l'autre instable dans ce dernier cas) ; si les moments cinétiques propres initiaux des astres étaient trop importants la synchronisation totale pourrait s'avérer impossible. Numériquement, dans le cas du système Terre-Lune on constate qu'avec les données de ce modèle (nombres de Love actuels, et temps de retard des déformations, de la Terre et de la Lune), il n'est pas possible de retracer l'histoire précoce de la synchronisation de la Lune avec sa révolution. Par contre, on obtient des prédictions concernant la dynamique future de ce système qui sont en accord avec celles de la littérature, et aussi avec les mesures concernant les taux actuels de croissance de la durée du jour et du paramètre de l'orbite lunaire. Divers raffinements sont proposés en fin d'étude.

INTRODUCTION

Il est bien connu qu'à cause des effets de marée, non seulement la Lune tourne toujours vers la Terre la même face⁽¹⁾, mais encore la rotation terrestre ralentit jusqu'à se synchroniser avec la révolution lunaire (qui ralentit aussi, mais moins vite). Depuis la fin du XIX^e siècle, avec George Darwin [1] notamment qui a posé les fondements théoriques, réutilisés par William Kaula [2] puis Peter Goldreich [3] et encore exploités

(1) (aux librations près, dues entre autres aux oscillations de la vitesse angulaire orbitale de la Lune, liées à l'excentricité de son orbite).

actuellement pour étudier ces phénomènes (voir par exemple [4-7]), cette synchronisation a fait l'objet de nombreux travaux ; il est prévu qu'elle soit quasiment réalisée dans quelques dizaines de milliards d'années, et qu'alors la durée du jour terrestre⁽²⁾ sera quarante-cinq jours actuels, tandis que (d'après les anneaux de croissance annuels des coraux fossiles du Dévonien) elle était de 22 h il y a 0,38 milliard d'années [8] et $(18,68 \pm 0,25)$ h il y a 1,4 milliard d'années (au Protérozoïque) [9].

En ce qui concerne l'histoire de la synchronisation de la rotation lunaire avec sa révolution, la littérature est beaucoup moins prolixe ! Cette lacune a éveillé l'intérêt d'un élève de PC* du Lycée Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, et pour son TIPE (Travail d'initiative personnelle encadré) il a tenté de la combler, avec l'aide de son professeur de physique. Dans cet article, ils racontent leur démarche, les difficultés rencontrées, les conclusions qu'ils ont cependant pu tirer, et les divers prolongements trouvés après coup.

D'abord, la modélisation simplifiée du système Terre-Lune adoptée pour ce TIPE est présentée, ainsi que les équations régissant l'évolution séculaire des vitesses angulaires de révolution de la Lune et des rotations terrestre et lunaire. Afin de rendre compte du couplage entre ces grandeurs, on introduit deux caractéristiques pour chacun de ces corps célestes : un de ses nombres de Love d'ordre 2, et le temps de réponse associé à celui-ci. Munis de ces paramètres, on obtient pour les trois grandeurs qui nous intéressent un système différentiel du premier ordre, non linéaire. Sous *Python*, on en fait calculer numériquement la solution approchée. Mais, comme on le verra alors, le modèle simplifié utilisé révèle assez vite ses limites : il s'avère impossible de reconstituer l'histoire de la synchronisation de la révolution et de la rotation lunaires, pour une raison qui apparaîtra clairement. Alors on se contentera de détailler les prédictions concernant l'évolution du système Terre-Lune à partir de son état actuel, et de montrer l'influence des différentes caractéristiques comme les nombres de Love et les temps de retard, ce qui est déjà très instructif si on regarde cela minutieusement. Bien sûr, ce que nous dirons du système Terre-Lune est en grande partie transposable à tout système planète-satellite ; les cas des systèmes Neptune-Triton et Mars-Phobos sont particulièrement intéressants, et nous les envisagerons aussi, ainsi que d'autres présentés à la fin en annexe.

(2) (si la Terre existe encore, car dans cinq milliards d'années le Soleil passera par ses deux stades de géante rouge – où il engloutira peut-être la Terre lors du second – puis il deviendra une naine blanche)

1. MISE EN ÉQUATIONS

1.1. Moment cinétique propre du système Terre-Lune

À l'aide du premier théorème de Koenig, le moment cinétique propre du système Terre-Lune (noté $\sigma^* \mathbf{u}_z$ où \mathbf{u}_z est un vecteur unitaire) peut être écrit sous la forme

$$\sigma^* \mathbf{u}_z = \sigma + \sigma' + \mathbf{OO}' \times \mu \frac{d\mathbf{OO}'}{dt} \quad \text{avec} \quad \mu := \frac{MM'}{M+M'} \quad (1)$$

où le signe $:=$ indique une définition ou une notation, O désigne le centre d'inertie de la Terre de masse M et σ son moment cinétique propre (de même avec O' , M' et σ' pour la Lune) ; le troisième terme de la somme dans (1) est appelé « moment cinétique orbital » du système des deux astres. Dans cet article, toutes les dérivées vectorielles (par exemple $d\mathbf{OO}'/dt$) sont définies dans le référentiel barycentrique (\mathcal{B}) du système Terre-Lune ou, ce qui donne le même résultat, dans le référentiel géocentrique (\mathcal{B}_r).

D'après le théorème du moment cinétique, $\frac{d\sigma^* \mathbf{u}_z}{dt}$ est égal au moment par rapport à G des actions subies par le système Terre-Lune, G étant son centre d'inertie. L'essentiel de ce moment est dû au Soleil. Nous verrons (cf. sous-paragraphe 2.8.) que dans l'étude de l'effet séculaire des marées pour le système Terre-Lune sur les premières dizaines de milliards d'années à venir, une approximation correcte consiste à omettre la variation de $\sigma^* \mathbf{u}_z$. Nous suivons dès maintenant cette étude séculaire, qui allège considérablement les équations ; ainsi, pour notre propos, nous pourrions considérer que $\sigma^* \mathbf{u}_z$ est quasi constant pour quelques dizaines de milliards d'années.

1.2. Modèle avec inclinaison et obliquités nulles

On considère un modèle simplifié où les plans équatoriaux terrestre et lunaire sont toujours normaux au même axe (O, \mathbf{u}_z) noté Oz (orienté dans le même sens que $\mathbf{OO}' \times d\mathbf{OO}'/dt$ initialement) et contiennent toujours le segment OO' – cf. figure 1. Cela revient à considérer, comme l'ont fait aussi d'autres auteurs [10], que l'inclinaison de

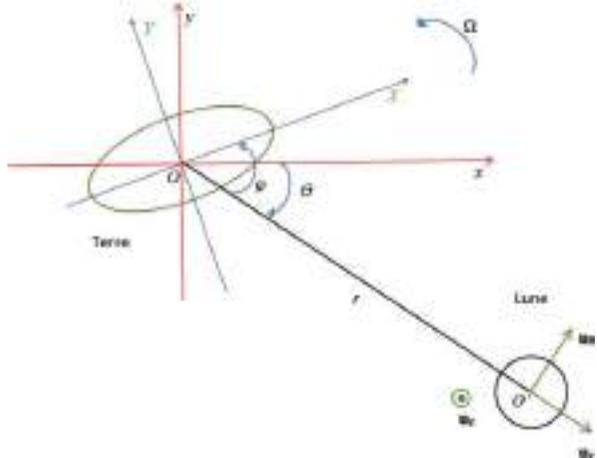


Figure 1 - Géométrie du modèle simplifié du système Terre-Lune – le schéma n'est pas à l'échelle, et la déformation de la Terre due aux marées est très exagérée. Le sens positif pour les angles θ et φ montrés sur cette figure, ainsi que pour la vitesse angulaire Ω , est le sens trigonométrique direct, comme pour le vecteur \mathbf{u}_θ .

l'orbite lunaire est constamment nulle (au lieu d'osciller autour de $5,1^\circ$) ainsi que les obliquités de la Terre (autour de 23°) et de la Lune (autour de $6,7^\circ$ sur son plan orbital). Alors, en utilisant les coordonnées polaires r et θ pour \mathbf{OO}' , on voit apparaître la « constante des aires » C (initialement positive) dans

$$\mathbf{OO}' \times \frac{d\mathbf{OO}'}{dt} = r^2 \dot{\theta} \mathbf{u}_z = C \mathbf{u}_z. \quad (2)$$

1.3. Équations d'évolution des vitesses angulaires de rotation terrestre ou lunaire

Notons I , J et $K \cong 8,036\,480\,8 \cdot 10^{37} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ [11] (resp. I' , J' et $K' \cong 8,71 \cdot 10^{34} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ [12]) les moments centraux d'inertie de la Terre (resp. de la Lune) supposée parfaitement solide – on rediscutera cette hypothèse à la fin de ce sous-paragraphe et au 2.3.2. On néglige les petits angles variables (de l'ordre de quelques dixièmes de seconde) entre le moment cinétique propre, l'axe polaire et le troisième axe central d'inertie de la Terre (resp. de la Lune), donc on admet que

$$\boldsymbol{\sigma} \cong \boldsymbol{\sigma} \mathbf{u}_z \cong K \boldsymbol{\Omega} \mathbf{u}_z \quad \text{et} \quad \boldsymbol{\sigma}' \cong \boldsymbol{\sigma}' \mathbf{u}_z \cong K' \boldsymbol{\Omega}' \mathbf{u}_z \quad (3)$$

où $\boldsymbol{\Omega}$ désigne la vitesse angulaire de la rotation (diurne) terrestre (comptée positivement dans le sens associé à \mathbf{u}_z selon la règle du tire-bouchon de Maxwell) et $\boldsymbol{\Omega}'$ celle de la rotation (propre) de la Lune. Dans ce cadre, le théorème du moment cinétique pour la Terre par rapport à Oz dans (\mathcal{B}_T) donne

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \mathcal{M}_{Oz} \quad (4)$$

où \mathcal{M}_{Oz} désigne le moment par rapport à Oz des actions subies par la Terre, qui est non nul parce que la Terre n'a pas exactement la symétrie de révolution autour de Oz – d'où la petite différence entre $J \cong 8,010\,259\,5 \cdot 10^{37} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ et $I \cong 8,010\,083\,0 \cdot 10^{37} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ [11], très faible devant celle entre K et J (elle-même valant $3 \cdot 10^{-3}$ seulement en valeur relative). En supposant que \mathcal{M}_{Oz} est surtout dû à l'action gravitationnelle de la Lune, et en se contentant de l'approximation quadrupolaire, on a l'expression classique [4-5,10]

$$\mathcal{M}_{Oz} \cong \frac{3}{2} \mathcal{G} M' \frac{I-J}{r^3} \sin(2\varphi) \quad (5)$$

où \mathcal{G} désigne la constante de gravitation, et φ (cf. figure 1, page précédente) l'angle de \mathbf{OO}' vers l'axe central d'inertie terrestre OX qui est celui de moment d'inertie I .

La valeur de $I-J$ vient d'abord du partage de la Terre entre les continents et les océans, du relief continental et sous-marin dont l'amplitude est de l'ordre de 6 km, etc. ; cela donne une différence relative entre J et I voisine de $2 \cdot 10^{-5}$, quasi constante. À cause de la rotation (diurne) terrestre et de la révolution de la Lune sur son orbite elliptique de demi-grand axe a , il y a donc une oscillation quasi sinusoïdale de $\boldsymbol{\Omega}$ actuellement indétectable⁽³⁾, de pseudo-période $\pi/(\boldsymbol{\Omega} - \dot{\theta})$ comme pour les marées semi-

(3) (son amplitude est voisine de $\frac{3}{4} \frac{\mathcal{G} M' / a^3}{|\boldsymbol{\Omega} - \dot{\theta}|} \frac{|I-J|}{K}$, valant actuellement $2,03 \cdot 10^{-14} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ et correspondant à $24,0 \mu\text{s}$ de variation de $2\pi/\boldsymbol{\Omega}(t)$)

diurnes – et à cause de $I' - J'$ il en est de même pour la Lune⁽⁴⁾. Pour Ω il y a encore d'autres causes (que nous ne détaillons pas ici) d'oscillations semi-mensuelle, mensuelle, semestrielle et annuelle. Dans notre étude de $\Omega(t)$ nous n'envisageons aucune de ces oscillations : nous considérons $\langle \Omega \rangle$ obtenu par moyennage de Ω sur une durée juste assez longue pour les éliminer, ainsi que les fluctuations décennales de Ω ; de la sorte, on étudie la variation dite *séculaire* de Ω . Alors il est clair que le moyennage de $\frac{\sin(2\varphi)}{r^3}$ sur cette durée donne 0, donc ce terme n'engendre pas d'effets séculaires.

Par contre, de tels effets peuvent venir d'une autre cause (encore beaucoup plus faible) de différence relative entre J et I (de l'ordre de 10^{-7}) : le bourrelet de marée terrestre dû à la Lune, et de hauteur de l'ordre de 0,4 m – cf. *infra*. Malgré l'extrême petitesse de cette valeur à l'échelle terrestre, l'effet de marée subi par la Terre confère un terme séculaire et perceptible à M_{Oz} , car cet effet isolément donnerait (à une Terre moyenne idéalement à symétrie de révolution autour de Oz en l'absence d'effets de marée) un nouvel axe central OX_m associé aux nouvelles valeurs I_m et φ_m de I et φ . La différence $J - I$ est remplacée, pour cette Terre moyenne, par $J_m - I_m$ dû seulement au champ de marée (quasi proportionnel à M'/r^3) créé par la Lune dans (\mathcal{B}_r) et déformant la Terre⁽⁵⁾. Pour de petites déformations, on admet que $J_m - I_m$ est quasi proportionnel à ce champ de marée, et on sait que $J_m - I_m$ est d'autant plus grand que la Terre est grande ; donc par analyse dimensionnelle on obtient la plus simple des lois phénoménologiques de la théorie de l'élasticité de Love :

$$J_m - I_m \cong k_2 \frac{M'}{r^3} R^5 \quad (6)$$

où R désigne le rayon terrestre, et où la constante positive sans dimension k_2 est appelée « nombre de Love » pour OO' perpendiculaire à Oz et d'ordre 2 de la Terre car, pour rester cohérent avec l'approximation quadrupolaire de la relation (5), il quantifie (quand OO' et Oz sont orthogonaux) la déformation de la Terre créant un potentiel terrestre quadrupolaire. Avec les valeurs numériques données aussi au sous-paragraphe 2.1., on en déduit d'ores et déjà $\frac{J_m - I_m}{K} \cong 5,98 \cdot 10^{-8}$ dû à l'action de la Lune sur cette Terre

(4) Ce sont ses librations *physiques*, supposées par Newton, mesurées par Arago en 1805 en suivant la distance entre le limbe et la tache de Manilius, puis par Schluter, Wickman, et Bessel en 1839 en suivant le cratère Mösting A au centre de la face visible, tabulées par Tisserand en 1898, puis plus en détail par Puisseux à l'observatoire de Paris grâce à une quarantaine de photographies prises entre 1894 et 1909.

(5) Dans cette étude, on doit donc cesser de considérer la Terre comme un solide parfait. Malgré tout, il reste possible de définir le référentiel terrestre : c'est le référentiel principal de la Terre, *i.e.* celui où son moment cinétique est nul par rapport à tout point. Si $\Omega_{\mathbf{u}_z}$ est dorénavant le vecteur rotation du référentiel terrestre par rapport au référentiel géocentrique (\mathcal{B}_r) , alors le moment cinétique de la Terre par rapport à Oz dans (\mathcal{B}_r) s'écrit, à l'aide du moment d'inertie terrestre K par rapport à Oz , rigoureusement $\sigma(t) = K(t) \Omega(t)$.

moyenne ; donc le soulèvement ou l'enfoncement de la croûte de celle-ci à cause de la Lune est bien de l'ordre de $\frac{1}{2} \frac{J_m - I_m}{K} R \cong 0,2 \text{ m}$ – et 2,2 fois moins à cause du Soleil.

Si, sous l'effet des variations (dans le référentiel terrestre) de cette action gravitationnelle lunaire, la Terre élastique adaptait sa forme sans retard, alors φ_m serait nul ; ce n'est pas le cas, à cause d'un retard temporel (dû à la viscosité du manteau terrestre et surtout au frottement de l'eau de mer au fond des océans [6-7]), mais vu la petitesse de φ_m (dont la valeur présente est de quelques degrés) on introduit une constante de temps τ positive en adoptant l'approximation suivante, d'ordre 1 en $\Omega - \dot{\theta}$:

$$\varphi_m \cong (\Omega - \dot{\theta}) \tau \quad \text{et} \quad \langle \sin(2\varphi_m) \rangle \cong 2 (\langle \Omega \rangle - \langle \dot{\theta} \rangle) \tau \quad (7)$$

car φ_m est identiquement nul si $\Omega - \dot{\theta}$ l'est aussi. Concernant le petit angle φ_m , on peut dire que τ est le temps de réponse de la Terre à la rotation du champ de marée subi par elle, dans le référentiel terrestre. Nous pourrions encadrer la valeur de τ à partir des mesures précises permises, par la télémétrie laser, pour des grandeurs observables déduites (dans notre théorie) de τ et d'autres paramètres déjà connus – voir les sous-paragraphe 2.5. et 2.8.2.

Pour la Lune, on introduit de même les grandeurs k'_2 et τ' qui correspondent à k_2 et τ .

1.4. Approximation de l'orbite quasi circulaire

Pour simplifier encore, restreignons-nous dorénavant au cas où l'orbite lunaire, *i.e.* la trajectoire de O' dans (\mathcal{B}_τ) , est circulaire de rayon a – en l'absence d'effets de marée, c'est-à-dire à l'ordre 0 en $(k_2\tau, k'_2\tau')$. Son excentricité est donc considérée comme nulle. Dans ce cas particulier, l'ensemble des équations (4)-(7) donne

$$K \langle \dot{\Omega} \rangle = -3 k_2 \tau \mathcal{G} M'^2 R^5 \left\langle \frac{\Omega - \dot{\theta}}{a^6} \right\rangle \cong -3 k_2 \tau \mathcal{G} M'^2 \frac{R^5}{\langle a \rangle^6} (\langle \Omega \rangle - \langle \dot{\theta} \rangle), \quad (8)$$

cette dernière approximation étant valable si les variables ont des variations relatives très faibles sur la durée du moyennage – hypothèse dorénavant adoptée pour toute la suite. Pour la Lune, le même raisonnement donne une équation similaire, obtenue à partir de (8) en interchangeant les caractéristiques de la Lune (notées avec un prime) et celles de la Terre :

$$K' \langle \dot{\Omega}' \rangle \cong -3 k'_2 \tau' \mathcal{G} M^2 \frac{R'^5}{\langle a' \rangle^6} (\langle \Omega' \rangle - \langle \dot{\theta}' \rangle). \quad (9)$$

On voit que dorénavant, les coefficients k_2 et τ pour la Terre (resp. k'_2 et τ' pour la Lune) n'interviennent plus que par leur produit.

De plus, la troisième loi de Kepler se traduit par

$$\langle \dot{\theta} \rangle \cong \sqrt{\mathcal{G}(M + M') / \langle a \rangle^3} \quad (10)$$

qui est constant lors du mouvement non perturbé par les effets de marée. Bien sûr, à

cause de ces effets $\langle \dot{\theta} \rangle$ est légèrement et continûment variable ; nous allons étudier perturbativement, à l'ordre 1 en $(k_2 \tau, k'_2 \tau')$, ses variations séculaires et leurs conséquences. Initialement $\langle \dot{\theta} \rangle$ est positif vu nos conventions d'orientation, et il le reste pour toute la suite : C garde toujours le même signe car, pour en changer, il faudrait qu'il s'annule, mais d'après (10) ce n'est possible qu'asymptotiquement.

En introduisant les constantes $k := 3 k_2 \tau \mathcal{G} M'^2 R^5$, $k' := 3 k'_2 \tau' \mathcal{G} M^2 R'^5$, $\gamma := M M' \sqrt{\frac{\mathcal{G} \langle a \rangle_0}{M + M'}} > 0$ (l'indice 0 désignant la valeur initiale de la fonction considérée) et l'inconnue intermédiaire $A(t) := \sqrt{a(t)}$, puis en profitant de la relation (10), on tire des équations (1) et (8)-(9) un système différentiel non linéaire à trois fonctions inconnues $\langle \Omega \rangle$, $\langle \Omega' \rangle$ et $\langle A \rangle$, avec des seconds membres constants :

$$K \langle \Omega \rangle + K' \langle \Omega' \rangle + M M' \sqrt{\frac{\mathcal{G}}{M + M'}} \langle A \rangle \cong \sigma^* \cong K \langle \Omega \rangle_0 + K' \langle \Omega' \rangle_0 + \gamma \quad (11)$$

$$K \langle \dot{\Omega} \rangle + \frac{k}{\langle A \rangle^{12}} \left(\langle \Omega \rangle - \frac{\sqrt{\mathcal{G}(M + M')}}{\langle A \rangle^3} \right) \cong 0 \quad (12)$$

$$K' \langle \dot{\Omega}' \rangle + \frac{k'}{\langle A \rangle^{12}} \left(\langle \Omega' \rangle - \frac{\sqrt{\mathcal{G}(M + M')}}{\langle A \rangle^3} \right) \cong 0. \quad (13)$$

1.5. Obtention d'un système différentiel adimensionné

Prenons l'origine des temps à la date actuelle. À l'aide des valeurs prises par les fonctions inconnues à $t = 0$, il est facile d'introduire trois nouvelles fonctions inconnues adimensionnées, $\omega := \langle \Omega \rangle / \langle \Omega \rangle_0$, $\omega' := \langle \Omega' \rangle / \langle \Omega' \rangle_0 \neq \langle \Omega' \rangle / \langle \Omega' \rangle_0$ et $\alpha := \langle A \rangle / \langle A \rangle_0 > 0$, de la variable sans dimension $u := t/T$ – où on choisit arbitrairement $T := 1 \text{ Ga}$ (un milliard d'années) car c'est une valeur bien adaptée à l'échelle temporelle des évolutions séculaires étudiées. Introduisons aussi de nouvelles constantes adimensionnées, dépendant des conditions initiales :

$$\lambda := \frac{k}{K} \frac{T}{\langle A \rangle_0^{12}} > 0 \quad \text{et} \quad \lambda' := \frac{k'}{K'} \frac{T}{\langle a \rangle_0^6} > 0,$$

$$\nu := \frac{\sqrt{\mathcal{G}(M + M')}}{\langle \Omega \rangle_0 \langle A \rangle_0^3}, \quad \kappa := K \langle \Omega \rangle_0 / \sigma^* \quad \text{et} \quad \kappa' := K' \langle \Omega' \rangle_0 / \sigma^*,$$

et enfin $\xi := \gamma / \sigma^*$ (qui est du signe de σ^* supposé non nul dorénavant). Remarquons que la valeur de ν permet de savoir si le satellite est actuellement au-delà de l'orbite synchrone (en lien avec la rotation propre de sa planète : $|\nu| < 1$) ou en-deçà ($|\nu| > 1$).

Avec ces notations, l'équation (11) devient

$$\kappa \omega + \kappa' \omega' + \xi \alpha = \kappa + \kappa' \frac{\langle \Omega' \rangle_0}{\langle \Omega \rangle_0} + \xi = 1 \quad (14)$$

et après utilisation du théorème de dérivation sous le signe $\langle \cdot \rangle$, le système différentiel

adimensionné peut s'écrire

$$\frac{d\omega}{du} = -\lambda(\omega - \nu \alpha^{-3}) \alpha^{-12} \quad (15)$$

$$\frac{d\omega'}{du} = -\lambda'(\omega' - \nu \alpha^{-3}) \alpha^{-12} \quad (16)$$

$$\xi \frac{d\alpha}{du} = -\kappa \frac{d\omega}{du} - \kappa' \frac{d\omega'}{du} \quad (17)$$

(on a dérivé l'équation (14) pour obtenir (17), car c'est plus commode pour le traitement numérique sous *Python*). Pour les discussions qui s'ensuivent concernant certaines propriétés de ce système différentiel, rappelons que les coefficients constants ν , κ , κ' et ξ peuvent (de même que σ^*) être négatifs : n'oublions pas que l'orbite de Triton, de loin le plus gros des quatorze satellites de Neptune, est décrite dans le sens contraire de celui de la rotation de sa planète, ainsi que de la révolution de celle-ci autour du Soleil ! Cela ne peut guère s'expliquer que par une capture de Triton par Neptune, ce qui n'est pas trop difficile si auparavant Triton était une des composantes d'un astéroïde binaire, dont l'autre composante s'est échappée [13-14].

1.6. États de synchronisation totale

Les états de synchronisation totale du système Terre-Lune sont donnés par les points fixes $(\omega_s, \omega'_s, \alpha_s > 0)$ du système (14)-(16), car ils sont tels que $\omega_s = \omega'_s = \nu \alpha_s^{-3}$. Compte tenu de la relation (14), on peut complètement les déterminer en résolvant l'équation du quatrième degré en α_s

$$\xi \alpha_s^4 - \alpha_s^3 = -(\kappa + \kappa') \nu. \quad (18)$$

La discussion graphique de cette équation est aisée : on voit que le graphe du polynôme P de degré 4 du membre de droite, qui passe par l'origine en décroissant, a un unique extremum ; ses coordonnées sont $(3/(4\xi), -27/(256\xi^3))$ et c'est un minimum (resp. un maximum) si $\sigma^* > 0$ (resp. $\sigma^* < 0$) car $\lim_{\alpha_s \rightarrow \pm\infty} \xi \alpha_s^4 - \alpha_s^3 = (\text{sgn } \sigma^*) \infty$. Donc l'ensemble des racines réelles *strictement positives* de l'équation (18) est soit :

- ◆ vide si et seulement si $\sigma^* > 0$ avec $256(\kappa + \kappa') \nu \xi^3 > 27$, ou bien $\sigma^* < 0$ avec $(\kappa + \kappa') \nu \xi \geq 0$ – cette dernière inégalité étant automatiquement satisfaite puisque $(\kappa + \kappa') \nu \xi = \frac{(K + K') \langle \Omega \rangle_0 \sqrt{\mathcal{G}(M + M')}}{\sigma^* \langle \Omega \rangle_0 \langle A \rangle_0^3} \frac{\gamma}{\sigma^*}$ et que γ est positif par définition ;
- ◆ constitué d'une racine double – égale à $3/(4\xi)$ – si $\sigma^* > 0$ et si $256(\kappa + \kappa') \nu \xi^3 = 27$;
- ◆ constitué d'une racine simple α_{ss} (si $\sigma^* < 0$ avec $(\kappa + \kappa') \nu \xi^3 < 0$ – mais ce dernier sous-cas est impossible, cf. *supra* – ou bien si et seulement si $\sigma^* > 0$ avec $256(\kappa + \kappa') \nu \xi^3 < 27$ qui donne $\alpha_{ss} \in]3/(4\xi), 1/\xi[$) et d'une autre plus petite, $\alpha_{s_s} \in]0, 3/(4\xi[$ existant si et seulement si α_{ss} existe aussi ; c'est le cas usuel dans le système solaire.

Si les moments cinétiques propres des deux astres sont négligeables devant le

moment cinétique orbital du système, de façon que $\xi \cong 1$, $(\kappa + \kappa') \nu \cong 0$ et $\sigma^* > 0$, d'après l'équation (18) il existe deux états de synchronisation totale, donnés par $\alpha_{si} \cong 0$ et $\alpha_{ss} \cong 1$. Seul le second est physiquement accessible, et comme les moments cinétiques propres sont négligeables, leurs variations liées à la synchronisation le sont aussi, donc celle-ci se fait quasiment sans changement du paramètre a de l'orbite.

La synchronisation totale est impossible si et seulement si les moments cinétiques propres initiaux sont assez importants par rapport au moment cinétique orbital initial pour donner :

- ◆ soit $\sigma^* > 0$ (cas usuel), mais $(\kappa + \kappa') \nu \xi^3 > 27/256$, ce qui est une condition très sévère (ce cas n'est réalisé avec aucun des corps connus du système solaire) ;
- ◆ soit $\sigma^* < 0$ (voir le premier point de la discussion précédente), ce qui est le cas du système Neptune-Triton⁽⁶⁾ (Neptune étant une planète géante, son moment cinétique propre domine largement le moment cinétique orbital en sens opposé lié à la révolution de Triton).

Le sens opposé de la révolution d'un satellite par rapport à sa rotation propre ou celle de sa planète n'entraîne pas forcément l'impossibilité de la synchronisation totale. En effet, si σ^* est quand même positif alors que κ ou $\kappa' \langle \Omega' \rangle_0 / \langle \Omega \rangle_0$ est négatif, cela veut dire que le moment cinétique orbital initial l'emporte sur la somme des moments cinétiques propres initiaux, donc pour arriver à la synchronisation totale la révolution du satellite gardera le même sens, alors que la rotation propre d'au moins un des deux astres devra s'arrêter pour changer de sens, ce qui est conceptuellement envisageable si $(\kappa + \kappa') \nu \xi^3 \leq 27/256$. Par contre, si en plus σ^* est négatif (*i.e.* la somme des moments cinétiques propres initiaux domine), pour arriver à la synchronisation totale il faudrait que le satellite parte progressivement à l'infini puis en revienne avec une révolution en sens contraire du précédent, ce qui est inenvisageable – *cf.* le cas de Neptune-Triton évoqué ci-dessus.

1.7. Discussion de la stabilité linéaire et du type des points fixes

Afin d'exploiter le théorème de Lyapunov avec les points fixes $(\nu \alpha_s^{-3}, \nu \alpha_s^{-3}, \alpha_s)$ dont on suppose ici l'existence – ce qui nécessite $\sigma^* > 0$ et $256 (\kappa + \kappa') \nu \xi^3 \leq 27$ – on linéarise le système (14)-(16) pour les petits écarts $\varepsilon(u) := \omega(u) - \omega_s$, $\varepsilon'(u) := \omega'(u) - \omega'_s$ et $\eta(u) := \alpha(u) - \alpha_s$. Les équations (15)-(16) donnent

$$\frac{d\varepsilon}{du} \cong -\lambda \alpha_s^{-12} (\varepsilon + 3\nu \alpha_s^{-4} \eta) \quad \text{et} \quad \frac{d\varepsilon'}{du} \cong -\lambda' \alpha_s^{-12} (\varepsilon' + 3\nu \alpha_s^{-4} \eta) \quad (19)$$

puis, en y injectant

$$\eta = -(\kappa \varepsilon + \kappa' \varepsilon') / \xi \quad (20)$$

tiré de (14), on se ramène à un système différentiel à deux fonctions inconnues

(6) En fait c'est un peu plus subtil – voir l'annexe.

$$\frac{d}{du} \begin{pmatrix} \varepsilon \\ \varepsilon' \end{pmatrix} = \alpha_s^{-12} \begin{pmatrix} \lambda(3\nu\alpha_s^{-4}\kappa\xi^{-1}-1) & 3\nu\alpha_s^{-4}\lambda\kappa'\xi^{-1} \\ 3\nu\alpha_s^{-4}\lambda'\kappa\xi^{-1} & \lambda'(3\nu\alpha_s^{-4}\kappa'\xi^{-1}-1) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon \\ \varepsilon' \end{pmatrix}. \quad (21)$$

Les valeurs propres V de la matrice carrée \mathbf{L} de l'équation (21) sont les racines de son équation caractéristique

$$V^2 - (\text{tr } \mathbf{L}) V + \det \mathbf{L} = 0 \quad (22)$$

où $\text{tr } \mathbf{L}$ désigne la trace de \mathbf{L} , et

$$\det \mathbf{L} = \lambda\lambda' [1 - 3\nu\alpha_s^{-4}(\kappa + \kappa')\xi^{-1}] \quad (23)$$

est son déterminant, qui s'écrit aussi $\lambda\lambda'(4 - 3\alpha_s^{-1}\xi^{-1})$ d'après la relation (18).

On voit immédiatement que $\det \mathbf{L}$ est négatif si α_s vaut α_{si} . Dans ce cas, pour l'équation (22) les conditions de Routh-Hurwitz – *i.e.* les conditions nécessaires et suffisantes pour que toutes les racines de l'équation polynomiale considérée aient leurs parties réelles strictement négatives ([15], p. 216) – ne sont pas satisfaites. De plus, $\det \mathbf{L} \neq 0$ si $\alpha_{si} \neq \alpha_{ss}$, et dans ce cas les deux valeurs propres de \mathbf{L} sont réelles de signes contraires (l'une d'elles étant strictement positive), donc le point fixe correspondant à α_{si} est instable d'après le théorème de Lyapunov ([16], p. 208-213) et c'est un col (appelé aussi « point de selle ») ([17], annexe B) ; ce ne peut être ni un nœud, ni un foyer⁽⁷⁾ ([17], annexe B).

Maintenant si α_s vaut α_{ss} distinct de α_{si} , alors $\det \mathbf{L} > 0$, et d'après le théorème de Routh-Hurwitz les parties réelles de toutes valeurs propres de \mathbf{L} sont strictement négatives si et seulement si $\text{tr } \mathbf{L} < 0$, ce qui suffit (toujours d'après le théorème de Lyapunov) pour assurer la stabilité asymptotique ([16], p. 208-213) du point fixe correspondant à α_{ss} . On a

$$\begin{aligned} \text{tr } \mathbf{L} &= 3\nu\alpha_s^{-4}(\lambda\kappa + \lambda'\kappa')\xi^{-1} - \lambda - \lambda' \\ &= -\frac{(\lambda\kappa + \lambda'\kappa')(4 - 3\alpha_s^{-1}\xi^{-1}) + \lambda\kappa' + \lambda'\kappa}{\kappa + \kappa'} \end{aligned} \quad (24)$$

en profitant de la relation (18), et par ailleurs $4 - 3\alpha_s^{-1}\xi^{-1} > 0$. Or par définition κ et κ' sont de même signe, λ et λ' sont positifs, donc pour $\alpha_s = \alpha_{ss}$ on trouve $\text{tr } \mathbf{L} < 0$ quel que soit le signe de κ et κ' : le point fixe correspondant à α_{ss} est asymptotiquement stable. Selon que $(\text{tr } \mathbf{L})^2$ est inférieur ou bien supérieur ou égal à 4 $\det \mathbf{L}$, ce point fixe est respectivement un foyer ou bien un nœud – mais pas un col car par définition celui-ci n'est jamais stable ([17], annexe B).

1.8. Cas usuel où le moment cinétique propre du satellite est négligeable

C'est la situation actuelle pour toutes les planètes du système solaire, mais pas pour la planète naine Pluton avec son gros satellite Charon, ni pour les nombreux astéroïdes

(7) (cas du régime pseudo-périodique au voisinage du point fixe)

(ou objets de la ceinture de Kuiper) qui sont binaires – voir l'annexe. Négliger le moment cinétique propre $\sigma' \mathbf{u}_z$ du satellite devant $\sigma^* \mathbf{u}_z$ revient à considérer κ' nul. Le système (14)–(17) est simplifié ; il devient alors aisé de découpler les équations (14)–(15) car la première s'écrit ici

$$\kappa \omega + \xi \alpha = \kappa + \xi = 1 = (1 - \xi) \omega + \xi \alpha, \quad (25)$$

ce qui donne

$$\begin{aligned} \xi \frac{d\alpha}{du} &= -\kappa \frac{d\omega}{du} = \lambda(\kappa\omega - \kappa\nu \alpha^{-3}) \alpha^{-12} = \lambda(1 - \xi\alpha - \kappa\nu \alpha^{-3}) \alpha^{-12} \\ &= -\lambda[(\xi\alpha - 1) \alpha^3 + \kappa\nu] \alpha^{-15} = -\lambda[P(\alpha) + \kappa\nu] \alpha^{-15} := f(\alpha) \end{aligned} \quad (26)$$

où $\kappa\nu$ est du signe de ξ , et λ positif. L'intégration de cette équation du premier ordre donne $\alpha(u)$, dont on déduit $\omega(u)$ grâce à (25) – leurs variations sont proportionnelles.

Dans cette approximation, il est facile de préciser ce qui se passe dans les deux cas où la synchronisation totale est impossible (cf. sous-paragraphe 1.6) :

- ◆ soit $\sigma^* > 0$ (cas usuel), mais $\kappa\nu\xi^3 > 27/256$ (ce qui n'est le cas d'aucun satellite du système solaire), alors $d\alpha/du < 0 \forall \alpha > 0$ donc on trouve ici que le satellite va s'écraser sur sa planète ;
- ◆ soit $\sigma^* < 0$ (cas du système Neptune-Triton), alors $d\alpha/du < 0 \forall \alpha > 0$ donc on trouve là que le satellite va aussi s'écraser sur sa planète (mais dans le cas de Triton cette conclusion doit être nuancée – voir l'annexe).

Par ailleurs, d'après (26) et (25) on voit que

$$\frac{d\langle\Omega\rangle}{du}(0) = \langle\Omega\rangle_0 \frac{d\omega}{du}(0) = -\lambda \langle\Omega_0\rangle (1 - \nu) = -\lambda \left(\langle\Omega\rangle_0 - \frac{\sqrt{\mathcal{G}(M+M')}}{\langle A \rangle_0^3} \right) \quad (27)$$

quel que soit σ' , mais si en plus il est négligeable on a

$$\frac{d\alpha}{du}(0) = (1 - \nu) \frac{\kappa}{\xi} \lambda = (1 - \nu) \frac{K \langle\Omega\rangle_0}{\gamma} \lambda = \frac{K \lambda}{\gamma} \left(\langle\Omega\rangle_0 - \frac{\sqrt{\mathcal{G}(M+M')}}{\langle A \rangle_0^3} \right) \quad (28)$$

avec $K/\gamma > 0$ et $\lambda > 0$. Donc lorsque la révolution du satellite s'effectue dans le sens de rotation de la planète et au-delà de l'orbite synchrone (*i.e.* $\nu \in]0, 1[$, ce qui est le cas usuel), $\langle\Omega\rangle$ décroît même si σ' n'est pas négligeable, mais si en plus il l'est alors le paramètre de l'orbite ne peut que croître avec le temps ; $\langle\Omega\rangle$ croît (quel que soit σ') et le paramètre décroît (si σ' est négligeable) lorsque l'orbite est décrite dans le sens de rotation de la planète et en deçà de l'orbite synchrone ($\nu \in]1, \infty[$ – le seul cas de ce type connu dans le système solaire est celui de Phobos [18], le plus gros des deux satellites de Mars), ou bien (cas de Triton) lorsque l'orbite est décrite en sens contraire de celui de rotation de la planète (donc la période de rotation de la planète croît !), mais à toute distance ($\nu < 0$).

On peut en déduire la puissance mécanique moyenne dissipée par effets de marée dans (\mathcal{B}) :

$$\langle \mathcal{P}_d \rangle = -\frac{d}{dt} \left\langle K \frac{\Omega^2}{2} - \mathcal{G} \frac{MM'}{2a} \right\rangle \cong -\frac{\langle \Omega \rangle_0}{T} \left(K \langle \Omega \rangle_0 \omega \frac{d\omega}{du} + \frac{\mathcal{G}}{\langle \Omega \rangle_0} \frac{MM'}{2\langle a \rangle_0} \frac{2}{\alpha^3} \frac{d\alpha}{du} \right) \quad (29)$$

dont la valeur actuelle, grâce à (27)-(28), s'écrit

$$\begin{aligned} \langle \mathcal{P}_d \rangle (0) &= -\frac{\langle \Omega \rangle_0}{T} \left(-K\lambda + \gamma\nu \frac{K\lambda}{\gamma} \right) \langle \Omega \rangle_0 (1-\nu) = \frac{K\langle \Omega \rangle_0^2}{T} \lambda (1-\nu)^2 \\ &= \frac{K\langle \Omega \rangle_0^2}{T} \frac{k}{K} \frac{T}{\langle A \rangle_0^{12}} (1-\nu)^2 \cong 3 \frac{k_2 \tau \mathcal{G} M'^2 R^5}{\langle a \rangle_0^6} \left(\langle \Omega \rangle_0 - \frac{\sqrt{\mathcal{G}(M+M')}}{\langle a \rangle_0^{3/2}} \right)^2 \end{aligned} \quad (30)$$

Cette expression ne fait pas intervenir τ' , donc elle néglige la dissipation dans le satellite, ce qui est cohérent avec l'hypothèse de départ de ce sous-paragraphe conduisant à négliger la variation du moment cinétique propre du satellite.

Enfin l'équation (18) donnant les états totalement synchronisés se simplifie un peu, et se met sous la forme

$$P(\alpha_s) = -\kappa\nu. \quad (31)$$

Dans le cas usuel où $\langle \Omega \rangle_0 > 0$, alors $\sigma^* > 0$ et $\kappa\nu > 0$ ici ; de plus, on sait que l'équation (31) a deux racines réelles strictement positives si et seulement si $\kappa\nu\xi^3 < 27/256$: ce sont $\alpha_{si} \in]0, 3/(4\xi)[$ (correspondant à la synchronisation instable), et $\alpha_{ss} \in]3/(4\xi), 1/\xi[$ – synchronisation stable. Lorsque ces inégalités concernant $\langle \Omega \rangle_0$ et $\kappa\nu\xi^3$ sont réalisées (ce qui est le cas pour tous les satellites des planètes du système solaire, sauf Triton) alors $1/\xi > 1$ et

$$\xi \frac{d\alpha}{du} > 0 \Leftrightarrow \alpha \in]\alpha_{si}, \alpha_{ss}[. \quad (32)$$

Au voisinage de chacun des points fixes distincts correspondant à la synchronisation totale, $\eta(u)$ et $\varepsilon(u)$ varient proportionnellement à $\exp[f'(\alpha_s)u/\xi]$; on note que $f'(\alpha_s)/\xi$ est indépendant de K' et k' . Quant à $\varepsilon'(u)$, d'après l'équation (19) qui le régit, il s'écrit comme une combinaison linéaire de $\exp[f'(\alpha_s)u/\xi]$ et $\exp[-\lambda'\alpha_s^{-12}u]$. La dérivée de f vérifie évidemment $f'(\alpha_{si}) > 0$ et $f'(\alpha_{ss}) < 0$, donc le point fixe instable est un col, et le point fixe stable un nœud ; l'éventualité que ce point stable soit un foyer disparaît si on néglige le moment cinétique propre du satellite.

Comme $\nu \in]0, 1[$ pour le système Terre-Lune, actuellement la durée du jour (terrestre) croît. De plus σ' est déjà négligeable ; donc d'une part le paramètre de l'orbite lunaire croît aussi actuellement, et d'autre part, comme $\alpha(0) = 1$ par définition, on a $\alpha_{si} < 1 < \alpha_{ss}$. Mais quel est l'ordre de grandeur d'un temps caractéristique d'évolution de Ω et de a ? C'est ce que nous allons voir numériquement dans le paragraphe suivant, où nous appliquerons les formules littérales obtenues dans ce premier paragraphe.

2. DISCUSSION DES RÉSULTATS NUMÉRIQUES POUR LE SYSTÈME TERRE-LUNE

2.1. Données numériques

Il n'y a pas, à notre connaissance, de publication donnant directement la valeur numérique du temps de réponse τ de la Terre qu'on a introduit avec notre approximation (7). Dans un formalisme classique plus lourd et plus élaboré ([7], p. 449), on considère de multiples temps de retard dans le développement multipolaire du potentiel gravitationnel U créé par la Terre déformée sous l'effet de la Lune (un temps pour chacun des $n + 1$ termes du multipôle d'ordre n) ; mais, de tous ces temps de retard, les méthodes d'intégration numérique approchées DE200, DE245, DE403 et DE405 (dans l'ordre chronologique de parution) du *Jet Propulsion Laboratory* [19] n'en retiennent que deux : $\tau_{2,1}$ et $\tau_{2,2}$, donc elles supposent que $\tau_{2,0}$ est nul⁽⁸⁾, ainsi que tous les temps de retard des autres termes multipolaires. En ajustant τ de façon à retrouver un taux actuel de variation qui a fait l'objet de mesures précises (celui du paramètre de l'orbite lunaire – voir les sous-paragraphes 2.5. et 2.8.2.), nous prenons $\tau \cong (516 \pm 10)$ s ; bien sûr, c'est un ajustement *ad hoc*, puisque nous cherchons la valeur d'un paramètre d'un modèle simplifié où les obliquités, l'inclinaison orbitale et l'excentricité sont nulles (cf. sous-paragraphes 1.2. et 1.4.) pour rendre compte de mesures précises faites sur le système réel où les valeurs moyennes des obliquités terrestre et lunaire sont environ 23° et $1,5^\circ$ sur le plan de l'écliptique, celles de l'inclinaison et l'excentricité $5,1^\circ$ et $0,055$. Si on ne les néglige pas, on utilise classiquement le formalisme classique plus complexe de la référence ([7], p. 449), qui mène à des équations bien plus lourdes que (11)-(13), avec des développements en série à traiter numériquement. Mais si on se limite (comme dans cet article) à l'approximation quadrupolaire avec en plus les obliquités, l'inclinaison et l'excentricité nulles, le formalisme classique ([7], p. 449) conduit à une équation qui ressemble à (8), mais où $2(\langle\Omega\rangle - \langle\dot{\theta}\rangle)\tau$ est remplacé par $\sin\left[2(\langle\Omega\rangle - \langle\dot{\theta}\rangle)\tau_{2,2}\right]$; vu la petitesse de φ_m , cela concorde avec $\tau \cong \tau_{2,2}$. L'intégration numérique DE405 adopte les valeurs $\tau_{2,1} \cong 1115,3$ s et $\tau_{2,2} \cong 599,8$ s ; cette dernière valeur et $\tau \cong (516 \pm 10)$ s sont proches⁽⁹⁾. En outre, la valeur de k_2 adoptée par DE405 est 0,30, alors que nous avons pris $k_2 \cong 0,3531 \pm 0,0001$ donné par la référence [20] qui est postérieure à DE405. Mais nous avons vu que k_2 et τ n'interviennent dans les résultats de notre article que par leur produit ; alors il nous est agréable de constater que $0,30 \times 599,8$ s $\in [(0,3530 \times 506$ s), $(0,3532 \times 526$ s)].

(8) Le temps $\tau_{2,0}$ forme, avec $\tau_{2,1}$ et $\tau_{2,2}$, l'ensemble des trois temps de retard de chacun des trois termes respectifs du quadrupôle – donc associés à $n = 2$, indice le plus petit pour les termes variables avec t dans le développement multipolaire de U .

(9) D'ailleurs, de DE200 à DE405 les valeurs de $\tau_{2,1}$ et $\tau_{2,2}$ ont été rectifiées : la seconde a été augmentée de 7 %, mais la première a été quasiment doublée !

Nous résumons au sous-paragraphe 2.3.1. quelques discussions liées à l'augmentation de l'estimation des temps de retard dans les intégrations numériques successives (cf. note 9).

Quant à τ' , son évaluation est encore plus difficile. Différentes tentatives sont possibles, dont celle utilisant les expériences de sismologie effectuées sur la Lune lors des missions Apollo et qui donnent une estimation du temps d'amortissement des séismes lunaires (50 min), mais pourquoi serait-ce exactement le temps de réponse τ' de la Lune à la rotation du champ de marée subi par elle, dans le référentiel lunaire ? Fort heureusement nous verrons (cf. sous-paragraphe 2.7.) que pour la suite de cette étude, ses résultats sont quasiment insensibles à la valeur de τ' ; alors faute d'informations bien précises, on la prendra arbitrairement, dans cet article, égale à la valeur de τ .

Compte tenu de la relativement grande incertitude sur τ comme sur τ' , il est inutile de donner des valeurs très précises aux autres paramètres qui sont bien mieux connus. À titre d'information sur le système Terre-Lune, on met quand même trois chiffres significatifs (sûrs) aux valeurs des paramètres ci-dessous qui n'ont pas déjà été indiquées au premier paragraphe dans le système international :

$$T \cong 3,15 \cdot 10^{16} \text{ s} ; \mathcal{G} \cong 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2} ; \langle a \rangle_0 \cong \langle A \rangle_0^2 \cong 3,84 \cdot 10^8 \text{ m} ;$$

$$M \cong 5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg} ; M' \cong 7,35 \cdot 10^{22} \text{ kg} ; R \cong 6,37 \cdot 10^6 \text{ m} ; R' \cong 1,74 \cdot 10^6 \text{ m} ;$$

$$\langle \Omega \rangle_0 \cong 2\pi/86\,164 \text{ s} \cong 7,29 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1} ; \langle \dot{\Omega} \rangle_0 \cong \langle \dot{\theta} \rangle_0 \cong 2\pi/27,3 \text{ j} \cong 2,66 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}.$$

De même que pour $\tau_{2,1}$ et $\tau_{2,2}$, l'estimation des nombres de Love a beaucoup évolué au fil des travaux successifs ; on adopte les résultats les plus récents sur ce sujet : $k_2 \cong 0,3531 \pm 0,0001$ [20] et $k_2' \cong 0,0240 \pm 0,0015$ [21].

Tout ceci donne, pour les paramètres adimensionnés, $\lambda \cong 0,252$, $\lambda' \cong 157$, $\nu \cong 3,65 \cdot 10^{-2}$, $\kappa \cong 0,170$, $\kappa' \cong 1,84 \cdot 10^{-4}$ et $\xi \cong 0,830$. À $t = 0$, le moment cinétique propre de la Terre et le moment cinétique orbital du système Terre-Lune sont respectivement proportionnels à κ et ξ , donc leurs valeurs montrent qu'actuellement le moment cinétique orbital du système Terre-Lune domine les moments cinétiques propres⁽¹⁰⁾, notamment celui de la planète Terre d'un facteur 5, contrairement à ce qui se passe pour tous les autres systèmes planète-satellite connus dans le système solaire ; ceci est lié à la valeur exceptionnelle⁽¹¹⁾ de M'/M pour le système Terre-Lune (1/81,3), comparée aux autres valeurs de M'/M qui sont au plus $2,41 \cdot 10^{-4}$ (cas de

(10) Aux tout premiers âges du système Terre-Lune, c'était l'opposé : le paramètre de l'orbite lunaire était beaucoup plus petit (de l'ordre de $6 \cdot 10^4$ km) donc le moment cinétique orbital aussi, tandis que le moment cinétique propre de la Terre était environ cinq fois plus grand que maintenant.

(11) (probablement liée au mode très particulier de formation de la Lune : non pas lors de l'accrétion ayant produit les planètes du système solaire il y a 4,567 Ga, mais juste après un impact géant entre la Terre et un impacteur nommé Théia, il y a 4,36 Ga)

Saturne-Titan) puis $1,26 \cdot 10^{-4}$ (cas de Neptune-Triton), et donnent des valeurs de $|\xi|$ au plus de l'ordre de 10^{-2} . Quant au moment cinétique propre actuel de la Lune, il n'est pas proportionnel à κ' vu la définition de ce nombre, mais il est quand même ultra-minoritaire par rapport aux autres moments.

Avec ces données chiffrées, une solution numérique approchée est trouvée sans difficulté sous *Python*, en utilisant la fonction de résolution « odeint » qui lui est intégrée. On a demandé aussi les racines approximatives de l'équation (18) déterminant les états de synchronisation totale, qui sont $\alpha_{si} \cong 0,195$ et $\alpha_{ss} \cong 1,20$ encadrant 1, de part et d'autre de $3/(4\xi) \cong 0,904$ et avec 1,20 inférieur à $1/\xi$ comme prévu.

Puisque la motivation initiale était d'étudier l'influence de la synchronisation de la rotation et de la révolution lunaires, commençons par discuter l'évolution de cette rotation. Pour toute la suite, les conditions initiales adoptées sont $\omega_0 = 1 = \alpha_0$ par définition et $\omega'_0 \cong 1 \text{ j}/27,3 \text{ j} \cong 0,0366$.

2.2. Évolution de la rotation lunaire synchronisée avec sa révolution

On a fait tracer $\langle \Omega' \rangle$, qui est monotone décroissant, en fonction du temps – d'abord avec une échelle linéaire pour t , puis avec une échelle logarithmique afin de mieux voir l'approche fine de la valeur limite quand t tend vers l'infini (cf. figure 2). On note que cette limite vaut 0,58 fois la valeur actuelle, et qu'elle est quasiment atteinte au bout d'une centaine de milliards d'années, soit environ trois fois le temps caractéristique 36,1 Ga (déduit du plus grand inverse – en valeur absolue – des parties réelles des valeurs propres de la matrice **L**), ce qui paraît normal.

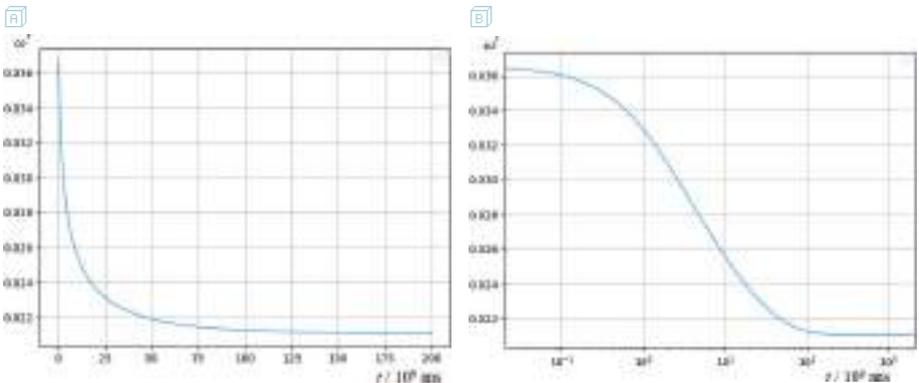


Figure 2 - Graphes de $\frac{\langle \Omega' \rangle}{1 \text{ tr}/j}$ en fonction du temps t (échelle linéaire à gauche, logarithmique pour t à droite).

Puis on a superposé les graphes de $\langle \Omega' \rangle$ et de $\langle \dot{\theta} \rangle$ (cf. figure 3, page ci-après) et constaté

qu'ils sont quasi identiques : la rotation lunaire est actuellement synchronisée avec sa révolution, et elle le reste pour toujours.

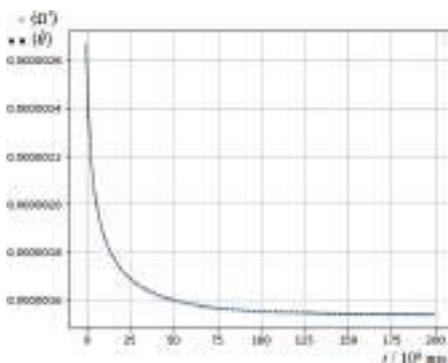


Figure 3 - Superposition des graphes de $\frac{\langle \dot{\Omega} \rangle}{1 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}}$ et $\frac{\langle \dot{\theta} \rangle}{1 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}}$ en fonction du temps t .

2.3. Évolution de la rotation terrestre

2.3.1. Paradoxe du modèle initial

On a de même fait tracer $\langle \Omega \rangle$, qui est aussi monotone décroissant, en fonction du temps (cf. figure 4). Sa limite est quasiment atteinte au bout d'une centaine de milliards d'années aussi, et elle vaut $1/47,3$ fois la valeur actuelle.

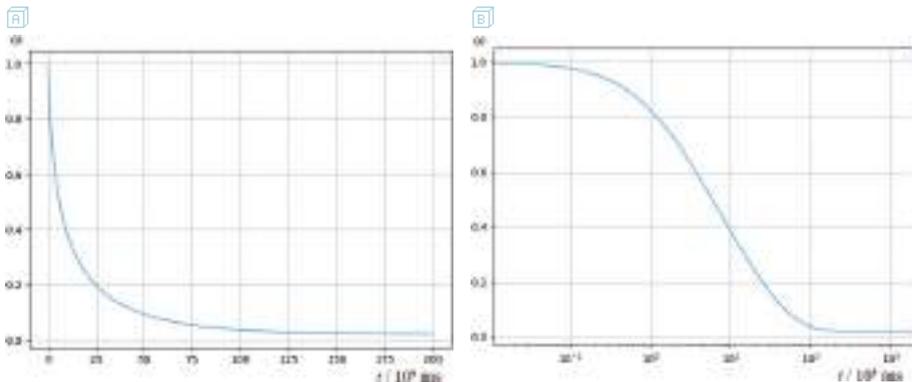


Figure 4 - Graphes de $\frac{\langle \Omega \rangle}{1 \text{ tr}/j}$ en fonction du temps t (échelle linéaire à gauche, logarithmique pour t à droite).

Compte tenu de la valeur $\tau \cong 516 \text{ s}$ adoptée au sous-paragraphe 2.1. (pour que la relation (7) soit cohérente avec les données contemporaines mesurées par les satellites LAGEOS (*Laser Geodynamics Satellite*) lancés à partir de 1976 – et dont on tire

$\varphi_m \cong 2^\circ$ – ainsi qu’avec le taux de variation du paramètre de l’orbite lunaire), pour la figure 4A la longueur, sur l’asymptote, de la sous-tangente à l’origine correspond à $4,04 \text{ Ga} \cong 36,1 \text{ Ga}/8,9$, ce qui donne un temps caractéristique de variation initiale de $\langle \dot{\Omega} \rangle$. En effet, la pente à l’origine de ce même graphe vaut $-\lambda(1-\nu) \cong -0,242$ d’après l’équation (15), donc le taux contemporain d’augmentation relative (due aux marées) de la durée du jour terrestre serait théoriquement $0,242 \cdot 10^{-9} \text{ a}^{-1}$, soit 2,1 ms d’augmentation centennale du jour, d’après notre modèle. Cette valeur est au-dessus de la valeur observée actuellement : 1,7 ms/siècle environ (voir par exemple [10, 22]).

Avant la fin des années 1970, la démarche suivie était inverse : les connaissances sur la forme de la Terre n’étaient pas assez précises pour donner directement la valeur contemporaine de φ_m , alors on l’estimait à partir de la mesure du taux ci-dessus (1,7 ms/siècle), et on croyait φ_m proche de 1° . Les mesures par LAGEOS ont donc semé le trouble, et conduit à chercher pourquoi l’augmentation centennale de la durée du jour n’était que de 1,7 ms/siècle actuellement – problème accru par le fait que la prise en compte de l’action du Soleil sur la rotation terrestre (cf. sous-paragraphe 2.8.1.) conduit à prédire un taux contemporain d’augmentation de la durée du jour terrestre valant $\left(1 + \frac{1}{4,6}\right) \times 2,1 \text{ ms/siècle} \cong 2,5 \text{ ms/siècle}$.

2.3.2. Influence de \dot{K} dû au rebond postglaciaire

Les recherches suscitées par le paradoxe ci-dessus ont permis de découvrir le lien entre la rotation de la Terre et un phénomène géologique déjà connu : le rebond postglaciaire, qui relève la lithosphère dans la région de la mer Baltique ainsi que dans la baie d’Hudson [8]. Il entraîne un déplacement de matière vers les hautes latitudes dans l’hémisphère nord, ce qui diminue K et donne $\dot{K} < 0$; ainsi les équations (8), (12) et (15) doivent-elles être modifiées, en rajoutant dans leurs seconds membres respectifs un terme positif : $-\langle \dot{K} \dot{\Omega} \rangle$ dans les deux premières. On peut préciser l’importance relative de ce terme : à partir des nombres donnés au sous-paragraphe 2.3.1. on déduit $\langle \dot{K} \dot{\Omega} \rangle / \langle K \dot{\Omega} \rangle \cong (2,1 - 1,7) / 1,7 \cong 0,2$. Les perturbations de l’orbite de LAGEOS permettent d’estimer \dot{K} autrement que par une mesure de K à différentes dates [23] ; la valeur trouvée s’avère compatible avec l’évolution de la durée du jour. À l’instar d’une patineuse qui pivote sur elle-même bras ouverts, et combat le freinage dû au frottement des patins sur la glace en ramenant progressivement ses bras dans l’axe du corps, la Terre atténue l’allongement du jour en rapprochant de son axe polaire certains matériaux. Une fois de plus dans cette étude, notre planète ne peut être considérée comme un solide parfait !

2.4. Synchronisation des rotations terrestre et lunaire (et de la révolution)

Comparons ici les deux rotations : celle de la Terre, et celle de la Lune – cf. figure 5

(cf. page ci-après). Cela montre que $\langle \Omega \rangle$ et $\langle \Omega' \rangle$ (et donc aussi $\langle \dot{\theta} \rangle$ d'après le sous-paragraphe 2.1.) tendent vers une même limite, quasiment atteinte au bout d'une centaine de milliards d'années.

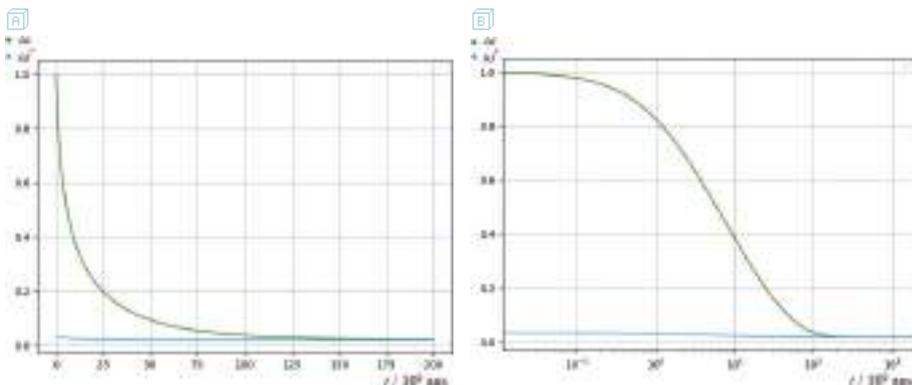


Figure 5 - Superposition des graphes de $\frac{\langle \Omega \rangle}{1 \text{ tr/j}}$ et $\frac{\langle \Omega' \rangle}{1 \text{ tr/j}}$ en fonction du temps t (échelle linéaire à gauche, logarithmique pour t à droite).

2.5 Évolution du paramètre de l'orbite lunaire

Dans notre étude, le paramètre de l'orbite lunaire se confond avec son rayon a , et $\sigma^* \cong 3,44 \cdot 10^{34} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. On a fait tracer $\langle a \rangle$, qui est monotone croissant, en fonction du temps (cf. figure 6). Sa limite est quasiment atteinte lorsque la rotation terrestre et la révolution lunaire sont synchronisées (donc toujours au bout d'une centaine de milliards d'années), et elle vaut $\alpha_{ss}^2 \cong 1,44$ fois la valeur actuelle ; elle correspond, d'après la 3^e loi de Kepler, à une période de $27,3 \text{ j} \times (1,44)^{3/2} \cong 47,3 \text{ j}$, en accord avec celle donnée dans la littérature [10].

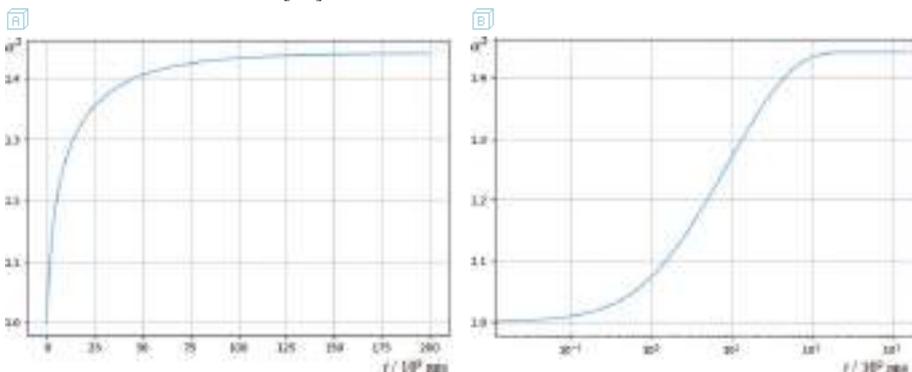


Figure 6 - Graphes de $\langle a \rangle / \langle a \rangle_0$ en fonction du temps t (échelle linéaire à gauche, logarithmique pour t à droite).

Pour la figure 6A la longueur, sur l'asymptote, de la sous-tangente correspond à 4,44 Ga, ce qui donne un temps caractéristique de variation initiale de $\langle a \rangle$ 10 % plus long que celui de $\langle \Omega \rangle$. Cette longueur est reliée à la pente à l'origine qui, d'après les équations (15)-(17), est telle que

$$\frac{\xi}{2} \frac{d\omega^2}{du} (0) = \kappa \lambda (1 - \nu) + \kappa' \lambda' [\omega' (0) - \nu] = \frac{\xi}{2} \frac{T}{\langle a \rangle_0} \frac{d\langle a \rangle}{dt} (0). \quad (33)$$

2.6. Influence de l'élasticité terrestre sur la vitesse d'évolution

Pour la valeur actuelle de $k_2 \tau$ (qui est une des caractéristiques de l'élasticité terrestre) et pour une valeur dix fois plus élevée, on a fait tracer les graphes de $\langle \Omega \rangle$ (cf. figure 7), de $\langle \Omega' \rangle$ (cf. figure 8) et de $\langle a \rangle$ (cf. figure 9, page ci-après) en fonction du temps. On constate que l'augmentation de $k_2 \tau$ accélère le régime transitoire, comme on s'en doutait puisque (tout en restant dans les cas où ϕ_m est petit) cela augmente les effets de marée. Par contre, les valeurs des limites de $\langle \Omega \rangle$, $\langle \Omega' \rangle$ et $\langle a \rangle$ quand t tend vers l'infini sont inchangées, puisqu'elles sont déterminées par la conservation de σ^* indépendamment de la cinétique d'évolution vers cette limite.

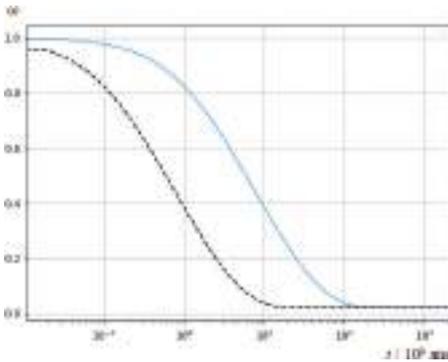


Figure 7 - Graphes de $\frac{\langle \Omega \rangle}{1 \text{ tr/j}}$ en échelle logarithmique pour t , avec la valeur actuelle de $k_2 \tau$ en bleu, et une valeur dix fois plus élevée en pointillés.

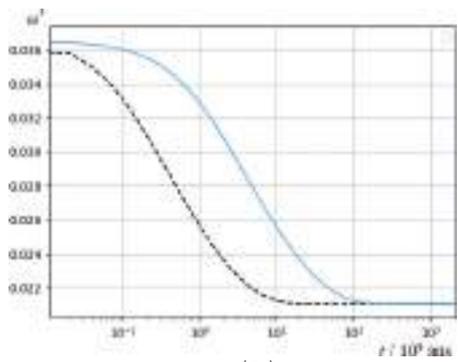


Figure 8 - Graphes de $\frac{\langle \Omega' \rangle}{1 \text{ tr/j}}$ en échelle logarithmique pour t , avec la valeur actuelle de $k_2 \tau$ en bleu, et une valeur dix fois plus élevée en pointillés.

Dans le cadre de l'approximation du sous-paragraphe 1.8., on a vu qu'il est possible d'exprimer facilement la puissance moyenne actuellement dissipée dans la Terre par les effets de marée ; grâce à la formule (30) on trouve $\langle \mathcal{P}_d \rangle (0) \cong 3,2 \cdot 10^{12} \text{ W}$, avec les données du sous-paragraphe 2.1. Cette puissance chauffe la Terre, et ses océans. Bien sûr, avec une valeur de $k_2 \tau$ dix fois plus élevée, on trouve plus : $3,2 \cdot 10^{13} \text{ W}$. Quoique Io (le premier satellite galiléen de Jupiter) ait un rayon de 1821 km, la puissance dissipée par effets de marée dans Io est du même ordre que dans la Terre, donc pour Io l'accroissement de température interne dû aux effets de marée doit être nettement plus

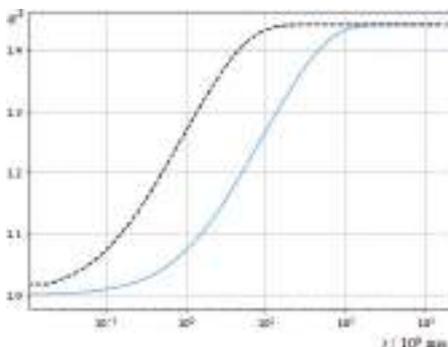


Figure 9 - Graphes de $\langle a \rangle / \langle a \rangle_0$ en échelle logarithmique pour t , avec la valeur actuelle de $k_2 \tau$ en bleu, et une valeur dix fois plus élevée en pointillés.

important que pour la Terre (voir l'annexe) ; ce chauffage énergétique explique le volcanisme actif et intense de Io [24]. Un tel mécanisme expliquerait aussi les geysers vus sur Europe (deuxième satellite galiléen de Jupiter) et Encelade (satellite de Saturne), ainsi que l'élasticité de Titan (le plus gros satellite de Saturne) – voir l'annexe.

2.7. Influence de l'élasticité lunaire sur la vitesse d'évolution

Pour la valeur actuelle de $k_2' \tau'$ (qui est une des caractéristiques de l'élasticité lunaire) et pour une valeur dix fois plus élevée, on a fait tracer les graphes de $\langle \Omega \rangle$ (cf. figure 10, page ci-contre), de $\langle \Omega' \rangle$ (cf. figure 11, page ci-contre) et de $\langle a \rangle$ (cf. figure 12, page ci-contre) en fonction du temps. On constate que l'augmentation de $k_2' \tau'$ ne change guère le régime transitoire (on s'en doutait puisque sa valeur joue sur la durée nécessaire pour atteindre la synchronisation de la rotation et la révolution lunaires, mais elles sont déjà synchronisées actuellement et vont le rester pour toute la suite) ; *a fortiori* elle ne peut pas changer non plus les limites de $\langle \Omega \rangle$, $\langle \Omega' \rangle$ et $\langle a \rangle$ quand t tend vers l'infini.

2.8. Influence du Soleil

2.8.1. Sur l'évolution de la rotation propre terrestre

Nous avons vu que l'influence de la Lune sur la rotation terrestre est régie par l'équation (8), dont le second membre vaut actuellement

$$-3 k_2 \tau \mathcal{G} R^5 \frac{(7,35 \cdot 10^{22} \text{ kg})^2}{(3,84 \cdot 10^5 \text{ km})^6} 2\pi \left(\frac{1}{1 \text{ j}} - \frac{1}{27,32 \text{ j}} \right).$$

Pour tenir compte de l'influence actuelle du Soleil, il faut rajouter

$$-3 k_2 \tau \mathcal{G} R^5 \frac{(2,00 \cdot 10^{30} \text{ kg})^2}{(1,50 \cdot 10^8 \text{ km})^6} 2\pi \left(\frac{1}{1 \text{ j}} - \frac{1}{365 \text{ j}} \right)$$

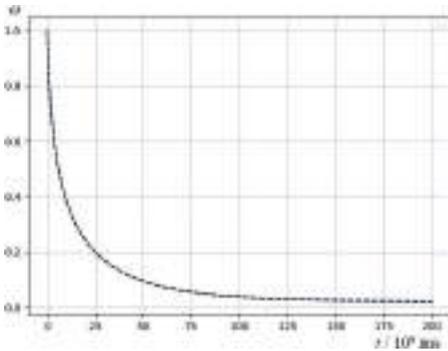


Figure 10 - Graphes de $\frac{\langle \Omega \rangle}{1 \text{ tr/j}}$ en échelle linéaire pour t , avec la valeur actuelle de $k_2' \tau'$ en bleu, et une valeur dix fois plus élevée en pointillés noirs.

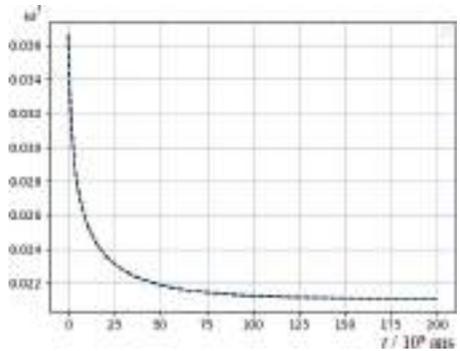


Figure 11 - Graphes de $\frac{\langle \Omega \rangle}{1 \text{ tr/j}}$ en échelle linéaire pour t , avec la valeur actuelle de $k_2' \tau'$ en bleu, et une valeur dix fois plus élevée en pointillés noirs.

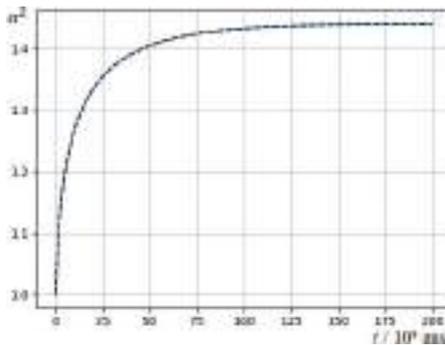


Figure 12 - Graphes de $\frac{\langle a \rangle}{\langle a \rangle_0}$ en échelle linéaire pour t , avec la valeur actuelle de $k_2' \tau'$ en bleu, et une valeur dix fois plus élevée en pointillés noirs.

qui est (en valeur absolue) 4,6 fois plus petit (et non pas 2,2 fois comme au sous-paragraphe 1.3.). L'approximation consistant à négliger l'action solaire sur la rotation propre terrestre est relativement bonne actuellement, mais ne le sera plus du tout lorsque le paramètre de l'orbite lunaire ne vaudra plus $3,84 \cdot 10^5 \text{ km}$, mais $3,84 \cdot 10^5 \text{ km} \times 4,6^{1/6}$ – le paramètre de l'orbite terrestre ne change quasiment pas. On ne pourra donc plus considérer que la variation séculaire du moment cinétique propre du système Terre-Lune est négligeable ; cela remet en question la synchronisation de la rotation terrestre et de la révolution lunaire avec une période voisine de 47 j d'ici une centaine de milliards d'années.

En effet, l'action du Soleil augmentera encore la durée du jour terrestre pour la rapprocher de celle de l'année sidérale. Comme celle-ci sera plus longue que le mois

lunaire à cette même époque, la Lune tendra à accélérer la rotation terrestre (comme Phobos le fait pour Mars actuellement) et donc le paramètre de l'orbite lunaire devra entamer une phase décroissante⁽¹²⁾. On peut se demander si, sur la rotation de la Terre, ces deux effets arriveront à s'équilibrer temporairement. De toute façon, la Lune resterait dans la sphère d'influence de la Terre, donc ne pourrait aller se mettre à demeure aux points de Lagrange L1 ou L2 du système Soleil-Terre, d'autant plus qu'ils sont instables – placés actuellement à $3,9 \langle a \rangle_0 \cong 1,5 \cdot 10^6$ km de la Terre⁽¹³⁾.

2.8.2. Sur le moment cinétique orbital du système Terre-Lune

Le taux actuel de variation de la norme moyenne $\gamma \alpha$ du moment cinétique orbital du système Terre-Lune à cause des actions intérieures à ce système se déduit directement des équations (11)–(13) ; il vaut approximativement

$$3k_2 \tau \mathcal{G}(6,37 \cdot 10^3 \text{ km})^5 \frac{(7,35 \cdot 10^{22} \text{ kg})^2}{(3,84 \cdot 10^5 \text{ km})^6} 2\pi \left(\frac{1}{1j} - \frac{1}{27,32j} \right).$$

L'influence du Soleil sur cette variation n'est pas tant due à sa déformation par la Terre qu'au champ de marée ordinaire \mathbf{M}_S créé par lui dans (\mathcal{B}) . Une conséquence classique de \mathbf{M}_S est la précession de la ligne des nœuds (période : 18,6 a) de l'orbite lunaire, qui change la direction du moment cinétique orbital du système Terre-Lune, mais pas $\gamma \alpha$, sauf si on tient compte de l'excentricité de l'orbite lunaire. Cette précession, ainsi que l'avance du périégée (période : 41 a) de l'orbite lunaire, font que les termes d'ordre 1 en \mathbf{OO}' dans \mathbf{M}_S ne peuvent pas produire une variation séculaire de $\gamma \alpha$; seuls les termes d'ordre supérieur le peuvent, donc la variation de $\gamma \alpha$ qui en résulte est très lente⁽¹⁴⁾.

- (12) Mais, contrairement au cas de Phobos, la Lune serait alors dans la situation où $\alpha > \alpha_{ss}$. La décroissance de C qui s'ensuit est bien due au moment des actions exercées sur la Lune par la Terre déformée par les effets de marée, mais d'une façon qui dépend de sa rotation propre sur laquelle agit le Soleil.
- (13) Celle-ci sera encore plus loin de L1 et L2 dans 4,9 Ga, quand le Soleil sera finalement devenu une naine blanche : leur distance à la Terre sera augmentée, car la masse du Soleil ne serait plus qu'environ 0,7 fois sa masse actuelle ; alors les demi-axes de l'orbite terrestre devraient être augmentés ([25], p. 227–229) d'un facteur $1/0,7 \cong 1,4$, et la distance entre L1 et L2 multipliée par $(0,7)^{-1/3}/0,7 \cong 1,6$, donc ils se trouveraient à $6,3 \langle a \rangle_0$ de la Terre.
- (14) Il en est de même pour la variation corrélative de σ^* . Ce fait est bien connu, au point que Čuk et Stewart, voulant expliquer la quasi identité des rapports isotopiques des éléments terrestres et lunaires par un fort brassage de la matière suite à l'impact ayant formé la Lune il y a 4,36 Ga, ont imaginé que la période de rotation terrestre n'était pas alors 5 h mais 2–3 h, et pour concilier leur idée avec d'autres données ils ont eu besoin de trouver un mécanisme plus efficace de décroissance de σ^* : la « résonance d'évection », qui 9 ka après l'impact aurait bloqué pendant 59 ka le périégée lunaire dans une direction perpendiculaire à celle du Soleil [26].

Aussi peut-on considérer que les équations de notre modèle rendent bien compte de la valeur de $\frac{d\langle a \rangle}{dt}(0)$.

Ainsi, en utilisant sa mesure $(3,82 \pm 0,07)$ cm/a [27] qui est l'une des plus précises sur les effets de marée affectant la Lune, l'expression (33) nous a permis de déterminer un intervalle de confiance pour le produit $k_2\tau$ et donc aussi, puisque l'intervalle de confiance de k_2 est donné par ailleurs [20], pour le temps τ que nous avons introduit dans la relation (7).

CONCLUSION

Au terme de cette étude, il y a pour le TIPE de l'élève l'immense satisfaction d'avoir obtenu – ce qui n'est pas fréquent – des tracés de $\langle \Omega \rangle$, $\langle \Omega' \rangle$ et $\langle a \rangle$ en fonction du temps, et de prédire des évolutions conformes à ce que disent les références majeures [1–8] sur ce sujet, avec un accord raisonnable entre le taux actuel de croissance séculaire prévu pour la durée du jour terrestre et le taux observé. En prolongement de ce TIPE, il a paru intéressant d'étudier les cas de synchronisation totale, ce qui conduisit à discuter leur existence, leur nombre et leur stabilité.

Mais les moyens informatiques mis en œuvre permettent aussi de tirer des enseignements moins académiques : si on étudie le passé de la distance Terre-Lune en gardant $k_2 \cong 0,3531 \pm 0,0001$ et $\tau \cong (516 \pm 10)$ s, on aboutit à la conclusion qu'il y a 1,5 milliard d'années, la Lune devait se trouver en deçà de la limite de Roche ; c'est impossible puisque la Lune est en orbite autour de la Terre depuis au moins 4,3 milliards d'années. Vraisemblablement τ était plus faible dans le passé : une variation importante est très plausible, car τ dépend beaucoup des frottements au fond des océans et donc aussi de la forme des bassins océaniques, qui s'est considérablement modifiée au cours des ères géologiques [9, 28]. Il est probable que k_2 ait aussi beaucoup varié lors de l'évolution géologique de la Terre.

Ayant trop peu de renseignements sur ces variations, ainsi que sur celles de k'_2 et τ' , on n'a donc pas pu reconstituer l'histoire détaillée des rotations terrestre et lunaire, et notamment celle de la synchronisation de la révolution et de la rotation lunaires. Cette déception est compensée par tout ce que nous avons mis en lumière : il existe deux états totalement synchronisés (un stable et l'autre non) du système Terre-Lune, pour lequel le produit $k_2\tau$ n'a pas pu rester constant depuis sa formation ; mais une fois réalisée la synchronisation qu'on voulait étudier, les valeurs de k'_2 et τ' n'influent plus sur l'évolution du système. Alors nous avons le sentiment d'avoir quasiment fait le tour complet des questions sur la synchronisation d'un système planète-satellite, dans le cadre restreint de notre modèle simple où l'orbite est supposée quasi circulaire, (σ^* , $k_2\tau$, $k'_2\tau'$) constant, et les obliquités nulles.

Grâce à des expressions approximatives de la variation temporelle de $k_2\tau$ et $k_2'\tau'$, donc en repoussant les limites dues à certaines de nos hypothèses simplificatrices, pourrait-on quand même reconstituer grossièrement l'histoire de la synchronisation de la révolution et de la rotation lunaires, et voir son influence sur la rotation terrestre dans notre modèle simplifié ? À ce stade de notre travail, cette question mérite d'être posée ; on mesure alors le bien-fondé de ce qu'écrivit Kurt Lambeck dans l'introduction d'un de ses articles [6] : «*Tidal dissipation and its consequences on the lunar orbit and Earth rotation has become a classic problem yet there is probably no other subject in geophysics that has had as long a history of frustration and still attracts very considerable attention from geophysicists, astronomers and oceanographers. That this is so is as much a reflection of a fascinating subject as an indication of a problem of some importance in understanding the origin and dynamical evolution of the Moon.*»

BIBLIOGRAPHIE

- [1] G. Darwin, *Tidal Friction and Cosmology*, **2**, *Scientific Papers*, New York : Cambridge University Press, 1908.
- [2] W. M. Kaula, "Tidal dissipation by solid friction and the resulting orbital evolution", *Rev. Geophys. Space Phys.*, **2**, p. 661-685, 1964.
- [3] P. Goldreich, "History of the lunar orbit", *Rev. Geophys. Space Phys.*, **4**, p. 411-439, 1966.
- [4] W. H. Munk and G. J. F. MacDonald, *The Rotation of the Earth*, New York : Cambridge University Press, 1960.
- [5] B. G. Marsden and A. G. W. Cameron éd., *The Earth-Moon system*, New York : Plenum Press, 1966.
- [6] K. Lambeck, "Tidal dissipation in the oceans: astronomical, geophysical and oceanographic consequences", *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, **287**, p. 545-594, 1977.
- [7] K. Lambeck, *The Earth variable rotation: geophysical causes and consequences*, London : Cambridge University Press, 1980.
- [8] A. Brahic, M. Hoffert, A. Schaaf et M. Tardy, *Sciences de la Terre et de l'Univers*, Paris : Vuibert, 1999.
- [9] S. R. Meyers and A. Malinverno, "Proterozoic Milankovitch cycles and the history of the solar system", *PNAS*, **115**, p. 6363-6368, 2018.
- [10] C. D. Murray and S. F. Dermott, *Solar System Dynamics*, Cambridge : Cambridge University Press, 1999.

- [11] W. Chen and W. Shen, “New estimates of the inertia tensor and rotation of the triaxial nonrigid Earth”, *J. Geophys. Res.*, **115**, B12419, 2010.
- [12] A. S. Konopliv, A. B. Binder, L. L. Hood, A. B. Kucinskas, W. L. Sjogren and J. G. Williams, “Improved Gravity Field of the Moon from Lunar Prospector”, *Science*, **281**, p. 1476–1480, 1998.
- [13] A. Morbidelli, “Interplanetary kidnap”, *Nature*, **441**, p. 162–163, 2006.
- [14] C. B. Agnor and D. P. Hamilton, “Neptune’s capture of its moon Triton in a binary-planet gravitational encounter”, *Nature*, **441**, p. 192–194, 2006.
- [15] J. Renault, *Techniques mathématiques de la physique*, Paris : Dunod, 1994.
- [16] V. Arnold, *Équations différentielles ordinaires*, 4^e édition, Moscou : Mir, 1988.
- [17] C. Vidal et H. Lemarchand, *La réaction créatrice – Dynamique des systèmes chimiques*, Paris : Hermann, 1988.
- [18] B. A. Black and T. Mittal, “The demise of Phobos and development of a Martian ring system”, *Nature Geoscience*, **8**, p. 913–917, 2015.
- [19] J. Chapront, M. Chapront-Touzé and G. Francou, “A new determination of lunar orbital parameters, precession constant and tidal acceleration from LLR measurements”, *Astron. Astrophys.*, **387**, p. 700–709, 2002.
- [20] F. Seitz, S. Kirschner and D. Neubersch, “Determination of the Earth’s Pole Tide Love Number k_2 from Observations of Polar Motion Using an Adaptive Kalman Filter Approach”, *J. Geophys. Res.*, **117**, B09403, 2012.
- [21] K. Matsumoto and *al.*, “An improved lunar gravity field model from SELENE and historical tracking data: Revealing the farside gravity features”, *J. Geophys. Res.*, **115**, E06007, 2010.
- [22] F. R. Stephenson, *Historical Eclipses and Earth’s Rotation*, Cambridge : Cambridge University Press, 1997.
- [23] W. R. Peltier, “Constraint on deep mantle viscosity from LAGEOS acceleration data”, *Nature*, **304**, p. 434–436, 1983.
- [24] S. J. Peale, P. Cassen and R. T. Reynolds, “Melting of Io by Tidal Dissipation”, *Science*, **203**, p. 892–894, 1979.
- [25] D. Boccaletti and G. Pucacco, *Theory of Orbits – t 2: Perturbative and Geometrical Methods*, Berlin : Springer, 1998.

- [26] M. Čuk and S. T. Stewart, “Making the Moon from a Fast-Spinning Earth: A Giant Impact Followed by Resonant Despinning”, *Science*, **338**, p. 1047-1052, 2012.
- [27] J. O. Dickey and *al.*, “Lunar Laser Ranging: A continuing legacy of the Apollo Program”, *Science*, **265**, p. 482-490, 1994.
- [28] B. Bills and R. D. Ray, “Lunar orbital evolution: A synthesis of recent results”, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, p. 3045-3048, 1999.

Annexe

Richesse et diversité des propriétés des satellites dans le système solaire

Triton

Proche de sa planète (car $\langle a \rangle_0 \cong 350\,000$ km est inférieur au paramètre correspondant pour le système Terre-Lune) qui en plus est la géante Neptune ($M \cong 1,024 \cdot 10^{26}$ kg), Triton ($M' \cong 2,140 \cdot 10^{22}$ kg) a une rotation propre synchrone de période 5,877 jours et d'obliquité nulle.

Son inclinaison orbitale sur l'équateur de Neptune est de 157° (nettement plus proche de 180° que de 90°) ! Dans notre modèle et avec nos conventions d'orientation, pour Neptune-Triton on a $\langle \Omega' \rangle_0 = \sqrt{\mathcal{G}(M + M') / \langle a \rangle_0^3}$, et $\langle \Omega \rangle_0 \cong -2\pi / (16,11 \text{ h})$. La valeur négative de cette dernière caractéristique impliquerait, d'après notre modèle et compte tenu de la petitesse du moment cinétique propre de Triton par rapport à celui de Neptune, que Triton va s'écraser sur Neptune ; il n'existerait pas d'état de synchronisation totale pour Neptune-Triton.

Cependant, à cause du fait que l'inclinaison du plan de l'orbite de Triton par rapport à l'équateur de Neptune est 23° en dessous de 180° , si les effets de marée parvenaient à faire basculer ce plan et à lui donner une inclinaison nulle sur l'équateur de Neptune, alors Ω serait devenu positif à un nouvel instant initial ultérieur et la synchronisation totale du système Neptune-Triton deviendrait possible par la suite, sous réserve que $(\kappa + \kappa') \nu \xi^3 \leq 27/256$ avec cet instant initial.

Charon

Les caractéristiques physiques de Pluton ($M \cong 1,3 \cdot 10^{22}$ kg, $R \cong 1\,185$ km) et de son satellite principal Charon ($M' \cong 1,5 \cdot 10^{21}$ kg, $R' \cong 607$ km) en font un système binaire sans contact⁽¹⁵⁾, plutôt qu'un système planète-satellite : la valeur du demi grand-axe de l'orbite de Charon dans le référentiel barycentrique de Pluton étant $a \cong 17\,181$ km, le centre d'inertie de Pluton-Charon se trouve hors de Pluton !

Pour ce système, l'écart à l'état de synchronisation totale stable est indécélable : l'inclinaison orbitale est nulle sur l'équateur plutonien, les obliquités sont nulles, l'excentricité de l'orbite est inappréciable (inférieure à $7 \cdot 10^{-5}$). Les périodes de rotation et de révolution ont la même valeur : 6 j 9 h 17 min 36,7 s. La synchronisation de la

(15) (on en connaît une soixantaine d'autres dans la ceinture de Kuiper, dont Éris et Dysnomia, Orcus et Vanth, etc.)

rotation de la planète (naine) avec la révolution d'un de ses satellites n'est réalisée par aucun autre corps connu du système solaire, alors qu'il est fréquent que la rotation d'un satellite soit synchronisée avec sa révolution autour de sa planète !

On pense que la formation de Charon est, comme celle de la Lune, due à une collision géante subie par Pluton. L'état de synchronisation totale aurait bien pu être réalisé en quelques millions d'années à cause de la grande élasticité de Pluton, liée à la présence d'un océan souterrain – à cause de la fusion des glaces internes par chauffage (cf. le sous-paragraphe 2.6.) dû aux forts effets de marée exercés par Charon (actuellement vingt-deux fois plus proche de Pluton que la Lune ne l'est de la Terre, et encore bien plus proche peu après la collision qui l'a formé !). Ceci est cohérent avec une des nombreuses découvertes dues au survol, le 14 juillet 2015, de Pluton par la sonde *New Horizons* : une vaste région de Pluton, appelée *Sputnik Planitia*, n'est pas du tout cratérisée (alors qu'il doit être bombardé par de multiples petits corps de la ceinture de Kuiper), donc un mécanisme a permis de renouveler sa surface il y a dix millions d'années tout au plus (voire bien moins) ; vu le très fort albédo de *Sputnik Planitia* (l'un des plus élevés du système solaire) Pluton n'est pas (contrairement à Mars) géologiquement mort ! D'où lui vient donc l'énergie nécessaire à son activité ? Pas de la dissipation par effets de marée avec Charon, puisque le système Pluton-Charon est parvenu à l'état de synchronisation totale. Le planétologue François Forget émet l'idée que la collision ayant formé Charon soit beaucoup moins ancienne que le système solaire...

Astéroïdes

On estime que 16 % des astéroïdes géocroiseurs sont des systèmes binaires ou des systèmes triples ; en 2015 on connaissait déjà dix systèmes triples et deux cent quarante astéroïdes dotés d'une lune. Certains sont des binaires à contact comme les astéroïdes Castalia, Kleopatra, et le Troyen Hector ; c'est très rare dans le système solaire interne. Mais ce n'est sans doute pas le cas dans la ceinture de Kuiper, dont on estime que la moitié de ses « objets classiques froids » sont des binaires ; le survol de l'un d'eux, qui est binaire à contact, par la sonde *New Horizons* le 1^{er} janvier 2019, corrobore les modèles actuels de formation du système solaire – ils disent que l'accrétion forme beaucoup de binaires ou d'objets multiples.

Phobos

Il s'avère que Phobos (le plus gros des deux satellites de Mars) et Triton sont, dans le système solaire, les seuls satellites en-deçà de l'orbite synchrone de leur planète. Dans le cas de Triton, sa révolution étant en sens contraire de la rotation de sa planète avec en plus $|\sigma'| \ll |\sigma^*|$, la position de son orbite ne change rien au sens de variation du paramètre de celle-ci : il décroît. Il en est de même pour Phobos, dont la révolution est dans le même sens que la rotation de Mars ; cette décroissance est alors due au fait que

pour Phobos $\langle a \rangle_0^{3/2} < \sqrt{\mathcal{G}(M+M')}/\langle \Omega \rangle_0$, et son moment cinétique propre est négligeable donc $\alpha(0) \notin [\alpha_{si}, \alpha_{ss}]$, et α est monotone décroissant. Si $\alpha(0) > \alpha_{ss}$ (ce qui n'est possible que si $3/(4\xi) < 1$) on trouve ici que l'orbite du satellite tend vers un cercle asymptote de rayon $\langle a \rangle_0 \alpha_{ss}^2$, ce qui va éviter au satellite de s'écraser sur sa planète si ce rayon est supérieur à celui de l'atmosphère planétaire (cependant s'il est inférieur à la limite de Roche – i.e. $2,423 R$ si les deux astres ont la même densité – le satellite sera disloqué) ; mais si $\alpha(0) < \alpha_{si}$ (ce qui n'est possible que si $3/(4\xi) > 1$) le satellite est sur une trajectoire spiralée tendant vers le centre de sa planète – et c'est le cas de Phobos, pour qui ξ est de l'ordre de 10^{-6} , et qui devrait franchir la limite de Roche d'ici vingt à quarante millions d'années [18].

Quelques satellites de Jupiter (Io, Europe) ou de Saturne (Encelade, Titan)

Comme la Lune, tous ces satellites ont une rotation synchrone avec leur révolution, mais leur orbite reste elliptique, donc ils présentent encore une dissipation par effets de marée à cause de la variation de ceux-ci au cours du temps, liée à la variation de r . Dans un tel cas, à cause des libérations, l'orientation des bourrelets de marée n'effectue que de petites oscillations de part et d'autre d'une direction fixe dans le référentiel (principal) du satellite ; mais surtout, à cause d'un temps de retard, la variation de hauteur des bourrelets de marée n'est pas exactement en opposition de phase avec la variation de r , ce qui influe sur la force gravitationnelle que la Lune subit de la part de la Terre, et tend à annuler progressivement l'excentricité de son orbite. Quand l'orbite lunaire sera devenue circulaire, la hauteur des bourrelets de marée de la Lune sera constante, et notre satellite ne sera plus chauffé par les effets de marée.

Pour chacun des quatre satellites de Jupiter ou de Saturne que nous avons mentionnés, les effets de marée subis de la part de leur planète géante sont beaucoup plus forts que ceux subis par la Lune, et le processus de circularisation de leur orbite est beaucoup plus efficace. Si son excentricité n'est pas devenue imperceptible depuis longtemps, c'est parce que ce processus est contré par les perturbations résonnantes (connues pour tendre à augmenter l'excentricité) entre le satellite considéré et d'autres satellites de la même planète. Ainsi l'excentricité de l'orbite se maintient-elle respectivement à 0,0041 et 0,0094 pour Io et Europe, 0,00452 pour Encelade et 0,0288 pour Titan ; leur chauffage par effets de marée reste puissant, alors que leur rotation est synchrone de leur révolution pour chacun.

Dans le cas de Io, la hauteur moyenne des bourrelets de marée est de l'ordre de 5 km (et non pas 0,4 m comme pour la Terre), et l'amplitude crête à crête de la variation de hauteur de ces bourrelets sur une période de révolution est de l'ordre de 10^2 m d'après la théorie statique ; Stanton Peale avait calculé que le chauffage interne de Io qui en résulte au centre serait dix fois plus puissant que celui dégagé par la radioactivité de l'intérieur de la Lune – qui a quand même un noyau liquide de (381 ± 12) km de

rayon – et avait conclu que cela pouvait entretenir un volcanisme étendu et récurrent sur Io. Cela fut vérifié dès son premier survol par une sonde : le 8 mars 1979 Voyager 1 a vu pour la première fois un volcan actif hors de la Terre, il projetait sur Io un panache de 270 km de hauteur et donnait des retombées 1000 km à la ronde ! Le record de hauteur a été enregistré le 6 août 2001 : un panache de 500 km, orienté juste dans la direction de la sonde Galileo qui a donc pu l'analyser *in situ* – et y a trouvé des flocons de SO_2 . De 1979 à 2014 on a recensé cent dix volcans en activité sur Io.

Sous la croûte glacée d'**Europe**, on pense qu'il existe un océan souterrain, maintenu liquide grâce au chauffage par effets de marée. En décembre 2012, le télescope spatial Hubble a détecté deux panaches d'eau de 200 km de hauteur, s'élevant au-dessus de l'hémisphère sud d'Europe.

Pour la même raison, **Encelade** présente des geysers ; les forces de marée qu'il subit ouvrent parfois dans sa croûte glacée des fissures, allant jusqu'à mesurer 130 km de longueur !

Lors de ses six passages rapprochés de **Titan**, la sonde Cassini a détecté de fortes variations de hauteur des bourrelets de marée de Titan entre son péricentre et son apo-centre. Des variations de cette ampleur sont incompatibles avec un intérieur rocheux : un océan doit donc exister à 100 km sous la surface, constitué d'eau ammoniaquée, l'ammoniac faisant antigel ($-103\text{ }^\circ\text{C}$ est la température du plus bas eutectique eau-ammoniac à 1 atm).



Luc DETTWILLER

*Professeur en PC**

Lycée Blaise Pascal

Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme)



Thomas MOULÈNE

Étudiant

École nationale supérieure des ingénieurs en arts chimiques et technologiques (ENSIACET)

Toulouse (Haute-Garonne)

Suivi cinétique de la formation du diiode à l'aide d'un téléphone portable

par **Arthur SAINTIER**

Lycée Léon-Gontran Damas - 97354 Remire-Montjoly (Guyane)

arthur.saintier@gmail.com

CET ARTICLE présente une approche expérimentale utilisant le téléphone portable et les possibilités qu'il offre dans le cadre d'une séance de travaux pratiques de chimie en classe de terminale enseignement de spécialité. Cette séance a pour but de mettre en lumière le principe du suivi cinétique d'une transformation chimique par mesure de l'absorption lumineuse.

INTRODUCTION

Cette séance de travaux pratiques s'inscrit dans la première partie des projets de programme de la classe de terminale enseignement de spécialité : « Constitution et transformation de la matière » – « Suivre et modéliser l'évolution temporelle d'un système siège d'une transformation chimique ». Il est préférable de rappeler en amont le principe de la spectroscopie UV-visible, la loi de Beer-Lambert et la notion d'absorbance (notions déjà abordées en classe de première).

Chez de nombreux élèves de terminale, le spectromètre UV-visible est souvent vu comme une boîte noire, dont le fonctionnement est complexe. De plus, le coût élevé d'un spectromètre UV-visible ne permet pas systématiquement d'en fournir un exemplaire à chaque binôme lors d'une séance de travaux pratiques. Il existe déjà des protocoles qui permettent de faire de la spectrophotométrie sans spectrophotomètre à l'aide d'une photodiode [1].

Cet article présente une approche nouvelle permettant de confronter ces difficultés et d'ouvrir une discussion plus profonde sur la notion d'absorbance, en utilisant le téléphone portable des élèves comme un outil de mesure. En effet, dans la littérature, on trouve qu'il est possible de faire le lien entre intensité lumineuse et codage RGB (*Red green blue*, en français RVB pour Rouge vert bleu) du capteur du téléphone portable [2].

Les téléphones portables étant devenus un outil incontournable dans la panoplie du lycéen, il peut sembler pertinent de réfléchir à l'usage que l'on peut en faire en classe, comme un outil de mesure physique.

Il existe déjà dans la littérature anglo-saxonne des exemples d'activités expérimentales

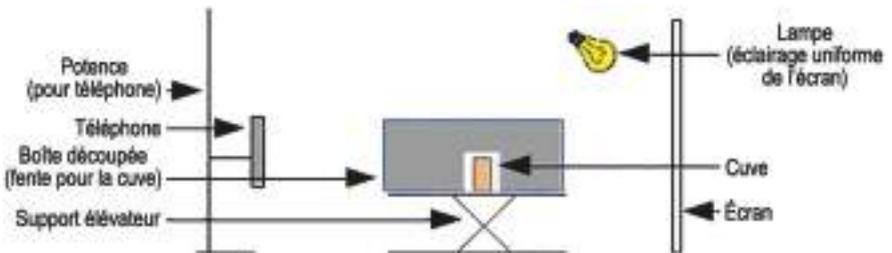


Figure 1 - Photographie du dispositif expérimental - Schéma du dispositif expérimental.

tales sur la mise en évidence de la loi de Beer-Lambert, par utilisation du capteur RGB du téléphone portable [3–5]. Cet article propose d'étendre ce principe aux études cinétiques. Ainsi, la méthode d'obtention de l'absorption à l'aide d'un téléphone portable présentée dans cet article peut être étendue à d'autres applications, comme la mise en évidence de la loi de Beer-Lambert en classe de première enseignement de spécialité.

1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Le principe de ce TP repose sur l'étude des paramètres qui influencent la cinétique de la réaction de formation du diiode I_2 par oxydation des ions iodure par l'eau oxygénée en milieu acide suivant la réaction :



Lors de l'oxydation des ions iodure, le diiode formé réagit avec les ions iodure présents en solution aqueuse pour former des ions triiodure [6]. Cet équilibre entre le diiode et les ions triiodure n'est pas très déplacé ni dans un sens ni dans l'autre (constante d'équilibre $K = 700$ d'après les tables thermodynamiques). On suppose que l'équilibre est instantané par rapport à la réaction que l'on étudie. Dans la suite de cet article, le mélange diiode/ions triiodures sera nommé diiode.

Le diiode, en solution aqueuse, est une espèce colorée. Ainsi, le choix d'un suivi de l'absorbance pour l'étude de cette réaction peut être discuté avec les élèves. En effet, la couleur de la solution évoluant au cours de la transformation, le choix d'un capteur sensible aux variations d'intensité lumineuse semble être un choix pertinent pour l'étude de cette transformation.

Pour suivre l'évolution de l'absorbance au cours du temps, il est possible de fabriquer un dispositif constitué d'une brique alimentaire découpée et de positionner aux extrémités : le téléphone portable d'un côté, et un écran blanc éclairé de l'autre. Un trou est positionné dans la brique afin d'insérer une cuve rectangulaire qui contient la solution à étudier (cf. figure 1, page ci-contre).

Les valeurs d'absorbance sont obtenues en mesurant dans un premier temps l'intensité reçue par le récepteur photographique du téléphone portable (échelle de 0 à 255 pour les trois couleurs : le rouge, le vert et le bleu). Ces valeurs sont obtenues à l'aide de l'application gratuite *ColorMeterFree* (version 1.0.3) sur un téléphone portable fonctionnant sous Android. Le téléphone portable est positionné face à la cuve de telle sorte que l'appareil photographique visualise au centre de l'écran le liquide contenu dans la cuve.

L'absorbance de la solution est calculée en utilisant la formule :

$$A = -\log(I_{\text{RGB}}/I_0).$$

Avec I_{RGB} le niveau de rouge, bleu ou vert donné par l'application (valeur comprise entre 0 et 255) et I_0 cette même valeur pour le blanc (cuve remplie d'eau distillée).

Cela signifie ainsi que le capteur RGB du téléphone portable est bien sensible à l'intensité lumineuse (et non pas au carré ou au log de celle-ci). Le capteur fonctionne ainsi de manière analogue à celui d'un spectrophotomètre.

Dans le cadre de cette étude, on mesure le niveau de vert, car il correspond au maximum d'absorbance du diiode. Le choix des concentrations de travail est déterminé en amont en remplissant la cuve de plusieurs solutions de diiode de concentration connue. Le tracé du graphe de l'absorbance calculée, en fonction de la concentration des solutions de diiode, confirme la relation de proportionnalité qui existe entre l'absorbance ainsi calculée et la concentration en diiode.

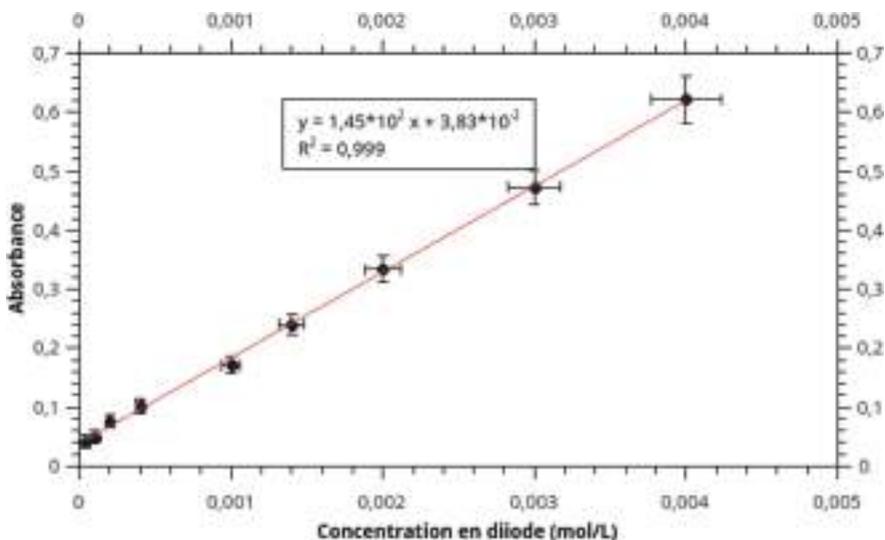


Figure 2 - Évolution de l'absorbance calculée en fonction de la concentration en diiode – étalonnage du capteur.

Dans le domaine de concentration $4,0 \times 10^{-5}$ à $4,0 \times 10^{-3}$ mol \cdot L $^{-1}$ en diiode $I_2(\text{aq})$, on trouve une relation de proportionnalité entre la concentration en diiode et l'absorbance calculée. Cela confirme bien l'analogie du téléphone portable avec le capteur du spectrophotomètre.

2. MISE EN PLACE DE L'ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE

Le principe de l'activité est de déterminer l'influence de différents paramètres sur

la cinétique de la réaction de formation du diiode par oxydation des ions iodure, due à la présence d'eau oxygénée. Le groupe classe est séparé en plusieurs trinômes dont chacun doit étudier l'évolution d'un paramètre parmi :

- ◆ l'influence de la concentration en ions iodure de potassium ;
- ◆ l'influence de la concentration en eau oxygénée ;
- ◆ l'influence de la température.

Les élèves préparent plusieurs solutions et suivent l'évolution de l'absorbance en fonction du temps.

Protocole

Dans un bécher, ajouter 20,0 mL d'acide sulfurique à $1,0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (si le milieu n'est pas acide, les ions iodure catalysent seulement la dismutation de l'eau oxygénée), ajouter ensuite un volume V_1 de solution d'iodure de potassium à $1,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ et un volume V_2 d'eau distillée. Agiter le tout, ajouter ensuite rapidement un volume V_3 d'eau oxygénée à $1,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ tout en déclenchant un chronomètre. Vider rapidement le contenu du bécher dans la cuve et commencer le relevé du niveau de vert en fonction du temps durant une petite dizaine de minutes.

Les élèves reportent au fur et à mesure manuellement les valeurs lues sur leur téléphone portable dans un logiciel de traitement de données expérimentales comme *Regressi* (dans le cadre de cet article, le logiciel *QtiPlot* (version 0.9.8.9) a été utilisé pour représenter les différentes courbes). À partir des niveaux de vert mesurés, on remonte à l'absorbance de la solution par la formule $A = -\log(I_{\text{R}_{\text{GB}}}/I_0)$ (on aura fait le blanc au préalable). Les différentes courbes sont superposées. Les courbes obtenues permettent de modéliser la cinétique de la réaction sous forme exponentielle (cinétique d'ordre 1). Les élèves peuvent alors retrouver l'absorbance maximale et le temps de demi-réaction.

3. RÉSULTATS

Une fois l'absorbance calculée, on procède au tracé de l'absorbance en fonction du temps. On fait l'hypothèse que la transformation observée suit une loi cinétique de premier ordre. On peut ainsi modéliser l'évolution de l'absorbance par un modèle exponentiel de premier ordre. On relève alors la valeur maximale ainsi que le temps de demi-réaction.

On peut également compléter l'étude par une estimation des incertitudes, en prenant en compte que le niveau mesuré de vert est connu à ± 1 sur les deux cent cinquante-six valeurs possibles (affichage instantané de la valeur parfois peu lisible, et capteur numérique peu précis). À partir de là, on peut estimer l'incertitude sur les différents paramètres de modélisation.

Expériences	Volume			Température des solutions (°C)
	Solution KI x_1 (mL)	Volume eau x_2 (mL)	Solution eau oxygénée x_3 (mL)	
<i>Groupe 1 - Influence de la concentration en ions iodures</i>				
1	10	5	5	27
2	12	3	5	27
3	15	0	5	27
<i>Groupe 2 - Influence de la concentration en eau oxygénée</i>				
1	10	8	2	27
2	10	5	5	27
<i>Groupe 3 - Influence de la température</i>				
1	10	5	5	27
2	10	5	5	42
3	10	5	5	62

Tableau 1 - Conditions expérimentales testées par les élèves.

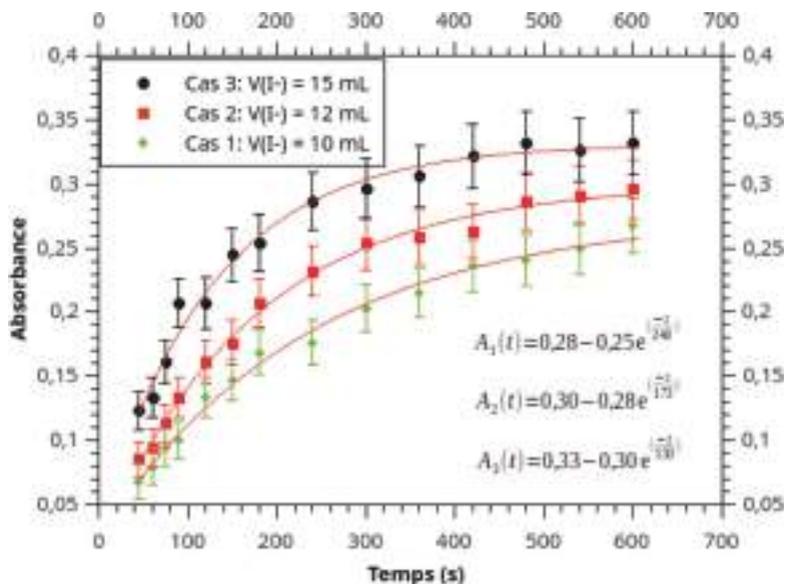


Figure 3 - Variation de l'absorbance de la solution au cours du temps en fonction de la concentration en ions iodure.

Chaque groupe a pu étudier des conditions opératoires différentes présentées dans le tableau 1 (cf. page ci-contre). Les résultats suivants sont extraits de mesures réalisées par des élèves de terminale S du Lycée Léon-Gontran Damas (Remire-Montjoly) dans le cadre d'un projet Cordées de la réussite.

3.1. Groupe 1 - Variation de la concentration en ions iodure

À travers la modélisation, les élèves peuvent observer que dans un même intervalle de temps, les solutions contenant une concentration plus importante en ions iodure atteignent des absorbances maximales plus importantes (de 0,28 à 0,30 puis 0,33). Dès lors, la modélisation permet d'engager une discussion sur le réactif limitant de cette réaction, qui sont ici les ions iodure. Augmenter la concentration en ions iodure permet d'augmenter l'absorbance maximum et par extension la concentration en diiode formé. Les élèves sont amenés à remarquer que le temps de demi-réaction diminue avec la concentration. L'observation des temps de demi-réaction permet d'affirmer qu'augmenter la concentration en ions iodure permet d'accélérer la réaction (cf. figure 3, page ci-contre).

3.2. Groupe 2 - Variation de la concentration en eau oxygénée.

Les élèves peuvent observer que dans un même intervalle de temps, la solution contenant une concentration plus importante en eau oxygénée atteint un temps de demi-réaction plus faible (de 355 s à 162 s). Dès lors, on peut affirmer qu'augmenter la concentration en eau oxygénée dans le milieu réactionnel permet d'augmenter la vitesse de formation du diiode. Ainsi, sans changer la concentration finale en diiode, le réactif en excès a aussi une influence sur la cinétique de la réaction (cf. figure 4, page ci-après).

3.3. Groupe 3 - Variation de la température de la solution.

Dans le dernier groupe, les élèves ont cette fois-ci fait varier la température du milieu réactionnel. Pour cela, le mélange d'iodure de potassium, d'eau et d'acide sulfurique est laissé quelques minutes dans un bain thermostaté avant d'ajouter l'eau oxygénée. Les élèves sont amenés à observer que le passage d'une température à une température plus élevée permet de diminuer grandement le temps de demi-réaction (passant de 164 s à 27 °C à 98 s à 42 °C puis 80 s à 62 °C). Ainsi, même si la concentration des différents réactifs est inchangée, une augmentation de la température du milieu réactionnel entraîne une hausse de la vitesse de la transformation (cf. figure 5, page ci-après).

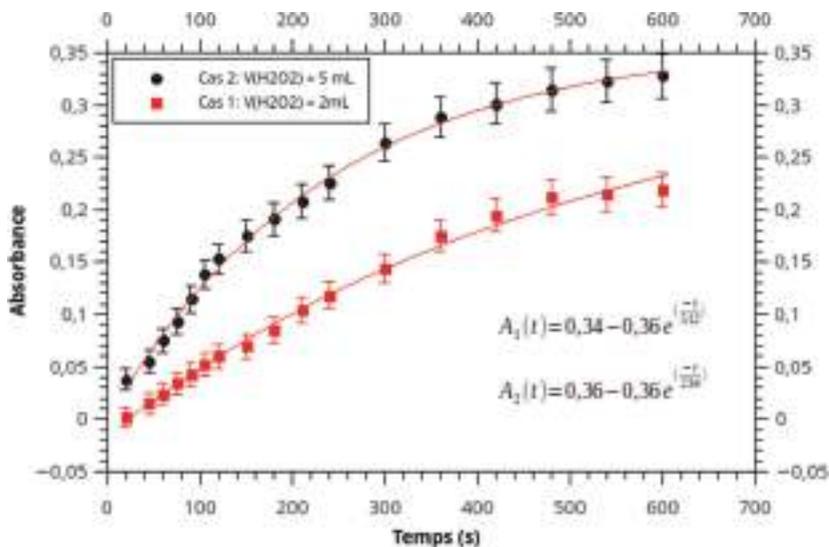


Figure 4 - Variation de l'absorbance de la solution au cours du temps en fonction de la concentration en eau oxygénée.

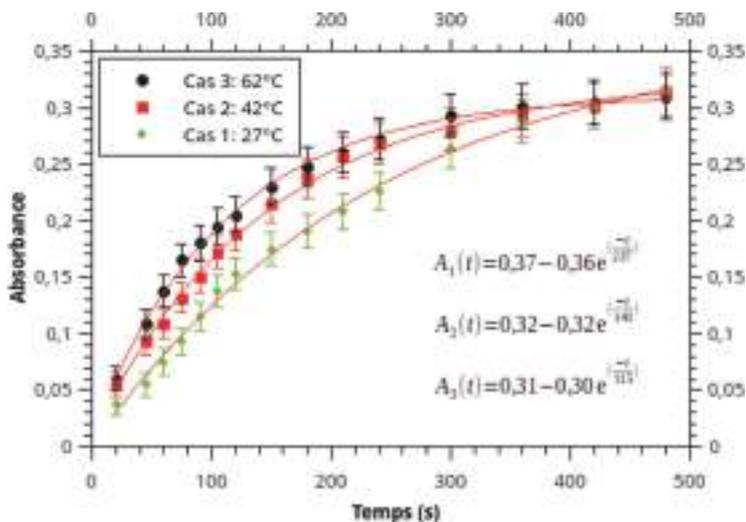


Figure 5 - Variation de l'absorbance de la solution au cours du temps en fonction de la température du milieu réactionnel.

4. DISCUSSION

Les élèves ont pu observer l'influence des différents paramètres qui influent sur la vitesse d'une réaction. Ils ont été amenés à conjecturer que l'évolution de la concentration de certaines espèces chimiques, ainsi que la température permet de faire varier le temps de demi-réaction $t_{1/2}$.

Par ailleurs, l'utilisation du téléphone portable permet d'ouvrir la discussion sur ce que représente physiquement l'absorbance. On peut expliquer de manière très visuelle que l'absorbance est un rapport d'intensité lumineuse transmise au capteur du téléphone portable sur une intensité lumineuse transmise de référence. Le suivi de l'évolution du niveau de vert observé en direct sur le téléphone de l'élève est lié visuellement à l'évolution de la teinte de la solution dans la cuve. L'élève prend alors conscience du lien entre I_{RGB} et la coloration de la cuve, elle-même reliée à la concentration de l'espèce qui absorbe la lumière incidente.

L'élève est amené à se rendre compte que l'absorbance d'une espèce, qui représente son aptitude à absorber une radiation lumineuse, doit augmenter et non diminuer lorsque la concentration en espèce augmente. On introduit alors la formule de l'absorbance en fonction de I_{RGB} et I_0 .

L'utilisation de téléphone portable comme capteur permet aussi d'amener à une discussion critique sur la précision de la mesure d'absorbance (limitée par l'échantillonnage du niveau de vert) et la reproductibilité des résultats (qualité des capteurs photographiques variables et algorithmes de numérisation différents d'un appareil à l'autre). Une discussion sur les incertitudes peut être menée pour expliciter la pertinence de l'emploi du téléphone portable pour une étude quantitative des différents paramètres sur la cinétique d'une réaction, mais que l'intérêt de réaliser ces mesures avec du matériel spécialisé permet d'obtenir une plus grande précision sur les résultats.

CONCLUSION

Cette activité expérimentale permet de poursuivre deux objectifs : expliciter au mieux la notion d'absorbance et pouvoir observer quantitativement l'influence de plusieurs paramètres sur la cinétique d'une réaction chimique.

Les élèves ont pu, à travers l'emploi de leur téléphone, prendre conscience qu'ils possèdent avec eux un outil polyvalent qui peut être exploité dans le cadre d'activités expérimentales à visées scientifiques. Son utilisation a également suscité chez les élèves davantage de curiosité et d'implication due à une approche plus familière de l'outil de mesure.

Enfin, la méthode d'obtention de l'absorption à l'aide d'un téléphone portable

présentée dans cet article peut être étendue à d'autres applications comme la mise en évidence de la loi de Beer-Lambert en classe de première spécialité.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier particulièrement Nathan Wybo et Thibaut Balois pour leurs relectures et leurs conseils avisés sur la rédaction de cet article. Je tiens également à remercier Joan Callejon pour sa relecture orthographique.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] N. Soligny, «Travaux pratiques (TP) en Première S (option sciences expérimentales) : vérification de la loi de Beer-Lambert sans spectrophotomètre», *Bull. Un. Phys.*, vol. 88, n° 765 (1), p. 1013-1020, juin 1994.
- [2] D. L. Williams, T.J. Flaherty, C. L. Jupe., S.A. Coleman, K.A. Marquez and J.J.T. Stanton, "Beyond λ [lambda]max: Transforming Visible Spectra into 24-Bit Color Values", *Journal of Chemical Education*, vol. 84 (11), p. 1873, 2007.
- [3] T. S. Kuntzleman and E. C. Jacobson, "Teaching Beer's Law and Absorption Spectrophotometry with a Smart Phone: A Substantially Simplified Protocol", *Journal of Chemical Education*, vol. 93 (7), p. 1249, 2016.
- [4] M. Montangero, "Determining the Amount of Copper(II) Ions in a Solution Using a Smartphone", *Journal of Chemical Education*, 92(10), p. 1759, 2015.
- [5] E. P. Moraes, M. R. Confessor and L. H. S. Gasparotto, "Integrating Mobile Phones into Science Teaching To Help Students Develop a Procedure To Evaluate the Corrosion Rate of Iron in Simulated Seawater", *Journal of Chemical Education*, 92(10), 1696, 2015.
- [6] A. Gilles, «Études cinétiques suivies par spectrophotométrie», *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 97, n° 856, p. 1167-1175, juillet-août-septembre 2003.



Arthur SAINTIER

Enseignant

Lycée Léon-Gontran Damas

Remire-Montjoly (Guyane)

POP chimie

par **Marta SEGURA** et **Josep COROMINAS**

Col·legi de doctors i llicenciats de Catalunya - Espagne

mariecurie98@gmail.com

jcoromi6@xtec.cat

CET ARTICLE présente onze manipulations simples permettant d'expliquer certaines notions fondamentales de la chimie, mais en employant des produits que l'on trouve soit à la maison soit au supermarché. Les expériences ont été testées par des participants au congrès de l'Union des professeurs de physique et de chimie à Bordeaux en octobre 2018, lors d'un atelier expérimental. Elles abordent des domaines très variés : forces intermoléculaires, solutions tampons, synthèse d'un polymère, émulsions, réaction oscillante.

INTRODUCTION

À l'exception de la réaction de combustion de la vapeur d'acétone, qui est à réaliser avec précaution sous une hotte par l'enseignant, les autres expériences ne présentent pas de risques particuliers. Outre l'intérêt pour l'enseignement de la chimie signalé dans le résumé, quelques expériences ont un aspect esthétique ou spectaculaire (expériences 3, 6, 10 et 11), ce qui peut être exploité avec profit lors d'une journée « portes ouvertes » ou dans le cadre de la fête de la science.

Cet article se décompose ainsi :

- ◆ Mettre en évidence des forces entre les molécules.
- ◆ Une polymérisation pour isoler : le polyuréthane.
- ◆ Transformation du whisky en eau et préparation d'un pastis transparent.
- ◆ «Magnesia-Cinfa» (ou tout autre anti-acide en suspension aqueuse) : un sel insoluble contre l'acidité gastrique.
- ◆ L'aspirine effervescente : une solution tampon dans la trousse à pharmacie.
- ◆ Art avec la chromatographie et les vernis à ongles.
- ◆ Crèmes solaires et protection contre les ultraviolets (UV).
- ◆ Nettoyage à l'oxygène.
- ◆ Les émulsions.
- ◆ De l'encre comme au Moyen Âge - Art avec l'encre de chine.
- ◆ Une réaction horloge avec la vitamine C.

1. METTRE EN ÉVIDENCE DES FORCES ENTRE LES MOLÉCULES

Les forces intermoléculaires sont expliquées, en général, par des polarités entre des molécules. C'est le cas des interactions très faibles comme les forces de London (dipôles induits) qui font partie des forces de Van der Waals, et la liaison hydrogène.

Matériel

Ballons de baudruche de couleurs différentes ♦ Plusieurs liquides : eau, éthanol, acétone, essence... ♦ Eau très chaude (plaque chauffante) ♦ Bêchers de 600 mL ou plus.

Comment procéder ?

- ♦ Faire chauffer de l'eau (environ 80 °C) dans un bécher.
- ♦ Dans chaque ballon, mettre environ 2 mL d'un des liquides. Bien fermer le ballon.
- ♦ Placer les ballons dans l'eau chaude. Ils vont gonfler plus ou moins fort selon la facilité de vaporisation.
- ♦ Interpréter les résultats selon la faiblesse ou non des forces intermoléculaires.

Une démonstration de trois propriétés de l'acétone

Matériel

Acétone ♦ Tube en PVC, d'environ 2 m de longueur et de diamètre 2 cm.

Le tube est enroulé en hélice d'axe vertical et maintenu dans cette position par une armature comme indiqué sur la figure 1. Les indications AV-DC signifient Acétone-Volatile-Densité-Combustion.

Comment procéder ?

- ♦ Au bout du tube, en partie basse, on place une petite bougie allumée. On verse 1 mL ou 2 mL d'acétone dans la partie la plus haute du tube et on attend quelques secondes.
- ♦ Une flamme bleue parcourt le tube. L'acétone se vaporise d'abord, puis la vapeur, plus dense, descend par l'intérieur du tube et enfin la flamme met le feu à la vapeur mélangée avec l'air dans le tube.

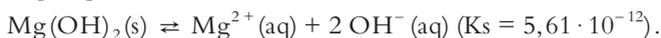


Figure 1 - Montage pour la démonstration des propriétés de l'acétone.

microparticules de l'anéthol et forme une émulsion avec des particules beaucoup plus petites que celles qui se forment en ajoutant de l'eau froide.

4. « MAGNESIA-CINFA » (OU TOUT AUTRE ANTI-ACIDE EN SUSPENSION AQUEUSE) : UN SEL INSOLUBLE CONTRE L'ACIDITÉ GASTRIQUE

C'est un lait de magnésie, une émulsion d'hydroxyde de magnésium, $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Ce dernier est presque insoluble :



Matériel

Magnesia-Cinfa, suspension de 100 mg/mL ♦ Bécher 600 mL ♦ Agitateur magnétique ♦ Indicateur universel en solution ♦ Vinaigre ♦ HCl 35 %.

Comment procéder ?

- ♦ Mettre 200 mL de la suspension dans un bécher de 600 mL.
- ♦ Ajouter 100 mL d'eau.
- ♦ Déposer ce bécher sur l'agitateur magnétique en marche et ajouter quelques gouttes de la solution d'indicateur universel. Jusqu'à avoir une couleur bleue, à cause des ions OH^{-} .
- ♦ Ajouter ensuite un petit volume de vinaigre. On doit voir l'apparition des couleurs suivantes : rouge, orange, vert et finalement bleu.
- ♦ On peut répéter une fois le même phénomène, en ajoutant de nouveau du vinaigre.
- ♦ Pour avoir une couleur rouge définitive, il faut ajouter HCl, un acide fort.

L'acide acétique du vinaigre est un acide faible ($K_a = 1,7 \cdot 10^{-5}$). Le contenu acide est entre 4 % et 6 % en masse. L'acide acétique neutralise les quelques ions OH^{-} . Mais l'équilibre se rétablit ensuite, à cause de la grande quantité de $\text{Mg}(\text{OH})_2$.

5. L'ASPIRINE EFFERVESCENTE : UNE SOLUTION TAMPON DANS LA TROUSSE À PHARMACIE

Toutes les aspirines ont le même principe actif, l'acide acétylsalicylique, mais les excipients changent selon les marques. Grâce à une expérience simple, nous allons voir comment l'aspirine est une solution tampon effervescente.

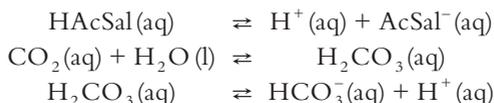
Une solution « tampon » est un système composé d'un acide faible et sa base conjuguée qui maintient approximativement le même pH malgré l'addition de petites quantités d'un acide ou d'une base.



Il y a une grande quantité de HA pour faire des ions H^+ (aq), s'ils disparaissent en ajoutant une base

Il y a une grande quantité de A^- pour réagir avec les ions H^+ (aq) qu'on peut ajouter

Le comprimé apporte un acide faible (l'acide acétylsalicylique), un deuxième acide faible, H_2CO_3 , un anion basique, HCO_3^- en plus de l'anion acétylsalicylate. On a alors une haute concentration d'acide faible, du dioxyde de carbone et une haute concentration de ses anions.



Matériel

Des aspirines effervescentes en comprimés de Bayer® ou de Sedergine®, de UPSA® ou de Aspirin Bayer Complex®. Ceux de Sedergine® ou UPSA® sont recommandées ♦ Bêcher de 250 cm³ ♦ Un gant en latex ♦ Acide chlorhydrique 1 mol/l en flacon compte-gouttes ♦ Hydroxyde de sodium 1 mol/l au compte-gouttes ♦ Acide chlorhydrique concentré (35 %) ♦ Indicateur universel de pH en solution.

Comment procéder ?

- ♦ Mettre dans un bêcher de 250 mL, environ 200 mL d'eau. Ajouter trois gouttes de solution d'indicateur universel et un demi-comprimé d'aspirine. Noter la marque.
- ♦ Mettre, tout de suite un gant de latex pour boucher le bêcher. Le gant va recueillir le CO_2 , ce qui va nous donner une idée de l'excès de CO_2 qui se forme. L'indicateur va prendre une couleur correspondant à un pH d'environ 5,5.
- ♦ Enlever le gant et ajouter trois gouttes d'acide chlorhydrique 1 mol/L. La couleur de l'indicateur ne va pas changer.
- ♦ Ajouter après, six gouttes de NaOH 1 mol/L (les trois premières vont neutraliser l'acide chlorhydrique). La couleur de l'indicateur ne change pas non plus.
- ♦ Si on ajoute maintenant une ou deux gouttes de HCl concentré (35 %), la couleur change immédiatement. L'ajout d'ions H^+ est dans ce cas trop important pour que le tampon puisse encore agir.

6. ART AVEC LA CHROMATOGRAPHIE ET LES VERNIS À ONGLES

Un mélange de trois colorants alimentaires est entraîné par un courant de phase mobile (eau, dans ce cas) au contact d'une phase stationnaire (papier). En disposant artistiquement les colorants, ou des marques faites avec des stylos-feutres on peut obtenir de beaux dessins.

Matériel

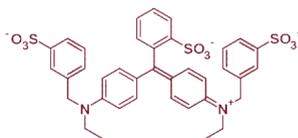
Colorants alimentaires ♦ Stylos-feutres ♦ Papier de cuisine ou filtre ♦ Eau ♦ Compte-gouttes.

Comment procéder ?

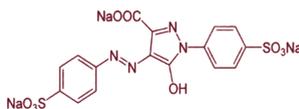
- ♦ Déposer une goutte du colorant bleu au centre d'un morceau de papier cuisine ou filtre. Attendre qu'elle sèche. Ensuite, déposer dessus une goutte du colorant jaune. Une fois sèche, déposer une goutte du colorant rouge.
- ♦ Ajouter à présent quelques gouttes d'eau à l'endroit où les colorants ont été déposés. Les colorants se séparent, soit selon la polarité de la molécule, soit par forces entre la molécule et le papier.

Les colorants employés : McCormick

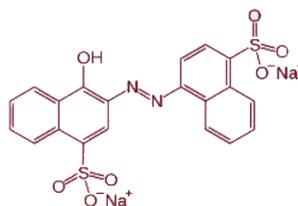
- ♦ Bleu : E133 bleu brillant.
Colorant synthétique, sa DJA⁽¹⁾ est de 6 mg/kg mc⁽²⁾.
- ♦ Jaune : E102 tartrazine.
Colorant azoïque de synthèse, sa DJA est de 7,5 mg/kg mc.
- ♦ Rouge : E122 azorubine.
Colorant de synthèse, sa DJA est de 4 mg/kg mc.



Bleu brillant (Mr = 792,8)



Tartrazine (Mr = 534,4)



Azorubine (Mr = 502,4)

Une version artistique

Utiliser à présent des stylos-feutres. Sur un morceau de papier filtre, dessiner une figure à l'aide d'un stylo-feutre. L'encre de ce stylo-feutre doit être constituée d'un

(1) DJA : dose journalière admissible.

(2) mc : masse corporelle.

moins deux encres de couleurs différentes. Un verre haut et large sert pour que l'une des extrémités du papier effleure la surface de l'eau. Laissez remonter l'eau par capillarité dans le papier (cf. figure 3A).

Une autre possibilité : vous pouvez dessiner au centre du papier filtre des points ou petits traits avec des stylos-feutres de différentes couleurs. Déposer le papier sur une surface plate et ajouter des gouttes d'eau au centre du papier.

A



B



Figure 3

Décorer avec des vernis à ongles (Art Ebru)

Matériel

Vernis à ongles (plusieurs couleurs) ♦ Assiette large ♦ Cure-dents ♦ Bocaux en verre, gobelets en plastique, moules à petits gâteaux...

Comment procéder ?

- ♦ Mettre une couche d'eau dans l'assiette.
- ♦ Déposer une goutte de vernis à ongles sur l'eau. Le vernis va s'étirer en évaporant le solvant (acétate d'éthyle ou butyle) et en réduisant la tension superficielle de l'eau. Il y reste une fine couche de couleur flottante.
- ♦ Sur cette couche et au centre, déposer une



Figure 4

goutte d'un autre vernis de couleur différente. Le vernis s'étend également en laissant deux cercles de couleurs différentes.

- ◆ Des gouttes d'autres vernis de couleurs différentes peuvent être déposées.
- ◆ Avec un cure-dent, il est possible d'étirer les couches légèrement par les bords, formant des dessins.
- ◆ Une fois que les couches flottent au-dessus de l'eau, passer le verre sur la couche de vernis ou immerger les moules à cupcakes. Soulevez lentement. Il est décoré.

Les vernis sont généralement formés par de la nitrocellulose (un polymère), dissous dans un solvant tel que l'acétate d'éthyle ou de butyle ; des plastifiants tels que le phtalate de dibutyle et des pigments inorganiques sont ajoutés. La nitrocellulose est insoluble dans l'eau. C'est ce qui permet à une couche insoluble de rester sur l'eau lorsque le solvant est évaporé.

7. CRÈMES SOLAIRES ET PROTECTION CONTRE LES ULTRAVIOLETS (UV)

Au début du xx^e siècle, la mode était d'avoir la peau blanche. C'est vers 1920 que Coco Chanel a lancé la mode de prendre des bains de soleil. Mais s'exposer aux rayons UV devient dangereux si les temps sont trop longs. Les crèmes solaires aident à empêcher l'effet nocif des rayons UV. Le SPF (*Sun protection factor*) indique la quantité de radiation UV nécessaire pour causer une brûlure de peau en présence de la crème solaire, exprimée en multiple de la quantité requise pour causer une brûlure sans la crème. Un SPF de 30 pour un produit signifie donc qu'il faut trente fois plus de radiation UV avec ce produit pour avoir un coup de soleil. Plusieurs huiles ont le pouvoir d'absorber les rayons UV (mais pas dans toutes les longueurs d'onde des UV)

Rayons UV	λ/nm	E/eV
UVA	400 - 315	3,10 - 3,94
UVB	315 - 280	3,94 - 4,43
UVC	280 - 100	4,43 - 12,40

Tableau 1

7.1. Une crème solaire faite maison

Matériel

Béchers ◆ 50 mL d'huile de coco (55 g) ◆ 30 g de lanoline ◆ 10 g d'oxyde de zinc (ZnO) ◆ 90 mL d'eau, ou d'une infusion d'herbes aromatiques ou de l'eau de rose.

Comment procéder ?

- ◆ Fondre la lanoline et l'huile au bain-marie en ajoutant peu à peu l'oxyde de zinc et l'eau ou l'infusion chaude.

7.2. Quelle est l'efficacité de cette crème solaire ?

Matériel

Lames de verre pour microscope ♦ Crèmes solaires ♦ Détecteurs des UV (*UV detecting beads*, chez Educational Innovations) ♦ Soleil ou lampe UV ♦ Chronomètre.

Comment procéder ?

- ♦ Pour chaque crème solaire, étendre une fine couche sur la lame en verre. Placer en dessous des détecteurs et mettre le tout au soleil ou sous une lampe UV. Mesurer le temps de changement de couleur des détecteurs.

Comment la couleur des détecteurs change-t-elle ?

Ces détecteurs (*UV detecting beads*) sont des pigments ultraviolets qui absorbent le rayonnement entre 400 nm et 300 nm.

Les molécules de pigment ont deux systèmes conjugués dans deux plans perpendiculaires les uns aux autres unis par un atome de carbone. Dans cette position, il n'y a aucune résonance dans la molécule. Et elle n'absorbe pas le rayonnement visible, donc elle reste de couleur blanche.

Quand le rayonnement UV excite l'atome de carbone central, les deux systèmes forment un conjugué dans un unique plan, qui absorbe certaines longueurs d'onde de la lumière visible. Plus la chaîne conjuguée est longue, plus la longueur d'onde absorbée est grande.

Les différentes couleurs qui sont obtenues avec des détecteurs dépendent des longueurs des chaînes combinées. Quand cesse le rayonnement UV, les molécules retournent à leur état initial, car la chaleur de l'environnement a fourni assez d'énergie.

Si les détecteurs colorés sont à basse température (congélateur ou azote liquide), la couleur reste, bien qu'il n'y ait aucun rayonnement UV, car il n'y a pas assez de chaleur environnementale pour être absorbé.

8. NETTOYAGE À L'OXYGÈNE

L'eau de Javel a été et est encore employée de nos jours pour enlever les taches de couleurs des tissus. Mais on trouve des détergents à «l'oxygène actif». Les produits qui indiquent la présence d'oxygène «actif» contiennent de l'eau oxygénée ; le perborate de sodium (NaBO_3), la forme hydratée $\text{NaBO}_2(\text{OH})_2$ et le percarbonate de sodium ($2\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}_2$) se trouvent dans les lessives «vertes». Le perborate et le percarbonate, dans l'eau chaude, forment l'eau oxygénée (H_2O_2). Ils sont encore plus efficaces si on laisse les tissus tachés tremper dans l'eau chaude.

On peut identifier le pouvoir oxydant avec le permanganate de potassium, (KMnO_4).

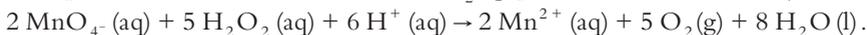
Matériel

Tubes à essais ♦ Spatule ♦ Compte-gouttes ♦ Eau oxygénée (3 %) ♦ Perborate de sodium ♦ Neutrex® solide (produit blanchissant pour le linge distribué par Henkel) ou tout autre agent blanchissant pour linge ♦ KMnO_4 0,1 M acidifié avec de l'acide sulfurique, 1 M

Comment procéder ?

- ♦ Préparer trois tubes avec 1 mL de KMnO_4 chacun.
- ♦ Tube 1 : ajouter cinq gouttes H_2O_2 (3 %).
- ♦ Tube 2 : ajouter une pointe spatule de perborate de sodium.
- ♦ Tube 3 : ajouter une pointe spatule de Neutrex®.

Le perborate dans l'eau chaude, forme H_2O_2 qui va réagir avec KMnO_4 :



On doit voir un changement de couleur.

9. LES ÉMULSIONS

Une émulsion est un mélange de deux substances liquides non miscibles. L'une des substances sera donc dispersée dans la seconde substance sous forme de petites gouttelettes. Le mélange reste stable grâce à un troisième ingrédient appelé émulsifiant. En pharmacie, une crème est une préparation semi-solide destinée à être administrée en usages topiques. Il y a deux sortes d'émulsions :

- ♦ Émulsion 1 (H/E ou O/W pour *oil in water*) est composée d'une phase huileuse dispersée dans une phase aqueuse (par exemple : la crème Nivéa®).
- ♦ Émulsion 2 (E/H ou W/O pour *water in oil*) est composée d'une phase aqueuse dispersée dans une phase huileuse. Une émulsion E/H est plus grasse au toucher (par exemple : la sauce mayonnaise, les crèmes solaires).

Pour les reconnaître, on utilise des colorants qui sont solubles dans l'eau ou dans les lipides.

Matériel

Verres en plastique ♦ Spatules en bois ou petits bâtonnets ♦ Colorant soluble dans les lipides (Soudan III, marque déposée de BASF) ♦ Colorant soluble dans l'eau (bleu de méthylène) ♦ Des émulsions : crèmes cosmétiques, sauces, beurre, lait...

Comment procéder ?

- ♦ Mettre une pointe de spatule de l'émulsion dans chacun de deux verres.

- ◆ Ajouter une pointe spatule d'un des colorants à un verre et une pointe spatule de l'autre colorant à l'autre verre.
- ◆ Bien remuer à l'aide d'un petit bâtonnet.
- ◆ Observer laquelle des deux émulsions prend une couleur uniforme.



Figure 5

L'émulsion est devenue bleue avec le bleu de méthylène et n'a pas changé de couleur avec le sudan III. S'agit-il d'une émulsion H/E ou E/H ?

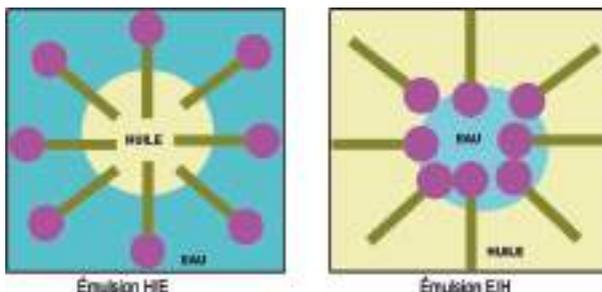
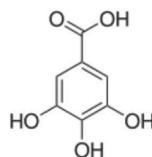


Figure 6

10. DE L'ENCRE COMME AU MOYEN ÂGE - ART AVEC L'ENCRE DE CHINE

Au Moyen Âge, l'encre était faite avec l'acide gallique et des sels de fer. L'acide gallique se trouve dans l'écorce des chênes, dans les feuilles de thé (4,63 mg/100 ml), les clous de girofle et d'autres végétaux. Dans cette manipulation, on va utiliser seulement des produits que l'on trouve à la maison : une éponge métallique en fer et du thé noir ou vert.



Acide gallique

Matériel

Thé noir ♦ Éponge en fer (appelée aussi « laine d'acier ») ♦ Bêcher ♦ Plaque chauffante.

Comment procéder ?

- ♦ Préparer une infusion de thé. Environ 50 mL d'eau avec un sachet de thé.
- ♦ Pendant que l'infusion est chaude, ajouter un morceau pas trop grand de « laine d'acier ». Continuer le chauffage jusqu'à avoir une couleur noire du liquide.
- ♦ Enlever le morceau de fer. Laisser refroidir un peu.
- ♦ Essayer l'encre sur un papier blanc. Pour écrire, on peut employer un calame taillé en pointe d'un roseau sec.
- ♦ Avec de la gomme arabique, l'encre s'épaissit et il est plus facile d'écrire. Avec le temps, les ions Fe^{2+} s'oxydent et l'encre devient encore plus noire. Sur les figures 7A et 7B les spectres d'absorption (en ordonnées l'absorbance et en abscisses les longueurs d'onde en nm).

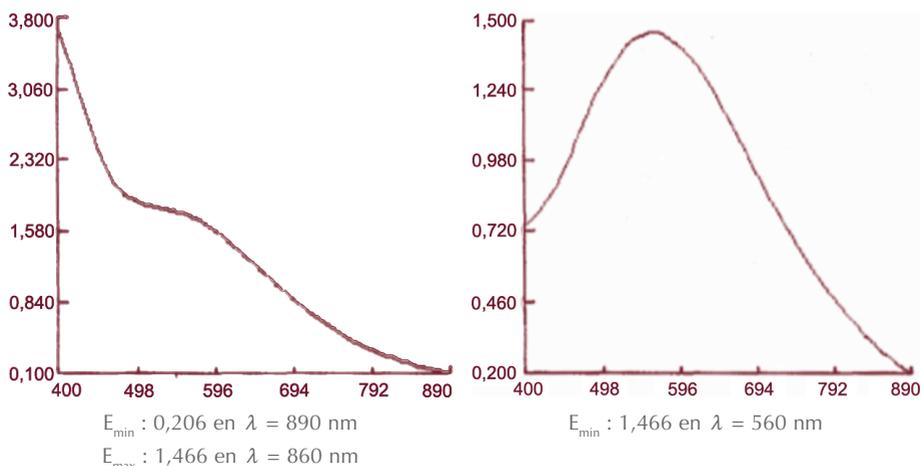


Figure 7 - Spectre de l'encre de fer - Spectre de l'acide gallique avec des ions Fe^{2+} .

Art avec l'encre de chine (Art Ebru)

Matériel

Assiette large ♦ Encre de chine (différentes couleurs) ♦ Cure-dents ♦ Cotons-tiges ♦ Papier à dessin.

Comment procéder ?

- ♦ Mettre de l'eau dans l'assiette. Mouillez un coton-tige avec de l'encre et touchez la surface de l'eau. La tache s'étend.

- ◆ Avec un autre coton-tige, mouiller d'une autre couleur et déposer une goutte d'eau. Faire la même chose avec d'autres couleurs.
- ◆ Un cure-dent vous permet de créer des tourbillons et d'autres formes.
- ◆ Mettre un papier à dessin sur l'eau. Le dessin restera marqué sur le papier.
- ◆ Laisser sécher.

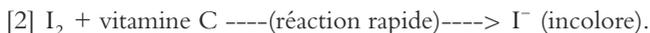
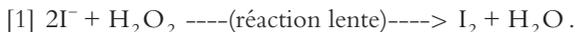


Figure 8 - Exemples de dessins.

L'encre de chine utilisée traditionnellement est fabriquée avec de la suie (combustion de certains bois ou huiles) émulsionnée dans l'eau et la gélatine. Les «encres de chine en couleur» sont une émulsion de pigments inorganiques avec un agent agglutinant.

11. UNE RÉACTION HORLOGE AVEC LA VITAMINE C

On mélange deux solutions incolores et au bout d'un certain temps, la couleur change et devient noire. Le changement soudain et parfois inattendu donne à ces réactions leurs charme et effet visuel. La plus connue des réactions oscillantes se fait entre l'iodate de potassium (un oxydant) et le bisulfite de sodium (un réducteur). Cette fois, la réaction se fait entre l'acide ascorbique (vitamine C) et le diiode.



Dans la réaction [1] les ions iodure réagissent avec l'eau oxygénée pour former le diiode, qui prend la couleur bleue avec l'amidon, MAIS... Dans la réaction [2] la vitamine C réagit immédiatement avec le diiode formé dans la réaction [1]. Le tout reste incolore tant qu'il y a présence d'ions iodure. C'est la vitamine C qui fait l'effet d'horloge, une fois qu'il n'y en a plus, l'ensemble devient bleu foncé, à cause de l'amidon. La solution *bétadine* sert de source pour le diiode.

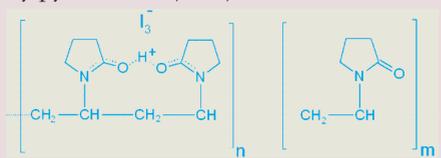
Matériel

Quatre béchers 100 mL ♦ Pipettes Pasteur ♦ Spatule ♦ Vitamine C ♦ Bétadine ♦ Eau oxygénée (3 %) ♦ Amidon.

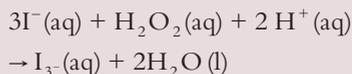
Comment procéder ?

- ♦ Préparer une solution avec 1,0 g de vitamine C dans 60 mL d'eau.
- ♦ Solution A : quinze gouttes de bétadine + douze gouttes (pipette Pasteur) de la solution de vitamine C + 30 mL d'eau du robinet
- ♦ Solution B : 30 mL d'eau oxygénée (3 %) + petite spatule d'amidon.
- ♦ Mélanger les solutions A et B, la couleur doit changer environ en deux minutes.
- ♦ Le temps change en changeant les concentrations de vitamine C (plus ou moins de volume de solution) et la température.

La bétadine c'est de la polyvidone iodée. C'est un complexe chimique soluble dans l'eau, composé d'iode et de polyvinylpyrrolidone (PVP).



L'équation de la réaction entre les ions I^- et l'eau oxygénée est :



Les ions $I_3^-(aq)$ et I_5^- s'insèrent dans la structure de l'amidon et lui confèrent une coloration bleue qui disparaît lorsqu'on chauffe la solution.

BIBLIOGRAPHIE ET NETOGRAPHIE

- ♦ Expérience 3 : Whisky transformé en eau : <http://youtu.be/J2fYBx1iZkc>
Pour le pastis : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Pastis>
- ♦ Expérience 6 : Chromatographie : https://fr.wikipedia.org/wiki/Colorant_alimentaire
Pour le vernis à ongles : https://www.youtube.com/watch?v=_MHefogA90
- ♦ Expérience 10 : De l'encre comme au Moyen Âge
Georg Schwedt, *Experimente mit Supermarktprodukten. Eine chemische Warenkunde*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim, 2003.

**Marta SEGURA***Professeure*

Col·legi de doctors i llicenciats
de Catalunya
Espagne

**Josep COROMINAS***Professeur*

Col·legi de doctors i llicenciats
de Catalunya
Espagne

Aéronautique et physique : la relation de Bernoulli

Comprendre le fonctionnement de l'anémomètre (partie 5)

par Nicolas CHEYMOL

Académie de Montpellier
nicolas.cheymol@ac-montpellier.fr

Dominique DUCOURANT

Académie de Montpellier
domi.ducourant@orange.fr

Jean-Jacques CALLIET

Académie de Montpellier
jean-jacques.calliet@ac-montpellier.fr

Temaeva GUES

Académie de Montpellier
temaeva.gues@ac-montpellier.fr

CET ARTICLE propose une étude détaillée du fonctionnement d'un anémomètre, instrument de pilotage permettant d'accéder à la vitesse de déplacement de l'avion par rapport à l'air. Cette étude permettra de tester expérimentalement la relation de Bernoulli.

INTRODUCTION

La physique des fluides a été introduite dans les nouveaux programmes de spécialité en physique-chimie, lors de la réforme du bac 2021.

En classe de première, c'est le fluide au repos qui est étudié⁽¹⁾ : « description d'un fluide au repos : échelles de description ; grandeurs macroscopiques de description d'un fluide au repos : masse volumique, pression, température ; modèle de comportement d'un gaz : loi de Mariotte ; action exercée par un fluide sur une surface : forces pressantes ; loi fondamentale de la statique des fluides ».

En classe de terminale^{(2),(3)}, c'est le fluide en mouvement qui est caracté-

(1) BOEN spécial n° 1 du 22 janvier 2019.

(2) BOEN spécial n° 8 du 25 juillet 2019.

(3) En classe de terminale, les fluides considérés sont incompressibles, l'air n'est évoqué que de façon qualitative pour l'effet Venturi. Or dans notre étude, le fluide considéré est un gaz : l'air. À la différence d'un liquide, dont la compressibilité est faible, la compressibilité est une propriété essentielle des gaz. Nous verrons néanmoins qu'il est possible de considérer l'écoulement de l'air comme étant incompressible si la vitesse de déplacement de l'aéronef est inférieure à environ 50 % de la vitesse du son.



Photo réalisée à l'aéroclub de l'Hérault.

Figure 1 - Tableau de bord d'un avion d'aéroclub (DA20).



Figure 2 - PFD (*Primary Flight Display*) d'un avion de ligne (Airbus A320). On aperçoit à gauche sur le PFD, la partie anémomètre avec une vitesse indiquée égale à environ 285 kt (ou nœud) et en dessous de l'anémomètre, l'indication du nombre de Mach (ici 0,780).

terisé : « modéliser l'écoulement d'un fluide : poussée d'Archimède, écoulement d'un fluide en régime permanent, débit volumique d'un fluide incompressible, relation de Bernoulli, effet Venturi ».

Dans cet article, on se propose de tester la relation de Bernoulli en étudiant le principe de fonctionnement d'un anémomètre (ou badin du nom de son inventeur en 1911). L'anémomètre est parmi les instruments de bord le plus important sur un avion, car il indique au pilote la vitesse de l'avion par rapport à l'air. La vitesse de l'avion par rapport à l'air est appelée vitesse vraie (ou *True Air Speed*, TAS en anglais)⁽⁴⁾. Cette information permet au pilote de respecter les conditions de vitesse lors des différentes phases de vol afin d'éviter une survitesse (risque de déformations permanentes de la structure) ou le risque de décrochage lié à une vitesse trop faible de l'avion.

L'anémomètre équipe ainsi tous les aéronefs aussi bien des avions monomoteurs d'aéroclub qu'un avion de ligne ou de chasse, les hélicoptères (cf. figures 1 et 2, page ci-contre)... et fonctionne dans tous les cas selon le même principe.

Après une description de l'anémomètre (cf. paragraphe 1.), il s'agit d'exploiter la relation de Bernoulli (cf. paragraphe 3.) pour expliquer le principe de fonctionnement de l'instrument (cf. paragraphe 2.) qui permet d'accéder à la vitesse de l'aéronef par rapport à l'air à partir d'une mesure de différence de pression. Dans un dernier paragraphe (4.), on réalise quelques expériences qualitatives pour mieux comprendre le fonctionnement de cet instrument et le rôle des pressions statique et totale. Enfin, nous vérifions expérimentalement la relation Bernoulli de deux façons différentes :

- ◆ en comparant la vitesse obtenue par cette relation et la vitesse lue sur l'anémomètre ;
- ◆ en traçant la courbe représentative de la fonction qui associe la vitesse lue sur l'anémomètre à la pression dynamique pour en déduire la masse volumique de l'air.

1. DESCRIPTION DE L'ANÉMOMÈTRE ET LECTURE⁽⁵⁾



1.1. La face avant de l'anémomètre

Une aiguille indique au pilote une vitesse appelée vitesse indiquée (*Indicated Air Speed*, IAS) sur un cadran gradué en nœud⁽⁶⁾ (knot de symbole kt) et/ou

- (4) En fait l'anémomètre donne une vitesse indiquée et non directement la vitesse réelle de déplacement de l'avion par rapport à la masse d'air. Nous verrons dans le paragraphe 1. qu'il existe une différence entre la valeur de la vitesse vraie et celle de la vitesse indiquée lue sur l'anémomètre.
- (5) Vous pouvez télécharger la vidéo à l'adresse suivante : <https://mediacenter.ac-montpellier.fr/videos/?video=MEDIA191225123646177>
Elle est disponible aussi sur le serveur de l'UdPPC.
- (6) 1 kt correspond à un mile nautique par heure ($1 \text{ kt} = 1,8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$).

en kilomètre par heure ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$) (cf. figure 3).

A



B



Figure 3 - Vue avant de deux anémomètres à aiguille. **A** Anémomètre d'un DA20 : le cadran est gradué en nœuds ; **B** Le cadran est gradué en nœuds et en kilomètre par heure.

Remarque : Cette vitesse indiquée sur l'anémomètre ne correspond pas à la vitesse réelle de l'avion par rapport à l'air appelée vitesse vraie (*True Air Speed, TAS*). Pourquoi ? Il existe en effet plusieurs sources d'erreurs dont il faut tenir compte pour corriger la vitesse indiquée et obtenir la vitesse vraie qui correspond à la vitesse réelle de l'avion par rapport à la masse d'air (cf. tableau 1, page ci-contre).

À titre d'illustration, sur la figure 4 ci-dessous, on vous laisse remarquer l'écart important (supérieur ici à 150 kt) entre l'IAS et la TAS lorsque l'avion vole à une altitude élevée (ici 28 300 pieds) avec une grande vitesse.



Figure 4 - À gauche : PFD (*Primary Flight display*), à droite : ND (*Navigation Display*) d'un Airbus A320. On remarque la présence de trois vitesses qui sont visibles sur ces deux écrans. Sur le PFD on peut lire la vitesse indiquée par l'anémomètre (ici 315 kt environ). Sur le ND, on retrouve la vitesse vraie (TAS) et la vitesse de l'avion par rapport au sol (*Ground Speed, GS*). La GS est la somme algébrique de la vitesse vraie et de la vitesse du vent (ici le vent vient du 163° et à une vitesse de 36 kt).

Vitesse considérée	Erreur et type de correction	Relation entre les différentes vitesses
Vitesse indiquée IAS (<i>Indicated Air Speed</i>)	C'est la vitesse lue sur le cadran de l'anémomètre.	IAS
Vitesse indiquée corrigée CIAS (<i>Corrected Indicated Air Speed</i>)	Vitesse IAS corrigée des erreurs liées à l'instrument (justesse, hystérésis...).	CIAS = IAS ± KI où KI est un facteur de correction pour un instrument considéré.
Vitesse conventionnelle CAS (<i>Calibrated Air Speed</i>)	Vitesse CIAS corrigée de l'erreur liée au positionnement des prises de pression statique et totale sur l'avion.	CAS = CIAS × Ka où Ka est un facteur de correction pour les prises de pression statique et totale.
Vitesse vraie TAS (<i>True Air Speed</i>)	L'anémomètre est étalonné pour une température, une pression et une masse volumique qui correspondent à l'atmosphère standard (niveau de la mer, 1013,25 hPa et 15 °C). Or l'atmosphère réelle diffère de ces conditions ce qui engendre des sources d'erreurs supplémentaires dues à la compressibilité de l'air et la variation de la masse volumique.	TAS = CAS × K où K est un facteur de correction de l'effet de la compressibilité et de la masse volumique du milieu ambiant

Tableau 1 - De la vitesse indiquée à la vitesse vraie de l'avion par rapport à l'air.

Le respect des plages de vitesses (utilisation en fonction de la configuration (volets de bord de fuite rentrés ou sortis) ou de la phase du vol) garantit la sécurité du vol, en établissant des marges que le pilote doit respecter. Un avion ne peut impunément voler :

- ◆ soit trop lentement sous peine de décrochage ;
- ◆ soit trop vite sous peine de déformations ou ruptures des matériaux.

C'est la raison pour laquelle on trouve sur le cadran d'un anémomètre d'avion différents arcs colorés (blanc, vert, jaune) et un trait rouge (cf. figure 3, page ci-contre) dont nous précisons la signification ci-dessous :

- ◆  arc vert : domaine de vol normal ;
- ◆  arc jaune : ne pas voler dans ce domaine en air turbulent ;
- ◆  trait rouge : VNE (*Velocity Never Exceed*), vitesse à ne jamais dépasser sous peine de déformation permanente de la structure ;
- ◆  arc blanc : évolutions volets sorties.

Q1 : En exploitant les informations figurant sur le cadran de l'anémomètre d'un DA20 (cf. figure 3A), compléter les cases du tableau (cf. figure 5) extrait du manuel de vol de cet appareil.

Marking	IAS			Explanation
	kts	mph	km/h	
White Arc		43-93	69-150	Operating range with extended flaps.
Green Arc		47-135	76-218	Normal operating range.
Yellow Arc		135-185	218-298	Maneuvers must be conducted with caution and only in smooth air.
Red ligne		185	298	Maximum permissible speed for all operating modes.

Figure 5 - Extrait du manuel de vol d'un DA20, « airspeed indicated marking ».

Q2 : Positionner sur la figure 7 les noms des vitesses caractéristiques et limitatives associées aux différentes marques de l'anémomètre en utilisant les informations issues d'un extrait du manuel de vol du DA20 (cf. figure 6).

Speed	IAS			Remarks
	kts	mph	km/h	
V_A Maneuvering Speed	104	120	193	Do not make full or abrupt control movement above this speed, because under certain conditions the airplane may be overstressed by full control movement.
V_{FE} Maximum Flap Extended Speed	81	93	150	Do not exceed this speed with flaps extended.
V_{NO} Maximum Structural Cruising speed	118	135	218	Do not exceed this speed in smooth air, and then only with caution.
V_{NE} Never Exceed Speed	161	185	298	Do not exceed this speed in any operation.

Figure 6 - Extrait du manuel de vol d'un DA20, « airspeed limitations ».



Figure 7 - Anémomètre avec légende à compléter.

1.2. La face arrière de l'anémomètre

On observe deux orifices avec pour symbole ici S (pression statique) et P (cf. figure 8). Chaque orifice est relié à un tuyau. Cherchons dans le manuel de vol à quelle partie de l'avion est reliée l'autre extrémité de chaque tuyau.

[A]



[B]



Figure 8 - Anémomètres vus de l'arrière. [A] On observe les deux orifices d'entrée - [B] On observe la connexion de ces orifices aux capteurs par deux tuyaux souples.

Q3 : Ci-dessous (cf. figure 9), un extrait du manuel de vol du Rallye (avion léger d'aéroclub)⁽⁷⁾. Colorier les deux circuits « statique » et « total » utilisés par l'anémomètre. Identifier les emplacements sur l'aéronef correspondant aux prises statiques ainsi qu'à la prise totale.

Une prise pression totale **1** située sous l'intrados de l'aile gauche, alimente en pression dynamique l'anémomètre **2**.

Deux prises statiques **3**, situées à l'arrière du fuselage sur chaque flanc, alimentent l'anémomètre **2** et l'altimètre **4** en pression statique.

Ces deux circuits sont munis de purges **5** situées à la partie inférieure du fuselage et accessibles de l'extérieur.

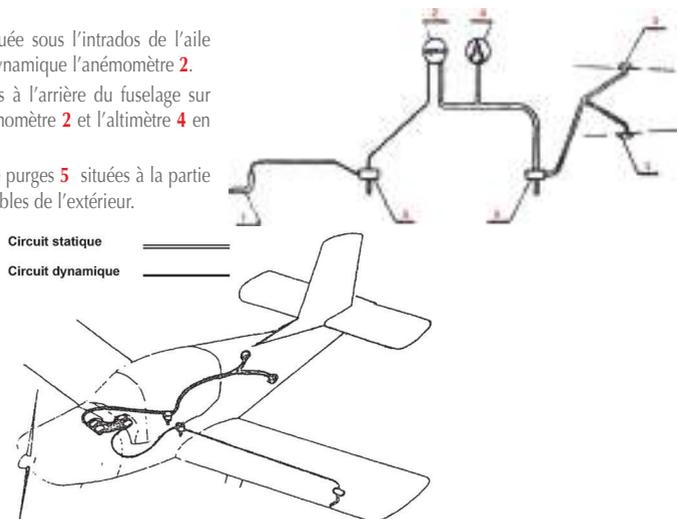


Figure 9 - Schémas de principe des circuits de prises de pression statique et totale extraits du manuel de vol.

(7) Attention, dans le texte de la figure 9 de l'extrait du manuel de vol, il faut comprendre par « prise ou circuit dynamique », une prise ou un circuit de pression totale (voir ci-après).

1.3. Les deux capteurs de pression statique et totale sur l'avion

1.3.1. Capteur de pression statique

L'orifice S sur l'anémomètre de la figure 8 (cf. page précédente) est relié à une prise de pression statique⁽⁸⁾. Cette prise de pression statique est située en général sur le fuselage de l'aéronef⁽⁹⁾. Cette prise de pression est constituée simplement d'un ou de plusieurs petits trous (de l'ordre de grandeur de la taille d'une tête d'épingle) reliés par un tuyau souple au boîtier de l'anémomètre (cf. figures 10 et 11, page ci-contre). Ainsi on met en contact le boîtier de l'anémomètre avec l'air ambiant qui règne autour de l'avion pour à l'altitude de vol considérée ; la pression statique associée à l'air environnant correspond à la pression dans le boîtier de l'anémomètre.



Figure 10 - Prise de pression statique sur un avion-école de type TB10. **(A)** **(B)** On observe la prise de pression fixée sur le fuselage de l'avion - **(C)** On observe la connexion entre ce capteur et l'anémomètre à l'aide d'un tuyau souple.

1.3.2. Capteur de pression totale

L'orifice P sur l'anémomètre de la figure 8 (cf. page précédente) est relié à une prise de pression totale. La prise de pression totale est appelée tube (ou sonde) de Pitot (cf. figure 12 et 13, pages ci-contre), elle est toujours placée de façon à faire face à l'écoulement de l'air. Elle est située en général sous l'aile d'un avion d'aéroclub ou proche du nez d'un avion de ligne ou d'un hélicoptère. La pression totale que l'on mesure correspond à la somme de la pression statique à une altitude donnée et de la pression dynamique liée à la vitesse de l'avion par rapport à l'air.

- (8) La « pression statique » est due aux forces pressantes exercées par le fluide sur un élément de surface qui serait placé parallèlement à une ligne de courant de sorte que le capteur se déplace lui-même à la vitesse du courant.
- (9) En fait, on mesure une pression totale. Dans un fluide en écoulement, cette pression totale est la somme de la pression statique (due à l'air ambiant entourant l'avion) et de la pression dynamique (due au déplacement de l'avion dans l'air). Pour mesurer uniquement la pression statique, il faut faire abstraction du déplacement de l'air dû à l'avion. En conséquence la prise de pression doit s'opérer parallèlement à l'écoulement.

A)



B)



Figure 11 - Exemples de prises de pression statique sur un avion de ligne ; le capitaine et le copilote ont des instruments de bord séparés qui utilisent des prises de pression statique indépendantes (F/O et CAPT) pour doubler les informations, assurer un maximum de sécurité. Il y a même une troisième prise de secours (STBY) indépendante des deux autres pour prévenir la défaillance d'un des systèmes si l'indication de l'une des sondes n'est plus concordante avec les deux autres.

A)



B)



Figure 12 - Tube de Pitot. On aperçoit les deux électrodes reliées à un générateur qui permettent le réchauffement de la sonde en cas de risque de givrage.

A)



B)



C)



Figure 13 - Tube de Pitot sur un avion de ligne.

1.3.3. Les dangers liés à l'obstruction du tube de Pitot

L'obstruction en vol du tube de Pitot sur un avion est le plus souvent causée par l'eau ou la glace. C'est la raison pour laquelle le tube de Pitot est équipé d'un système de dégivrage. Il faut noter qu'une valeur lue vitesse erronée due à l'obstruction du tube de Pitot est à l'origine de plusieurs accidents aériens (par exemple l'accident du vol Rio-Paris, le 1^{er} juin 2009).

2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE L'ANÉMOMÈTRE

2.1. Observation de l'intérieur d'un anémomètre

Si on démonte l'anémomètre, on retrouve les deux orifices d'entrée des pressions totale et statique et on aperçoit une capsule de couleur cuivrée et ondulée appelée capsule de Vidie (cf. figure 14).



Permet de relier l'anémomètre à la prise de pression statique de l'aéronef.

Donc la pression à l'intérieur du boîtier de l'anémomètre est égale à la pression statique autour de l'aéronef, P_s .

Reliée à la sonde Pitot.
La pression à l'intérieur de la capsule de Vidie est égale à la pression totale, P_t , mesurée.

Figure 14 - Vue intérieure et arrière de l'anémomètre.

Au XIX^e siècle, le physicien français Lucien Vidie invente une capsule barométrique creuse qui porte son nom et qui est composée de deux flancs circulaires comportant des ondulations (cf. figure 15). Les métaux utilisés font que les déformations de ces flancs sont très élastiques. Ces déformations sont proportionnelles aux pressions mesurées.

On remarque sur cette photo l'emploi de deux capsules de Vidie montées en série ce qui permet d'amplifier les déformations élastiques.

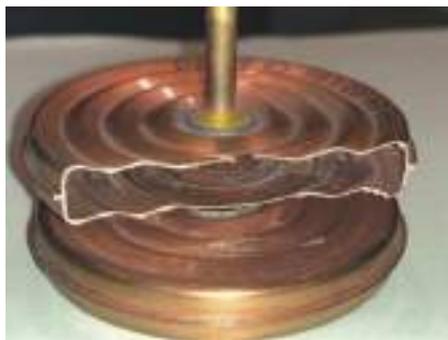


Figure 15 - Photo de deux capsules de Vidie (l'une a été écorchée).

2.2. Schéma de principe du fonctionnement de l'anémomètre

La vitesse lue sur l'anémomètre provient de la mesure d'une différence de pression : $\Delta p = p_t - p_s$. Le tuyau issu de la prise Pitot arrive à l'intérieur de la capsule de Vidie (cf. figure 15, page ci-contre). L'intérieur de la capsule est donc soumis à la pression p_t (cf. figure 16). Cette capsule est placée dans un boîtier où règne la pression statique p_s obtenu en reliant le boîtier à la prise de la pression statique. La capsule de Vidie se déforme alors en fonction de la différence de pression $p_t - p_s$. On peut ainsi qualifier l'anémomètre de manomètre différentiel. Un amplificateur mécanique (système d'engrenage) transforme les déformations de la capsule de Vidie en rotation de l'aiguille (cf. figure 16).

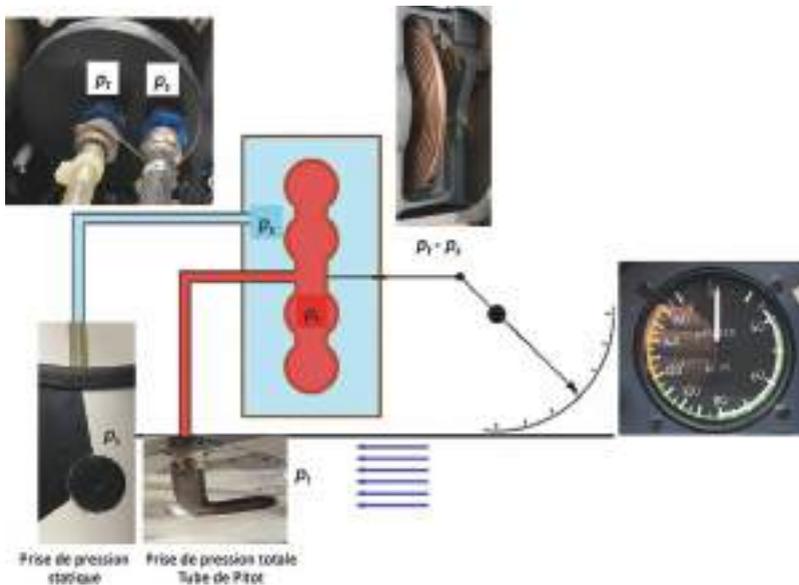


Figure 16 - Schéma de principe du fonctionnement d'un anémomètre.

3. DE LA RELATION DE BERNOULLI À L'EXPRESSION DE LA VITESSE DE DÉPLACEMENT D'UN AÉRONEF PAR RAPPORT À L'AIR

3.1. Relation de Bernoulli : conditions d'application

La relation de Bernoulli ne s'applique que dans le cas de l'écoulement laminaire⁽¹⁰⁾

(10) Dans un écoulement laminaire, toutes les particules fluides de l'air ont la même direction et le même sens ; on dit que les filets d'air sont rectilignes, parallèles entre eux et animés d'une même vitesse.

d'un fluide en régime permanent et considéré comme incompressible. En aéronautique, le fluide est l'air, un mélange de gaz. Nous ferons les hypothèses suivantes pour appliquer la relation de Bernoulli :

- ◆ L'air est considéré comme un fluide parfait (c'est-à-dire que l'on peut négliger les frottements ce qui se traduit par une viscosité nulle). En conséquence, dans une veine de fluide de section constante, la vitesse des particules de fluide est la même en tout point de la section S d'une veine d'air.
- ◆ L'air est considéré comme un fluide incompressible (sa masse volumique est constante). Pour ce faire, nous nous limiterons à des vitesses de déplacement dans l'air bien inférieures à 30 % de la vitesse du son, c'est-à-dire inférieure à Mach⁽¹¹⁾ 0,3 soit environ $400 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.
- ◆ On considérera un régime permanent pour l'écoulement de l'air (les grandeurs physiques sont considérées comme indépendantes du temps).

3.2. Expression algébrique de la relation de Bernoulli

Soit une veine d'air de section variable considérée comme un fluide parfait, incompressible (de masse volumique ρ) s'écoulant en régime stationnaire. Considérons dans cette veine d'air une ligne de courant entre les points A et B (cf. figure 17).

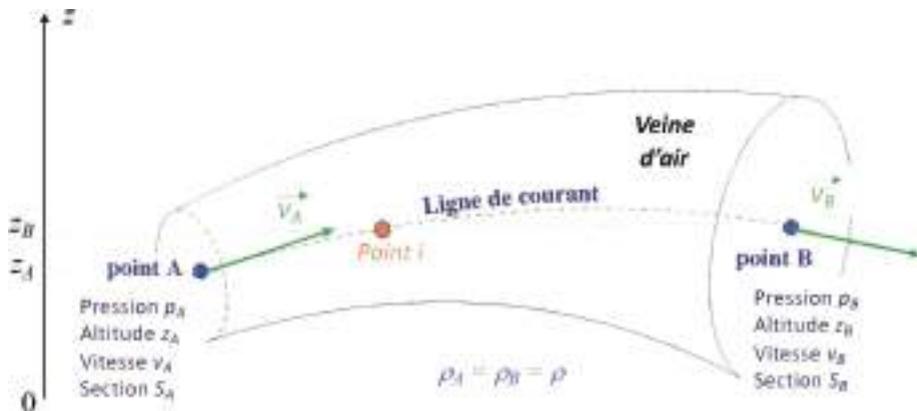


Figure 17 - Veine d'air de section variable.

Le théorème de Bernoulli traduit la conservation de l'énergie dans une veine d'air

(11) On rappelle que le nombre de mach, M , est un nombre sans dimension, il correspond au quotient entre la vitesse d'écoulement de l'air et la vitesse de propagation du son dans ce même air. La vitesse de propagation du son dans l'air dépend de la température. À $15 \text{ }^\circ\text{C}$, la vitesse de propagation du son (Mach 1) est égale à $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; à $-56,5 \text{ }^\circ\text{C}$, elle est de $295 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

dont l'écoulement obéit aux hypothèses précédentes. Son expression algébrique en un point i de la ligne de courant est la suivante : $\frac{p_i}{\rho} + \frac{1}{2} v_i^2 + g \cdot z_i = \text{constante}$, avec :

p_i : pression du fluide au point i ;

v_i : vitesse des particules fluides au point i ;

ρ : masse volumique du fluide considérée en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;

g : accélération de pesanteur en $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$;

z_i : altitude de l'écoulement considéré en un point considéré.

Chaque terme de ce bilan est homogène à une énergie :

- ◆ $\frac{p_i}{\rho}$: représente l'énergie des forces pressantes par kilogramme de fluide au point i considéré ;
- ◆ $\frac{1}{2} v_i^2$: représente l'énergie cinétique par kilogramme de fluide au point i considéré ;
- ◆ $g \cdot z_i$: représente l'énergie potentielle par kilogramme de fluide au point i considéré ;
- ◆ « constante » : représente l'énergie totale par kilogramme de fluide au point i .

Ce bilan énergétique peut se réécrire sous la forme d'un bilan de pression :

$$p_i + \frac{1}{2} \rho \cdot v_i^2 + \rho \cdot g \cdot z_i = \text{constante}.$$

La relation de Bernoulli s'applique entre deux points A et B d'une même ligne de courant de la veine d'air considérée. Dans l'exemple de la figure 17 (cf. page ci-contre), la relation de Bernoulli s'écrit donc :

$$p_A + \frac{1}{2} \rho \cdot v_A^2 + \rho \cdot g \cdot z_A = p_B + \frac{1}{2} \rho \cdot v_B^2 + \rho \cdot g \cdot z_B.$$

La relation de Bernoulli traduit donc la variation de la vitesse v de l'écoulement de l'air entre les points A et B et de la pression statique de l'air entre les points A et B d'altitude z_A et z_B .

Dans l'expression algébrique de la relation de Bernoulli, il apparaît les termes suivants :

- ◆ le terme $p_i + \rho g z_i$ correspond à la pression statique, à une altitude donnée (loi de la statique $\Delta p = \rho g z$), au point i ;
- ◆ le terme $\frac{1}{2} \rho \cdot v_i^2$ est appelé pression dynamique notée p_d au point i ;
- ◆ la constante représente la pression totale notée p_T au point i .

Soit encore pour un point i considéré : $p_s + p_d = p_T$.

3.3. Expression de la vitesse de déplacement de l'avion par rapport à l'air

Considérons la situation suivante : un avion volant en palier à la vitesse constante v . On considère deux lignes de courant très proches, OA et O'B, l'une entrant dans le

tube Pitot et l'autre passant à proximité de la prise statique.

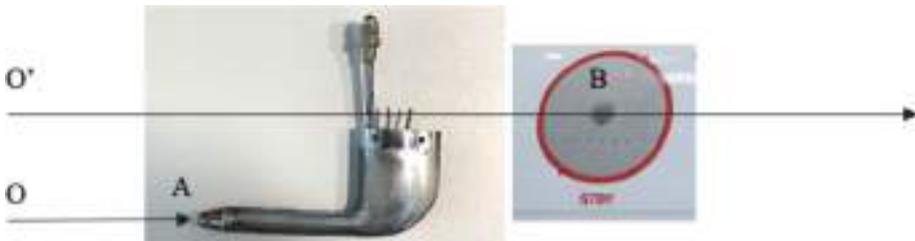


Figure 18 - Lignes de courant et tube de Pitot.

Le fluide étant considéré comme parfait et son écoulement laminaire, les vitesses prises en O, O' et B sont égales.

Appliquons la relation de Bernoulli sur la ligne de courant OA entre un point O, situé loin du tube Pitot et un point A situé au niveau de la sonde Pitot :

$$p_O + \frac{1}{2} \rho \cdot v_O^2 + \rho \cdot g \cdot z_O = p_A + \frac{1}{2} \rho \cdot v_A^2 + \rho \cdot g \cdot z_A.$$

L'aéronef volant en palier, z_O est égale à z_A , dans ces conditions la relation de Bernoulli devient :

$$p_O + \frac{1}{2} \rho \cdot v_O^2 = p_A + \frac{1}{2} \rho \cdot v_A^2.$$

Lorsque la particule d'air atteint le point A (point d'entrée du tube Pitot, correspondant au point d'arrêt), cette dernière est arrêtée et donc $v_A = 0$, la relation de Bernoulli s'écrit alors :

$$p_O + \frac{1}{2} \rho \cdot v_O^2 = p_A.$$

Appliquons la relation de Bernoulli sur la ligne de courant O'B entre un point O' situé loin du capteur de pression statique et un point B situé au niveau du capteur :

$$p_{O'} + \frac{1}{2} \rho \cdot v_{O'}^2 + \rho \cdot g \cdot z_{O'} = p_B + \frac{1}{2} \rho \cdot v_B^2 + \rho \cdot g \cdot z_B.$$

- ◆ Les lignes de courants étant très proches on considère que p_O est égale à $p_{O'}$.
- ◆ L'écoulement étant laminaire et le fluide étant considéré comme parfait, $v_{O'} = v_B = v_O$.
- ◆ L'aéronef volant en palier, $z_{O'}$ est égale à z_B , dans ces conditions :

$$p_O = p_B = \text{pression statique } p_s.$$

La relation de Bernoulli peut donc être réécrite sous la forme : $p_t - p_s = p_d$ avec $p_d = \frac{1}{2} \rho v^2$ où v représente la vitesse de déplacement des filets d'air (dans notre cas, la vitesse de déplacement de l'avion par rapport à l'air). Par conséquent, si l'on peut mesurer la différence de pression $\Delta p = p_t - p_s$ et si l'on connaît la masse volumique de l'air ambiant, on peut déduire la vitesse de déplacement de l'aéronef dans l'air. Il suffit donc de concevoir un dispositif permettant d'obtenir cette différence de pression Δp . C'est

le rôle joué par la prise de pression statique et la prise de pression totale (cf. figure 19).

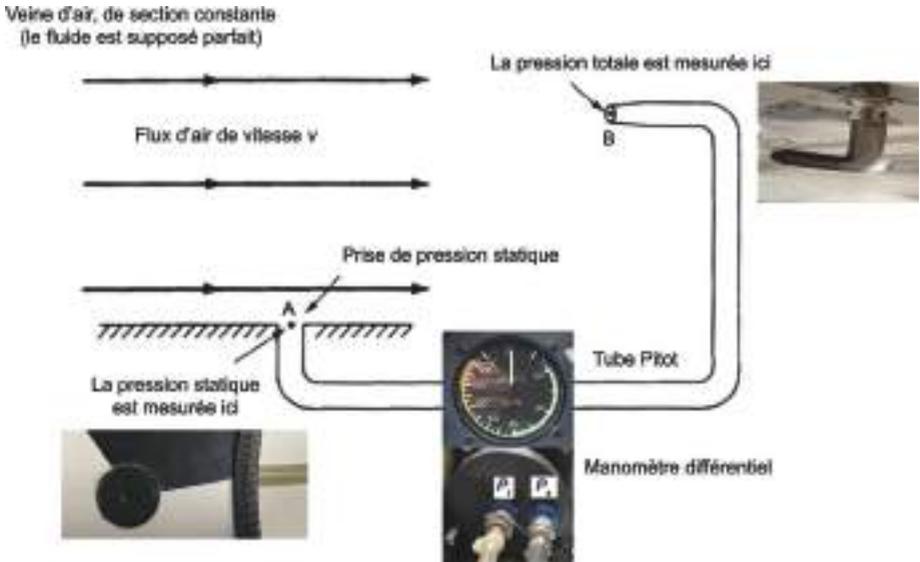


Figure 19 - Schéma de principe de la mesure des pressions statique et totale pour obtenir la vitesse v . Une prise de pression dirigée face à l'écoulement d'air mesure la pression totale au point B. Une autre prise de pression qui doit s'opérer parallèlement à la ligne de courant et donc à la surface du capteur qui est elle-même parallèle à la ligne de courant mesure la pression statique au point A.

Q4 : Donner l'expression algébrique reliant la vitesse de l'aéronef par rapport à l'air en fonction de la masse volumique de l'air à l'altitude considérée, de la pression totale et de la pression statique.

Q5 : La vitesse de l'aéronef par rapport à l'air dépend de la masse volumique de l'air. Est-ce un problème ? Justifier.

Remarque : Au lieu d'installer un tube de Pitot et la prise statique séparée, on utilise parfois un dispositif combiné appelé antenne manométrique et constitué de deux tubes concentriques. Le tube interne est un tube de Pitot et le tube extérieur est bouché à l'avant et il est perforé sur son pourtour de plusieurs trous qui capent la pression statique (cf. figure 20).

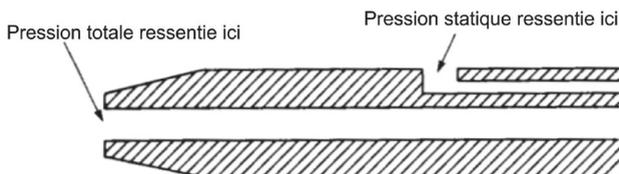


Figure 20 - Une sonde combinée qui permet d'accéder à la fois à p_t et p_s .

3.4. Illustration expérimentale de la sonde de Pitot combinée

On peut réaliser simplement une sonde de Pitot combinée en utilisant un tube en verre en U ou du tube transparent utilisé pour les aquariums (cf. figure 21). On place de l'eau colorée dans le tube en U afin de réaliser un manomètre différentiel à liquide. On crée un courant d'air à l'aide par exemple d'un sèche-cheveux. La différence de hauteur Δh indique la différence de pression $p_t - p_s$ et permet de remonter à la vitesse V du courant d'air.

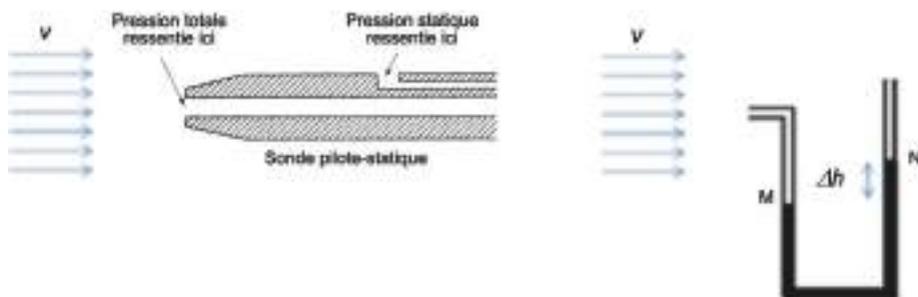


Figure 21 - Une modélisation expérimentale simple de la sonde de Pitot combinée.

4. EXPLOITATION EXPÉRIMENTALE DE L'ANÉMOMÈTRE

4.1. Le but visé : confronter théorie et expérience

L'idée générale est de faire fonctionner un anémomètre au sol en insufflant de l'air dans les deux prises de pression de l'appareil à l'aide de deux seringues. Dans un premier temps, une valeur expérimentale de la vitesse de l'air est lue sur l'anémomètre. Dans un deuxième temps, des capteurs de pression sont placés pour mesurer la pression statique et la pression totale. Si l'on connaît la masse volumique de l'air dans les conditions de l'expérience, il est alors possible de calculer par la relation de Bernoulli la valeur de la vitesse de l'air envoyé dans l'anémomètre. C'est en comparant ces deux valeurs de la vitesse expérimentale et calculée que le test de la relation de Bernoulli peut être validé ou non.

4.2. Quelques expériences qualitatives pour commencer

4.2.1. Expérience qualitative 1

Lorsqu'on souffle dans le tube Pitot relié à la prise de pression totale de l'anémomètre, l'aiguille se déplace à peine. Il faut souffler assez fortement et bien orienter son souffle vers l'orifice du tube pour obtenir un plus grand déplacement de l'aiguille et donc une plus grande vitesse air mesuré. C'est donc bien le déplacement de l'air capté

par le tube Pitot qui est indiqué par l'aiguille de l'anémomètre.

4.2.2. Expérience qualitative 2

Remplaçons le tube Pitot par une seringue S_1 (20 mL dans nos expériences) dont le piston est initialement réglé de façon à pouvoir être déplacé en compression ou en dépression. Cette seringue est reliée à l'orifice P qui est la pression totale, rappelons-le. De la même façon, une deuxième seringue S_2 permet de faire varier la pression statique de l'entrée S de l'anémomètre (cf. figure 22).

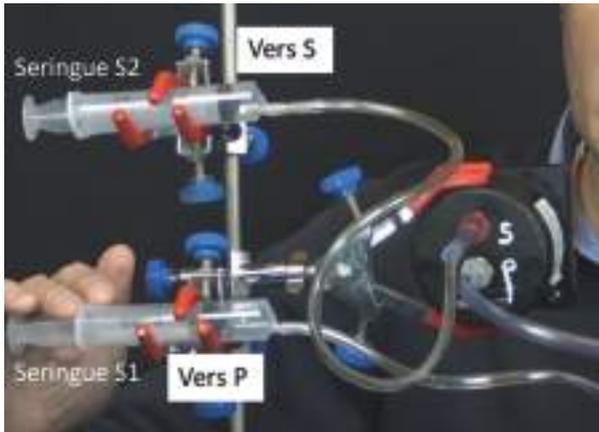


Figure 22 - Dispositif expérimental.

La valeur initiale de la vitesse lue sur l'anémomètre étant de zéro, on décide de déplacer le piston S_2 . La vitesse ne change pas et reste à zéro. En revanche, un léger déplacement du piston S_1 en compression fait bouger l'aiguille de façon assez importante : la vitesse lue sur l'anémomètre augmente et atteint facilement 200 à 300 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ (cf. figure 23). Cela confirme bien le rôle principal de la prise de pression totale qui est connectée au tube Pitot.

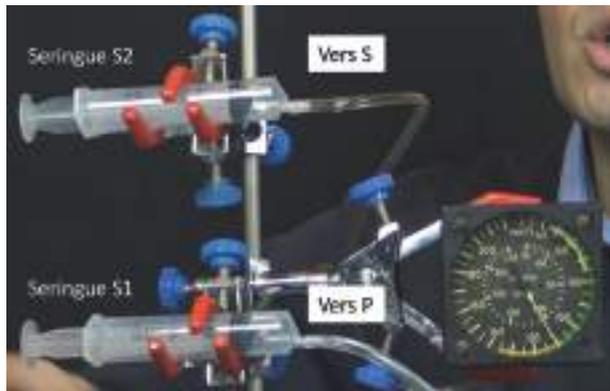


Figure 23 - Observer la valeur de la vitesse lorsque l'on pousse le piston de la seringue reliée à l'orifice P de l'anémomètre.

4.2.3. Expérience qualitative 3⁽¹²⁾



Tandis que nous maintenons le piston S_1 dans sa position afin de garder une valeur de vitesse non nulle ($205 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ dans notre vidéo), nous poussons légèrement sur le piston S_2 . L'effet est immédiat : après avoir une vitesse air qui augmente, nous observons que la vitesse air diminue. Une action inverse du piston S_2 augmente la vitesse. En d'autres termes, à pression totale constante, si la pression statique augmente (respectivement diminue), la vitesse de l'air lue sur l'anémomètre diminue (respectivement augmente).

C'est donc bien l'ensemble des deux pressions (statique et totale) qui influence la valeur de la vitesse lue sur l'anémomètre. En effet par la prise P , nous avons l'information de la pression totale p_t , et par la prise S celle de la pression atmosphérique p_s . Tout se passe comme si l'instrument effectuait la différence des deux pressions, c'est-à-dire de : $p_t - p_s$. Cette différence s'appelle la pression dynamique p_d . C'est la pression dynamique qui nous intéressera pour la suite de notre problème !

4.2.4. Mise en œuvre d'un dispositif expérimental pour tester la relation de Bernoulli⁽¹³⁾



L'objectif de cette partie est de tester la relation de Bernoulli

$p_t - p_s = \sqrt{\frac{\rho v^2}{2}}$ dans le cas d'un écoulement horizontal et en conservant les hypothèses du paragraphe 3. Pour cela, on va mesurer à l'aide d'un capteur différentiel, la différence de pression $\Delta p = p_t - p_s$, appelée aussi pression dynamique p_d , puis calculer la vitesse v à l'aide de la relation de Bernoulli. Dans un second temps, on va comparer la valeur de cette vitesse avec celle lue sur l'anémomètre puis conclure.

Remarque

Pour obtenir la valeur de la vitesse à partir de la relation de Bernoulli, il faut connaître la masse volumique de l'air à l'altitude considérée. Soit on utilise la valeur de la masse volumique en prenant comme référence le niveau de la mer : $\rho = 1,225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ à $15 \text{ }^\circ\text{C}$, soit on prend en compte la pression atmosphérique du lieu où l'on se trouve, la température et l'humidité relative, puis à l'aide de ces données on utilise une application disponible sur Internet pour obtenir la valeur de la masse volumique. On peut utiliser

(12) Lien pour télécharger la vidéo de cette expérience :
<https://mediacenter.ac-montpellier.fr/videos/?video=MEDIA191225125311483>
 Elle est disponible aussi sur le serveur de l'UdPPC.

(13) Lien pour télécharger la vidéo de cette expérience :
<https://mediacenter.ac-montpellier.fr/videos/?video=MEDIA191225130357268>
 Elle est disponible aussi sur le serveur de l'UdPPC.

par exemple l'application suivante⁽¹⁴⁾ :

<https://www.deleze.name/marcel/physique/rosee/masse-vol.html>

(cf. figure 24). On peut citer aussi le calculateur en ligne suivant, d'un équipementier tchèque pour stations météo, qui opère en sus la correction d'altitude, tout en donnant les relations utiles pour opérer ces corrections :

<https://barani.biz/apps/air-density/>

Calcul de la masse volumique de l'air
ou fonction de la pression, de la température et de l'humidité relative

Données

- La pression atmosphérique ne sera corrigée, car elle signifie qu'elle est déjà prise en compte à l'altitude 0.
- La température de l'air se mesure à l'ombre, dans un récipient isolé, à l'écart de 2m du sol.
- L'humidité relative est mesurée en pourcentage de la pression ou du psychromètre.

Calculateur en ligne

Pression $p_{\text{atm}} = 1013$ hPa (atmosphérique)

Température de l'air $t = 13$ degrés Celsius

Humidité relative $H_r = 60$ %

Masse volumique de l'air

Méthode

En interpolant dans une table de données géométriques, on trouve la fonction inverse de saturation de la vapeur d'eau $p_{\text{sat}}(T)$ en fonction de sa température T pour les températures T à 33 °C.

La température en kelvins est $T = t + 273,15$ K.

La masse volumique de l'air est donnée par la formule

$$\rho = \frac{\left(1 - \frac{0,622 p_{\text{sat}}(T)}{p_{\text{atm}} - p_{\text{sat}}(T)}\right) p_{\text{atm}}}{R_a T}$$

où $R_a = 287,058 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$

Enlèvement de la fonction de la masse volumique

Exemple pour $t = 13$ °C, on lit dans la table $p_{\text{sat}}(13) = 1060 \text{ Pa}$

Dans notre exemple: $T = 286,15 \text{ K}$, $p_{\text{atm}} = 101300 \text{ Pa}$ et $H_r = 0,7$

Dans notre exemple,

$$\rho = \frac{\left(1 - \frac{0,622 \times 1060}{101300 - 1060}\right) \times 101300}{287,058 \times 286,15} = 1,26 \text{ (kg m}^{-3}\text{)}$$

Créer | Accueil > Exercices > Humidité de l'air

Masse volumique de l'air - Output

Données

Pression atmosphérique: $p_{\text{atm}} = 1013 \text{ hPa}$

Température de l'air: $t = 13$ °C

Humidité relative: $H_r = 60$ %

Pour modifier les données, actionnez, sur la barre de navigation, le bouton "Revenir d'une page"

Calcul:

Pression de saturation de la vapeur d'eau: $p_{\text{sat}}(t) = 14,97 \text{ hPa}$

Résultat

Masse volumique de l'air: $\rho_{\text{air}} = 1,260 \text{ kg/m}^3$

Créer | Accueil > Physique > Humidité de l'air

Figure 24 - Utilisation d'une application sur Internet pour déterminer la masse volumique de l'air dans des conditions de pression, température et humidité relatives données.

(14) Il existe en effet de nombreux calculateurs en ligne, notamment ceux du *National Weather Service* : https://www.weather.gov/epz/wxcalc_wxcalc2go

À titre d'exemple, sous une atmosphère ayant les caractéristiques suivantes (pression atmosphérique à 1038 hPa, température à 13 °C et humidité relative de 60 %), la masse volumique calculée est de $1,260 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Cette valeur nous permettra d'effectuer le calcul de vitesse théorique dans les conditions de notre expérience quantitative suivante.

Le dispositif expérimental utilise un capteur de pression différentiel (cf. figure 25), permettant ainsi d'obtenir directement la mesure de la pression dynamique p_d . Le capteur de pression différentiel possède deux prises de pression. L'une sera choisie comme prise de pression totale et l'autre comme prise de pression statique. Cette dernière sera laissée à l'air libre tout comme la prise S de l'anémomètre. La prise de pression totale p_t de l'anémomètre ainsi que la seconde prise du capteur de pression différentiel seront connectées en Y à une seringue. Enfin, le capteur de pression différentiel est relié électroniquement à une console d'acquisition dont la mesure sera affichée à partir d'un logiciel sur un ordinateur.



Figure 25 - Capteur double prise de pression.

Protocole expérimental mis en œuvre

- ◆ Cacher le cadran de l'anémomètre l'aide d'un papier opaque.
- ◆ Déplacer en compression le piston de la seringue. Attention effectuer de petits déplacements.
- ◆ De la mesure de la différence de pression totale/statique, en déduire la vitesse de l'air correspondante à l'aide de la relation de Bernoulli.
- ◆ Retirer le papier opaque du cadran de l'anémomètre et comparer la vitesse affichée et la vitesse calculée.
- ◆ Recommencer l'expérience pour d'autres compressions du piston.

À titre d'exemple : pour $\rho = 1,260 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, nous obtenons une valeur expérimentale de vitesse de l'air approchant à $1 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ près à la valeur de vitesse de l'air théorique : $203 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ pour une pression dynamique de 2,0 kPa. Ceci est plutôt

excellent (cf. figure 26).



Figure 26 - Lecture de la valeur de la vitesse affichée sur l'anémomètre.

Pour corser l'activité nous pouvons aussi utiliser deux capteurs de pression, l'une mesurera la pression statique p_s et l'autre p_t . Il faudra veiller dans ce cas à bien étalonner les deux capteurs de pression de façon qu'à pression dynamique nulle, les capteurs mesurent tous deux la même pression atmosphérique (cf. figure 27).



Figure 27 - Deux capteurs à prise de pression simple.

4.2.5. Mise en œuvre d'un dispositif expérimental pour déterminer la densité de l'air⁽¹⁵⁾

Dans cette partie, nous profitons du montage expérimental précédent pour déter-

(15) Lien pour télécharger la vidéo de cette expérience :

<https://mediacenter.ac-montpellier.fr/videos/?video=MEDIA191225131425745>

Elle est disponible aussi sur le serveur de l'UDPPC.

miner la masse volumique de l'air dans les conditions de l'expérience. En effet, la relation de Bernoulli fait intervenir la masse volumique de l'air ρ :

$$p_d = p_t - p_s = \frac{\rho}{2} \cdot v^2.$$



De cette relation, il suffit de connaître la pression dynamique (en Pa) et la vitesse (exprimée en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) pour en déduire la masse volumique de l'air (exprimée en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) qui est constante pour tout couple (p_d, v) , si la relation est bien linéaire, ce qui est testé dans ce qui suit.

On reprend le dispositif de la figure 26 (cf. page précédente), on déplace le piston dans la seringue afin d'obtenir différentes valeurs de pression dynamique qui sont automatiquement obtenues par la console d'acquisition. Pour chaque déplacement de piston, on lit sur l'anémomètre la valeur de la vitesse. On trace la courbe $p_d = f(v^2)$, on doit obtenir une droite dont le coefficient directeur s'identifie à $\frac{\rho}{2}$.

Remarque : Pour la lecture des vitesses, nous disposons d'un anémomètre gradué à la fois en nœud et en kilomètre par heure. Nous choisissons de relever les valeurs de la vitesse en nœud, car les caractères des chiffres en nœuds sont plus visibles et sont localisés sur le pourtour du cadran de l'anémomètre.

v (en kt)	40	60	80	100	120	140	160	180	200
v^2 (en $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) ⁽¹⁶⁾	400	900	1600	2500	3600	4900	6400	8100	10000

Tableau 2

Tracé de la courbe

Voir figure 28 (cf. page ci-contre).

Résultats

$p_d = 0,000\,58(9) \times v^2$ avec p_d en kPa et v en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ou encore $p_d = 0,58(9) \times v^2$ avec p_d en Pa et v en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. Ainsi $\frac{\rho}{2} = 0,59$ d'où $\rho = 2 \times 0,59 = 1,18 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

CONCLUSION

Comprendre le fonctionnement d'un objet technique à l'aide de concepts phy-

(16) $1 \text{ kt} \approx 1,8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (en réalité $1 \text{ kt} \approx 1,852 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) d'où :

$$v(\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) = v(\text{kt}) \times 1,8 \times (1000/3600).$$

Le coefficient 1,8 permet de passer des nœuds en $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$. Le coefficient 1000/3600 permet de passer des $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ aux $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. Ainsi, après réduction :

$$v(\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) = v(\text{kt}) \times 18/36 = v(\text{kt}) \times 1/2.$$

Élevons au carré : $v^2(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}) = [v(\text{kt})/2]^2 = v(\text{kt})^2/4.$

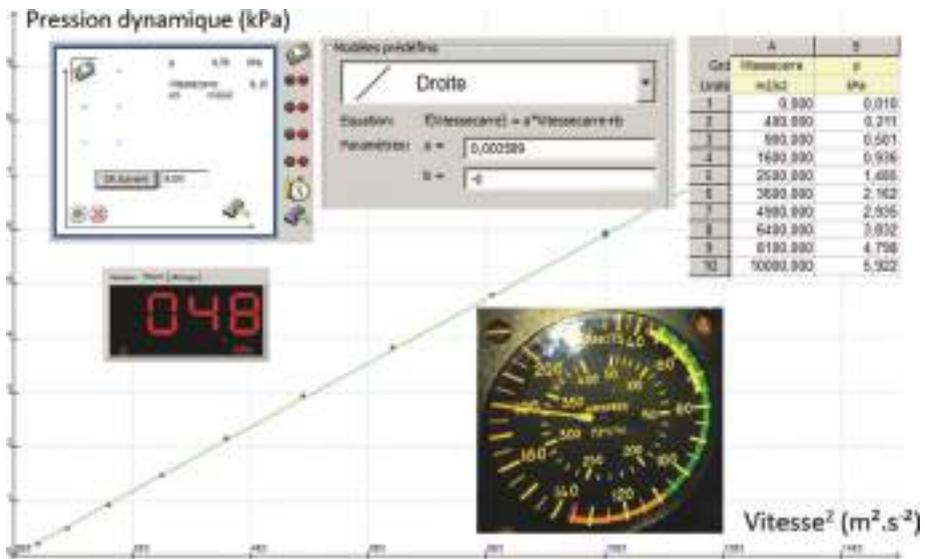


Figure 28 - Exploitation des résultats de mesure ; courbe $p_d = f(v^2)$.

siques, ici les équations de Bernoulli sont le point central de cet article. En outre, dans la dernière partie de l'article, la confrontation entre la théorie et l'expérience, démarche qui a permis aussi à la science de se construire, permet à l'élève de prendre du recul dans l'élaboration du savoir ; c'est ici, en faisant fonctionner l'anémomètre au sol, que le va-et-vient entre théorie et expérience est possible, dans le but de tester la validité de la relation de Bernoulli.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier les centres ENAC (École nationale de l'aviation civile) Toulouse, Montpellier, Carcassonne et Castelnaudary et l'aéroclub de l'Hérault pour l'expertise professionnelle qu'ils nous apportent et leur participation très active à nos formations BIA (Brevet d'initiation aéronautique) et CAEA (Certificat d'aptitude à l'enseignement aéronautique).

BIBLIOGRAPHIE ET NETOGRAPHIE

- [1] Collectif d'auteurs, *Manuel du pilote d'avion*, édition Cépaduès, 18^e édition, 2018.
- [2] J. Nicolas, *Mon premier brevet aéronautique*, édition Cépaduès, 4^e édition, 2017.
- [3] Site de ressources pour comprendre le vol et le fonctionnement des avions pour les débutants et les initiés : <https://lavionnaire.fr>

- [4] Cours Mermoz, disponible en ligne : <https://www.institut-mermoz.com>
- [5] Ressources vidéos sur l'anémomètre disponibles sur le site académique de la promotion des sciences et de la délégation académique à la formation aéronautique de l'académie de Montpellier :
- ◆ Cette vidéo propose une présentation générale des principaux instruments que l'on rencontre à bord d'un avion d'aéroclub :
<https://www.ac-montpellier.fr/cid101781/les-instruments-partie-1.html>
 - ◆ Cette vidéo aborde sous la forme d'un cours détaillé et illustré d'expériences les instruments utilisant un capteur de pression (altimètre, anémomètre, vario-mètre) :
<https://www.ac-montpellier.fr/cid101782/les-instruments-partie-2.html>
 - ◆ Cette vidéo propose une expérience simulant le comportement d'une sonde Pitot :
<https://www.ac-montpellier.fr/cid97576/simulation-du-comportement-d-une-sonde-pitot.html>
 - ◆ Ces vidéos ont été réalisées à bord d'un avion d'aéroclub (DA20). Elles ont pour objectif de montrer aux élèves le comportement de chaque instrument durant les différentes phases de vol lors d'un tour de piste « main gauche » : décollage, montée initiale, mise en virage, vent traversier, vent arrière (vol en palier stabilisé), étape de base, dernier virage, finale (descente stabilisée), atterrissage :
<https://www.ac-montpellier.fr/cid111012/observation-du-comportement-des-differents-instruments-en-vol.html>



Nicolas CHEYMOL

IA-IPR physique-chimie

Correspondant académique pour les sciences et la technologie (CAST)

Délégué académique à la formation aéronautique et spatiale (DAFA)

Académie de Montpellier



Dominique DUCOURANT

Professeure de physique-chimie retraitée

Chargée de mission DAFA

Académie de Montpellier



Jean-Jacques CALLIET

Professeur de mathématiques retraité

Chargé de mission DAFA

Académie de Montpellier



Temaeva GUES

Professeur de physique-chimie

Collège Saint-Exupéry

Bram (Aude)

Chargé de mission DAFA

Académie de Montpellier

Annexe

Réponses aux questions

Q1 :

Marking	IAS	
	kts	mph
White Arc	37-81	43-93
Green Arc	41-118	47-135
Yellow Arc	118-161	135-185
Red Line	161	185

Vitesse à ne jamais dépasser

Limites de l'Arc vert

Limites de l'Arc jaune

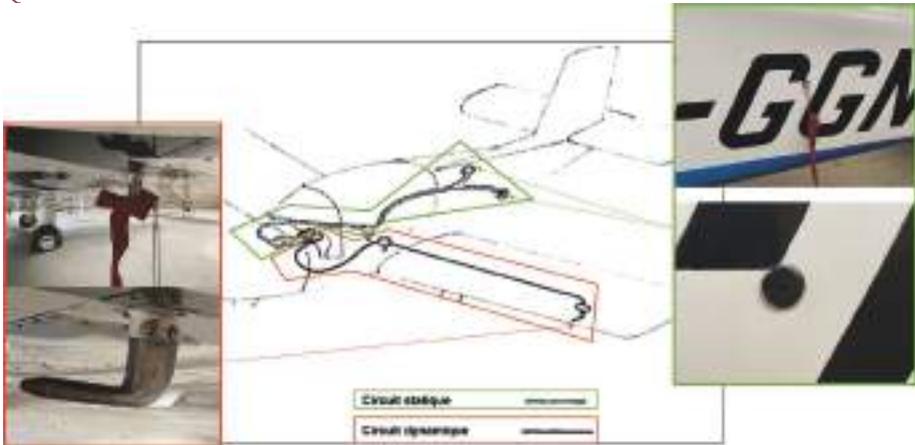


Limites de l'Arc blanc

Q2 :



Q3 :



Au sol, les prises de pression statique et totale sont protégées afin d'éviter toute obstruction

$$Q4 : p_t - p_s = p_d = \sqrt{\frac{\rho V^2}{2}}$$

Q5 : L'expression trouvée à la question 5 montre que la vitesse vraie dépend de la différence de pression $p_t - p_s$ mais aussi de la masse volumique de l'air à l'altitude considérée. Or la masse volumique dépend de P et T . Pour éliminer la dépendance de la masse volumique sur la vitesse vraie, on la fixe à la valeur correspondant au niveau de la mer. La relation précédente ne donne donc plus la vitesse vraie, mais une vitesse appelée vitesse équivalente. Un autre problème apparaît, l'air ne peut plus être considéré comme incompressible pour des vitesses élevées. Dans ces conditions, il ne faut plus prendre la relation de Bernoulli pour obtenir la vitesse à partir de la différence de pression $p_t - p_s$ mais l'équation de Saint Venant qui prend en compte la compressibilité de l'air :

$$p_t - p_s = \frac{\rho V^2}{2} \left(1 + \frac{M^2}{4} + \frac{M^4}{40} + \dots \right)$$

où M est le nombre de Mach : cela dépasse le cadre de cet article.

Compléments de l'article

Cet article comporte des compléments nommés :

- ◆ Anémomètre expérience qualitative.mp4
- ◆ Anémomètre expérience quantitative n° 1.mp4
- ◆ Anémomètre expérience quantitative n° 2.mp4
- ◆ Présentation de l'anémomètre Bup.mp4

L'ensemble est disponible sur le site de l'UdPPC sous la forme d'un fichier zippé 10220287.

Mende : les jeux atomiques

Académie de Toulouse

Coup de cœur du jury

par Anne GOMEZ

Lycée professionnel Clément de Pémillé - 81300 Graulhet

annegomez@free.fr

CENT CINQUANTE ANS, ça se fête ! Et comme pour nous, fête est synonyme de convivialité, nous avons eu l'idée de créer un jeu de société à partir du tableau périodique de Mendeleïev. Nous avons souhaité rendre accessibles des concepts scientifiques de notre programme scolaire à travers un jeu instructif, ludique et dynamique. Le principe du jeu nous est apparu assez rapidement : créer des molécules à partir de cartes éléments. Quant à la conception, elle s'est révélée bien plus complexe. Du prototype à la réalisation d'objets (dés, cartes, plateau), en passant par la création des règles et du design du jeu, nous avons dû mobiliser et croiser des compétences de disciplines multiples : français, mathématiques, physique-chimie, bijouterie, arts appliqués et dessin technique se sont mêlés pour donner naissance à un jeu intergénérationnel. Nous, élèves en formation de bijouterie au Lycée Clément de Pémillé, sommes fiers de vous présenter notre création collective « Mende : les jeux atomiques ».

INTRODUCTION

En début d'année scolaire notre professeure de mathématiques et de sciences, Mme Anne Gomez, a proposé aux élèves volontaires des deux classes de CAP bijou (première et terminale) de participer au concours Mendeleïev, en réalisant un projet en lien avec la commémoration des 150 ans du tableau périodique des éléments chimiques de Dmitri Mendeleïev.

Ce concours entrait dans le double cadre de l'Année internationale du tableau périodique des éléments chimiques en 2019 (initiative de l'Unesco) et de l'Année de la chimie de l'école à l'université 2018-2019 (initiative du ministère de l'Éducation nationale et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation). L'objectif est de présenter une production autour du thème de la classification périodique des éléments chimiques.

Tous les élèves de la classe de terminale CAP bijou (sept filles et cinq garçons) et sept élèves de la classe de première année de CAP bijou (trois filles et quatre garçons) ont eu envie de se lancer dans l'aventure !

Plusieurs séances de réflexion et d'échange d'idées nous ont permis de définir un cadre pour notre projet ainsi que nos objectifs :

- ◆ nous n'avons étudié en classe que les vingt premiers éléments, et nous décidions alors de nous consacrer seulement aux trois premières lignes du tableau périodique (cf. figure 1) ;
- ◆ nous voulions réinvestir ce que nous avons appris ou étions en train d'apprendre en chimie (modèle de Lewis, formation des molécules et calculs de masse molaire moléculaire) ;
- ◆ nous souhaitons mettre en avant notre filière professionnelle qu'est la bijouterie joaillerie (travail du métal en atelier pour la confection du dé et des jetons, mais aussi la technique du gouaché⁽¹⁾ en arts appliqués pour la réalisation esthétique des cartes).

PERIODE	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8A	9A	10A	11A	12A
1	H (1,008)											He (4,003)
2	Li (6,941)	Be (9,012)			B (10,81)	C (12,01)	N (14,01)	O (16,00)	F (18,99)			Ne (20,18)
3	Na (22,99)	Mg (24,30)			Al (26,98)	Si (28,09)	P (30,97)	S (32,06)	Cl (35,45)			Ar (39,94)

Figure 1 - Extrait du tableau périodique des éléments.

1. PROBLÉMATIQUE

Nous avons alors souhaité répondre aux deux questions suivantes, essentielles au XXI^e siècle :

- ◆ Comment permettre à chaque individu d'appréhender et comprendre des notions scientifiques souvent perçues comme complexes, en les rendant à la fois ludiques et éducatives ?
- ◆ Comment se détacher des nouvelles technologies accaparantes pour l'esprit (et les yeux) pour revenir à la notion fondamentale du vivre ensemble ?

Nos diverses recherches sur le sujet nous ont conduits à notre idée première : créer un jeu de cartes dans lequel chaque carte correspondrait à un élément et dont le but serait de construire des molécules permettant d'obtenir un maximum de points. Le comptage des points se ferait par le calcul des masses molaires moléculaires des molé-

(1) En joaillerie, la création d'un bijou est une œuvre collective dont le croquis est le premier pas. Le gouaché est un dessin qui guidera toutes les « mains » qui participent à la création du bijou. Les maquettiste, joailliers, gemmologues, polisseurs, ou sertisseurs s'y réfèrent à chaque étape (voir aussi sous-paragraphe 3.3.2.)..

cules que chaque joueur aurait ainsi pu former.

Ce jeu de cartes se veut intergénérationnel. La matière nous entoure, elle nous constitue, il est grand temps de lever le nez de son téléphone portable (ou autres écrans) pour se poser cette question utile pour certains, futile pour d'autres, mais éducative pour tous : *De quelles matières est composé, mon téléphone, mon corps et tout ce qui nous entoure ?*

2. QUELQUES NOTIONS UTILES À LA RÉALISATION DU PROJET : CONTEXTE SCIENTIFIQUE

2.1. La classification périodique des éléments

Au début du XVIII^e siècle, seuls douze corps simples avaient été isolés. Au milieu du XIX^e siècle, ce nombre était porté à environ soixante. Il devenait urgent de leur trouver une méthode de classification rationnelle.

2.1.1. Les critères historiques de Mendeleïev

Au milieu du XIX^e siècle, peu de critères permettent de classer les uns par rapport aux autres les éléments connus. Pour obtenir un classement, Mendeleïev choisit d'utiliser la masse des atomes. Il range alors les atomes dans un « tableau » : il les place par masse croissante du haut vers le bas, puis de la gauche vers la droite, en mettant, sur une même ligne, des éléments présentant des analogies de comportement, c'est-à-dire des ressemblances. Pour expliquer certains vides de son classement, il prédit alors avec succès l'existence d'éléments pas encore découverts à son époque.

2.1.2. Le critère actuel de construction

Dans la classification périodique actuelle, le critère de classement est le numéro atomique Z . De plus, les lignes et les colonnes ont été inversées par rapport à la représentation initiale. Les 112 éléments chimiques naturels ou artificiels sont rangés en lignes, par numéro atomique Z croissant.

Un changement de lignes s'effectue régulièrement :

- ◆ dans une même ligne, ou période, les atomes des éléments ont un même nombre de couches électroniques occupées ;
- ◆ dans une même colonne, les atomes des éléments ont le même nombre d'électrons sur leur couche externe.

La classification périodique actuelle est constituée de dix-huit colonnes et de sept lignes, aussi appelées périodes (cf. figure 3, page ci-après).

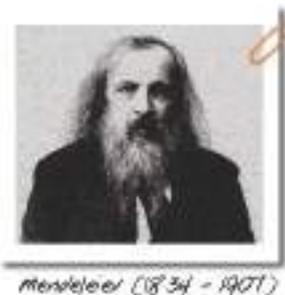


Figure 2 - Portrait de Dmitri Mendeleïev.

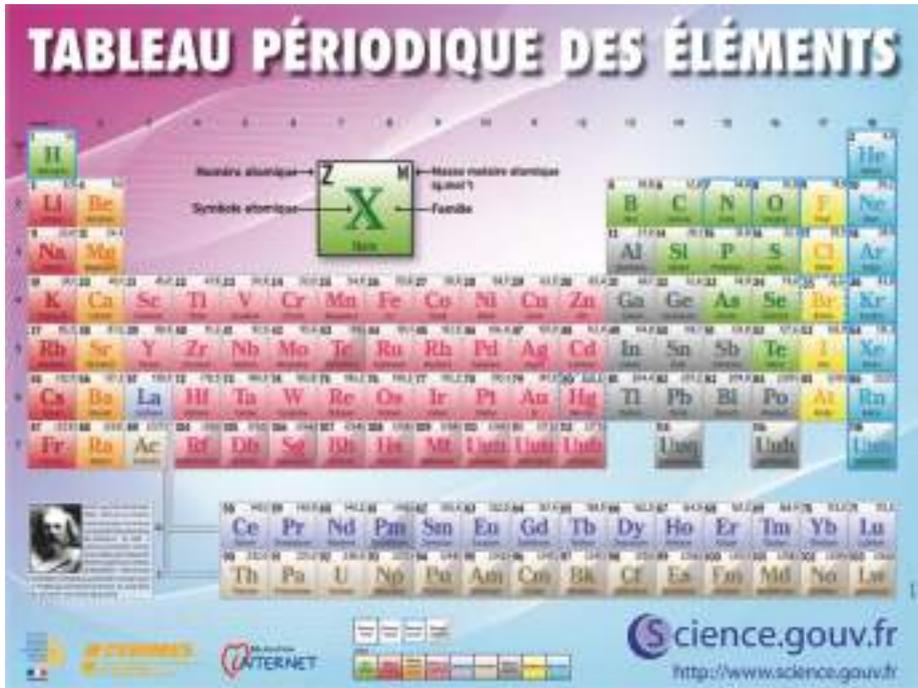


Figure 3 - Tableau périodique des éléments.

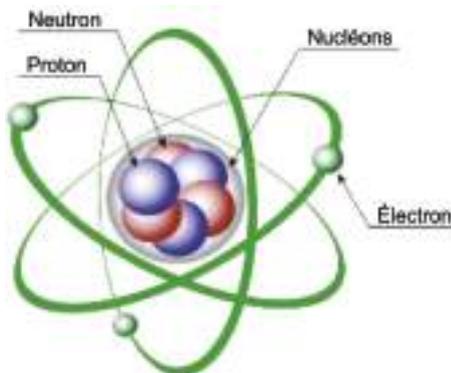


Figure 4 - Représentation imagée d'un atome.



Figure 5 - Représentation symbolique de l'élément chimique de numéro atomique Z.

2.2. L'atome

2.2.1. Constitution

L'atome est constitué d'un noyau central autour duquel se déplacent des électrons. Le noyau de l'atome est constitué de particules élémentaires : les protons (chargés positivement) et les neutrons (neutres) désignés sous le nom de nucléons. Il y a exactement le même nombre d'électrons et de protons dans un atome, un atome est donc électriquement neutre (cf. figures 4 et 5).

2.2.2. Répartition des électrons

Dans le modèle de l'atome le plus couramment utilisé, tous les électrons ne sont pas liés de la même manière au noyau, ils se répartissent sur différentes couches notées, de la plus proche à la plus éloignée du noyau : les couches électroniques K, L, M. Ces couches électroniques sont remplies les unes après les autres dans l'ordre en partant de la couche K. Nombre maximum d'électrons (cf. figure 6).

Couche K : deux électrons

Couche L : huit électrons

Couche M : huit électrons

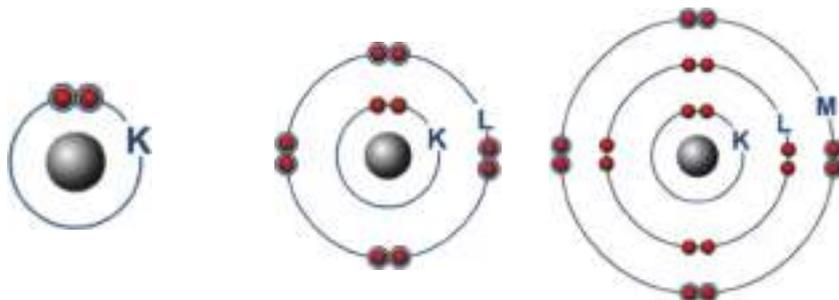


Figure 6 - Remplissage des couches selon le modèle de Bohr.

Exemples

Le Lithium ${}^3\text{Li}$

Le Carbone ${}^6\text{C}$

Le Silicium ${}^{14}\text{Si}$

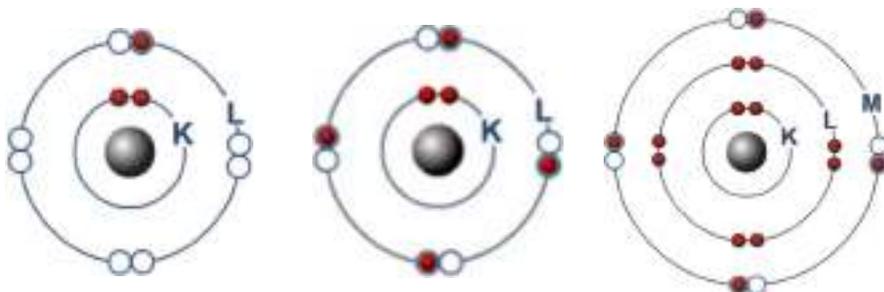


Figure 7 - Remplissage des couches pour le lithium, le carbone et le silicium.

Lorsqu'une couche électronique est pleine, on dit qu'elle est saturée. La couche externe est la dernière couche électronique occupée.

2.2.3. Modèle ou représentation de Lewis

La représentation de Lewis est une représentation conventionnelle qui permet de mettre en évidence les électrons sur la couche externe d'un atome et les liaisons entre les atomes constituant une molécule.

Dans la représentation de Lewis, le *noyau* et les électrons des couches internes sont représentés par le *symbole* de l'atome, alors que pour la couche externe les électrons célibataires (isolés) sont représentés par des points et les doublets (couple d'électrons) par des tirets (cf. figure 8).

		Nombre d'électrons de valence							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Nombre de couches électroniques	1	H							He
	2	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne
	3	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar
	4	K	Ca						

Figure 8 - Modèles de Lewis des vingt premiers éléments de la classification périodique.

2.2.4. Les gaz nobles

Seuls quelques éléments restent seuls à l'état atomique, car leurs propriétés ne leur permettent pas de se combiner à d'autres atomes. Ils se trouvent généralement à l'état gazeux et on les appelle les gaz nobles (appelés aussi gaz rares).

Ils se trouvent dans la dernière colonne de la classification périodique. Ils forment une famille un peu à part d'espèces chimiques extrêmement stables. Cette stabilité se traduit par un remplissage total de leur couche externe. Quelques exemples de gaz nobles : l'hélium, le néon, l'argon.

2.3. La molécule

2.3.1. Définitions

Une molécule est un ensemble électriquement neutre formé d'atomes liés entre eux par des liaisons covalentes. Une liaison covalente résulte de la mise en commun de

deux électrons de deux atomes différents. Le nombre de liaisons d'un atome correspond au nombre d'électrons qu'il doit gagner pour satisfaire la règle de l'octet, ou du duet pour l'hydrogène. Les propriétés chimiques d'un élément dépendent du nombre d'électrons qu'il possède sur sa couche externe.

Les expériences montrent que les éléments chimiques réagissent de façon à ce que leur couche externe ressemble à celle du gaz noble le plus proche (en général huit électrons sur la dernière couche).

2.3.2. Formation

Règle du «duet» : un atome est stable si la couche K correspond à la couche externe et comporte deux électrons.

Règle de «l'octet» : un atome est stable si la couche L ou la couche M correspond à la couche externe et comporte huit électrons.

Les atomes n'existent que très rarement à l'état isolé. Ils s'unissent généralement entre eux pour former des molécules. Dans une molécule, les atomes mettent en commun des électrons de leurs couches externes. Chacun d'eux s'entoure ainsi des électrons requis pour respecter la règle de l'octet (ou du duet pour l'atome d'hydrogène). Le nombre de liaisons que peut former un atome est égal au nombre d'électrons qu'il doit gagner pour obéir à la règle de l'octet.

Exemple de la molécule d'eau de formule H_2O

Les deux atomes d'hydrogène et l'atome d'oxygène ne sont pas stables lorsqu'ils sont seuls. Afin d'être stable, l'hydrogène doit contenir deux électrons dans sa couche électronique et l'atome d'oxygène doit contenir huit électrons dans sa couche électronique de valence. Pour arriver à cette stabilité, les atomes d'hydrogène et d'oxygène créent des liaisons covalentes l'un avec l'autre, tels qu'illustrés sur la figure 9.

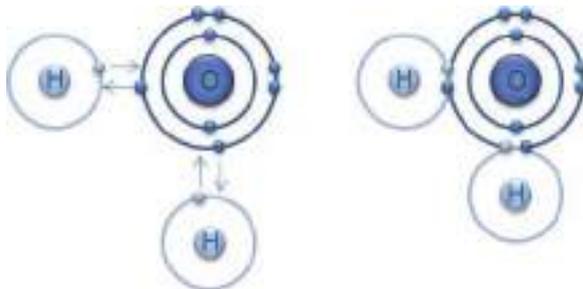


Figure 9 - Les liaisons covalentes d'une molécule d'eau.

Une liaison covalente entre deux atomes correspond à la mise en commun entre

ces deux atomes de deux électrons de leurs couches externes pour former un doublet d'électrons appelé doublet liant. Le doublet liant, mis en commun entre les deux atomes, est considéré comme appartenant à chacun des atomes liés.

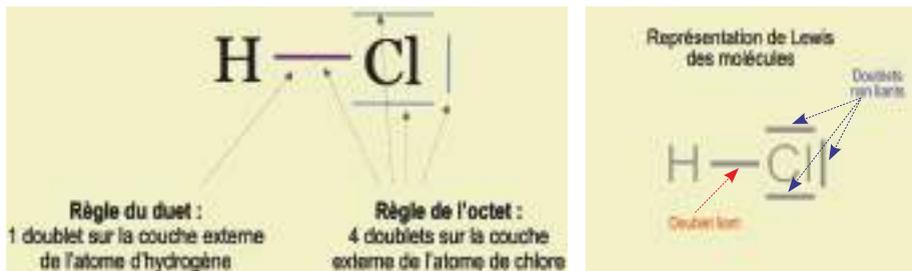


Figure 10 - Représentation de Lewis de la molécule de chlorure d'hydrogène.

2.3.2. Liaisons multiples

Pour satisfaire à la règle de l'octet, certains atomes sont liés entre eux par plusieurs doublets liants : ce sont des liaisons doubles (deux doublets liants) ou triples (trois doublets liants).

Exemples

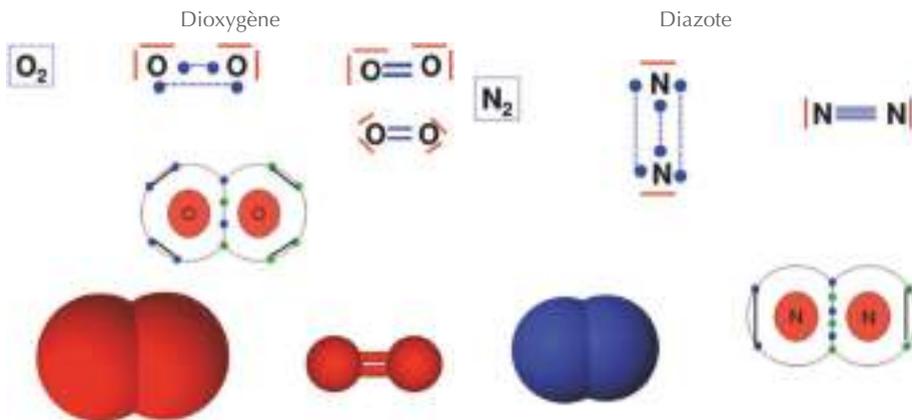


Figure 11 - Exemples de liaisons covalentes doubles ou triples.

2.4. Mole et masse molaire

2.4.1. La mole

Quelques grammes de matière contiennent des milliards de milliards d'atomes... Une unité de quantité de matière a été créée, la mole (notée n) dont le symbole est :

3.2. Premières difficultés et solutions adoptées

Les deux premières difficultés ont été d'une part de trouver des moments communs aux deux classes pour pouvoir échanger et d'autre part de pouvoir continuer à travailler sur le projet malgré le départ en stage de tous les élèves de terminale CAP bijou durant les quatre semaines avant les vacances de fin d'année. Les solutions adoptées :

- ◆ les élèves de première CAP bijou viendraient de 8 h 30 à 9 h en salle de sciences avant leur cours pour faire le point avec notre professeure Mme Anne Gomez qui ferait le lien avec l'avancée des travaux des élèves de terminale CAP bijou ;
- ◆ Mme Anne Gomez et M. David Chauvet (Assistant d'éducation, AED) ont créé un padlet⁽²⁾ sur l'ENT (Espace numérique de travail) du lycée permettant à tous les participants de poster, proposer, *via* Internet, leurs idées et recherches liées au projet et ainsi les rendre visibles de tous (cf. figure 14).

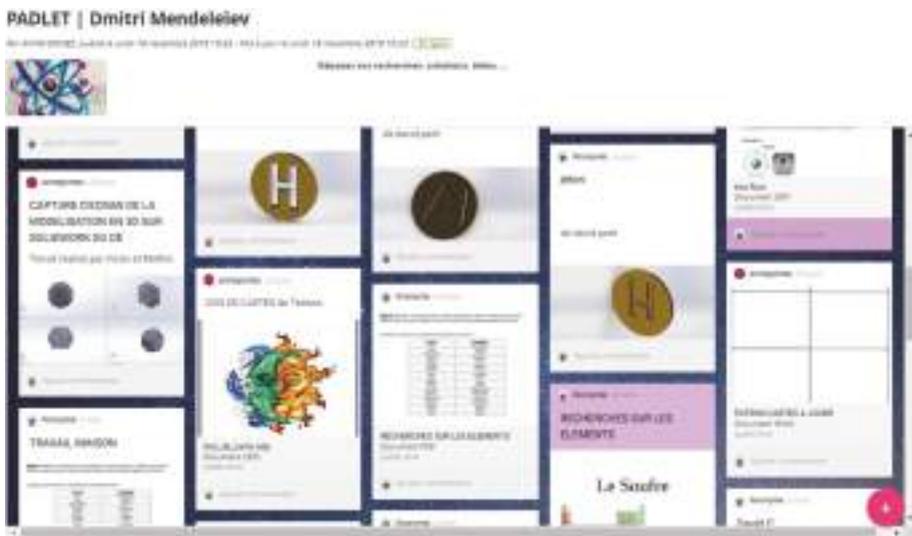


Figure 14 - Padlet créé sur l'ENT du lycée afin que les élèves y déposent leurs travaux.

3.3. Commencement du projet

Afin de mettre en avant notre domaine professionnel, nous avons eu deux idées :

- ◆ fabriquer un dé en métal ;

(2) Permet de construire des pages contenant des ressources à destination des élèves, en choisissant précisément les informations, ou de mettre en ligne très simplement les productions des élèves (textes, images, vidéos...). Enfin, ce « mur virtuel » peut aussi servir d'espace de travail collaboratif.

- ◆ utiliser la technique du gouaché pour le design des cartes.

3.3.1. Le dé en métal

Une question s'est présentée à nous dès le départ : quelle utilité dans le jeu de cartes ? Afin que le dé ait une réelle utilité dans le jeu, nous avons décidé que celui-ci serait lancé au début de chaque tour. Se sont posées alors à nous deux autres questions :

- ◆ quelle forme choisir pour le dé, avec combien de faces ?
- ◆ que faire figurer sur chacune des faces ?

Suite à un travail réalisé par les élèves de première CAP bijou en mathématiques avec Mme Anne Gomez sur les différentes formes de dés⁽³⁾, et sachant que seuls quinze des dix-huit éléments de notre jeu pouvaient intervenir dans la formation des molécules, nous avons fait le choix d'un dé en forme de dodécaèdre (à douze faces) avec, sur chacune des faces, le modèle de Lewis d'un élément.



Figure 15 - Dé modélisé sur Solidworks.

Il restait encore à déterminer quels éléments représenter parmi les quinze. Pour cela, nous devons partir d'une base pour les règles du jeu et faire un premier test.

3.3.2. La technique du gouaché

En arts appliqués nous travaillons une technique particulière appelée gouaché. Le gouaché est à la haute joaillerie ce que le patron est à la haute couture. Son nom vient tous simplement du fait qu'il est réalisé à la gouache. L'or est le seul métal que l'homme n'a pu reproduire. Seul le gouaché donne cette possibilité grâce aux pigments de certaines couleurs de jaunes. Le gouaché fait partie intégrante des métiers de l'art,

(3) Voir l'annexe 1 disponible sur le serveur de l'UdPPC.

d'excellence et de savoir-faire, conjuguant tradition, innovation et créativité. La base de travail, une feuille de papier gris ou un calque sur lesquels le designer pose les pierres et dessine la monture.

Il permet de mettre en couleur et en volumes les idées retenues lors de l'étape de création. Peint sur un papier gris, cette couleur met en valeur l'éclat des pierres. Il fait le lien entre le designer et le joaillier. Il doit être le plus réaliste et le plus précis possible afin de transmettre le plus d'informations possible au joaillier. Peu exposées, souvent tenues secrètes, ces petites œuvres d'art racontent à elles seules, une histoire qui commence sur du papier. Aujourd'hui, les maisons mettent en valeur ce savoir-faire d'exception et les présentent dans leurs catalogues comme de réels dessins d'art. Ces gouachés rejoignent ensuite les archives des maisons et contribuent à enrichir leur patrimoine. Nous avons donc décidé d'intégrer cette technique dans la réalisation du design de nos cartes (recto et/ou verso).



Figure 16 - Exemples de dessins réalisés avec la technique du gouaché.

3.3.3. Organisation et répartition des tâches

- ◆ Groupe 1 : élaboration des règles du jeu.
- ◆ Groupe 2 : travail sur le design du recto des cartes à jouer.
- ◆ Groupe 3 : travail sur le design du verso des cartes à jouer.
- ◆ Groupe 4 : travail sur le dé en métal.
- ◆ Groupe 5 : élaboration de tableaux *Excel* pour déterminer le nombre de cartes et le nombre de faces du dé.
- ◆ Groupe 6 : travail sur le plateau central regroupant les molécules à constituer à l'aide des cartes.
- ◆ Groupe 7 : travail sur la conception et la réalisation des jetons.
- ◆ Groupe 8 : travail sur le compte rendu du projet.
- ◆ Groupe 9 : travail sur la recherche d'informations utiles, pratiques ou amusantes sur les molécules du plateau.
- ◆ Groupe 10 : travail sur la mise en forme de la « notice » contenue dans la boîte de jeu.

3.4. Présentation des résultats en image

L'évolution du travail, les règles du jeu, les patrons et la vidéo de présentation sont en compléments de cet article et disponibles sur le site de l'UdPPC.



Figure 17 - Cartes Aléas, utilisées comme des « jokers ».



Figure 18 - Idée pour le dos des cartes.



Figure 19 - Différentes étapes de la réalisation du dé gravé en métal.

1° H ₂	(2 g · mol ⁻¹)	23° CH ₂ O	(30 g · mol ⁻¹)	45° CH ₃ NO	(45 g · mol ⁻¹)
2° O ₂	(32 g · mol ⁻¹)	24° C ₂ HO ₄	(44 g · mol ⁻¹)	46° Li ₂ O	(30 g · mol ⁻¹)
3° CO ₂	(44 g · mol ⁻¹)	25° C ₃ H ₄	(40 g · mol ⁻¹)	47° LiH	(8 g · mol ⁻¹)
4° H ₂ O	(18 g · mol ⁻¹)	26° CH ₄ O	(32 g · mol ⁻¹)	48° Li ₃ N	(35 g · mol ⁻¹)
5° N ₂	(28 g · mol ⁻¹)	27° C ₂ H ₄ O ₂	(60 g · mol ⁻¹)	49° Li ₂ O ₂	(46 g · mol ⁻¹)
6° Cl ₂	(70 g · mol ⁻¹)	28° C ₂ H ₂ O ₄	(90 g · mol ⁻¹)	50° LiOH	(24 g · mol ⁻¹)
7° CH ₄	(16 g · mol ⁻¹)	29° H ₂ O ₂	(34 g · mol ⁻¹)	51° LiF	(26 g · mol ⁻¹)
8° NH ₃	(17 g · mol ⁻¹)	30° CCl ₄	(152 g · mol ⁻¹)	52° CS ₂	(76 g · mol ⁻¹)
9° H ₂ S	(30 g · mol ⁻¹)	31° C ₂ HCl ₃	(130 g · mol ⁻¹)	53° HF	(20 g · mol ⁻¹)
10° SO	(48 g · mol ⁻¹)	32° CH ₂ Cl ₂	(84 g · mol ⁻¹)	54° F ₂	(38 g · mol ⁻¹)
11° Na ₂ S	(78 g · mol ⁻¹)	33° CHCl ₃	(118 g · mol ⁻¹)	55° BeO	(25 g · mol ⁻¹)
12° NaCl	(58 g · mol ⁻¹)	34° AlF ₃	(84 g · mol ⁻¹)	56° HNO	(31 g · mol ⁻¹)
13° MgO	(40 g · mol ⁻¹)	35° Mg ₃ N ₂	(100 g · mol ⁻¹)	57° Al ₂ S ₃	(150 g · mol ⁻¹)
14° Al ₂ O ₃	(102 g · mol ⁻¹)	36° MgH ₂	(26 g · mol ⁻¹)	58° BeH ₂	(11 g · mol ⁻¹)
15° LiCl	(42 g · mol ⁻¹)	37° CCl ₃ NO ₂	(163 g · mol ⁻¹)	59° BeCl ₂	(79 g · mol ⁻¹)
16° NaOH	(40 g · mol ⁻¹)	38° CF ₄	(88 g · mol ⁻¹)	60° PH ₃	(34 g · mol ⁻¹)
17° SiO ₂	(60 g · mol ⁻¹)	39° CHCl ₂ F	(102 g · mol ⁻¹)	61° AlCl ₃	(132 g · mol ⁻¹)
18° MgCl ₂	(94 g · mol ⁻¹)	40° CHN	(27 g · mol ⁻¹)	62° BF ₃	(68 g · mol ⁻¹)
19° CCl ₂ F ₂	(120 g · mol ⁻¹)	41° CH ₂ O ₂	(46 g · mol ⁻¹)	63° BCl ₃	(116 g · mol ⁻¹)
20° C ₂ H ₂	(26 g · mol ⁻¹)	42° CH ₃ Cl	(50 g · mol ⁻¹)	64° BN	(25 g · mol ⁻¹)
21° C ₂ H ₄	(28 g · mol ⁻¹)	43° CH ₄ S	(48 g · mol ⁻¹)		
22° CCl ₃ F	(136 g · mol ⁻¹)	44° COCl ₂	(98 g · mol ⁻¹)		

Figure 20 - Liste des molécules du plateau central.

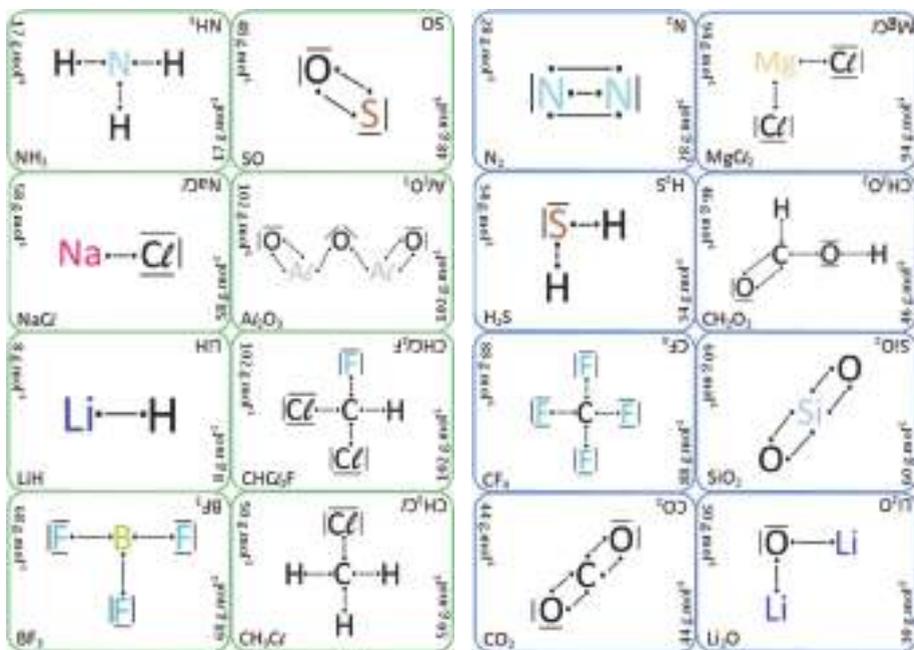


Figure 21 - Extrait du plateau central.



Figure 22 - Exemples de jetons modélisés sur Solidworks.

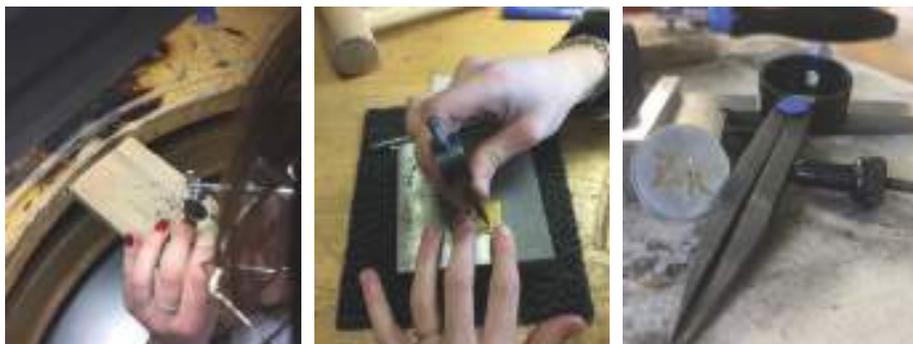


Figure 23 - Différentes étapes de la réalisation des jetons.



Figure 24 - Choix final pour la mise en forme de la notice.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont encadrés et permis de réaliser notre projet, à savoir, par ordre alphabétique :

- ◆ Mme Servane Appelle, professeure d'atelier bijou ;
- ◆ M. Salim Benbouabdellah, professeur de dessin technique ;
- ◆ M. David Chauvet, assistant d'éducation ;
- ◆ Mme Marie de Matos, auxiliaire de vie scolaire ;
- ◆ Mme Anne Gomez, professeure de math/sciences ;
- ◆ Mme Pascale Sicard, professeure d'arts appliqués ;
- ◆ Mme Iza Retailleau, assistante d'éducation ;
- ◆ Mme Cath Rychlinski, assistante d'éducation.

Un grand merci aussi à l'UdPPC qui nous a permis de vivre cette belle aventure. Et enfin, une mention très spéciale pour Nicolas Roquefort, apprenti photographe, pour les prises de vue et la réalisation de la vidéo de présentation.

Note de la rédaction

Depuis la présentation au *Concours «Mendeleïev 2019»* :

- ◆ ce projet a été sélectionné pour être présenté à la *Journée de l'innovation pédagogique 2020* organisée par le ministère de l'Éducation nationale et de la Jeunesse ;
- ◆ ce projet a été primé au concours C'Genial 2019⁽⁴⁾ ;
- ◆ une version commercialisable du jeu est actuellement à l'étude.

Compléments de l'article

Cet article comporte des compléments :

- ◆ *Annexe 1 (patrons des dés) ;*
- ◆ *Compte rendu original.pdf ;*
- ◆ *Vidéo réalisée par les élèves.m4v.*

L'ensemble est disponible sur le site de l'UdPPC sous la forme d'un fichier zippé 10220313.



Anne GOMEZ

*Professeure de lycée professionnel math-sciences
Lycée professionnel Clément de Pémillé
Graulhet (Tarn)*

(4) <https://cgenial.org/uploads/media/pdf/4e83741997434e4063a237c4db9f0b2e550c29e2-palmares-concours-2019.pdf>

L'Actualité Chimique

communiqué

contact **Séverine BLÉNEAU-SERDEL**
Société chimique de France - 75005 Paris
bleneau@lactualitechimique.org

SOMMAIRE DE MARS 2020

n° 449 (68 pages - version papier hors abonnement 20 € - version électronique 15 €)

À télécharger dès maintenant sur <http://www.lactualitechimique.org>

Au sommaire de ce numéro :

- ◆ À l'occasion du mois de mars, riche en événements et célébrations dédiés aux droits des femmes, *L'Actualité Chimique* consacre ce numéro aux **femmes scientifiques**. Vous y trouverez une réflexion sur la parité au sein de la Société Chimique de France et la création du groupe thématique « Femmes en chimie », un mot de la directrice générale de la Fondation L'Oréal, une discussion sur les origines de la situation actuelle des inégalités hommes/femmes en sciences et des pistes d'amélioration, l'interview d'une chimiste engagée dans la transmission auprès des jeunes, les recherches de deux femmes de talent consacrées aux hélicènes et aux carburants solaires, et le parcours de la première Japonaise chercheuse en France.
- ◆ **Et aussi** : le capitaine Nemo et les nouveaux matériaux issus des océans, les anneaux de Möbius moléculaires, la startup Seprosys spécialisée dans les techniques séparatives...



Éditorial

Pour une recherche scientifique inclusive.

Clin d'œil étymologique

À propos de la lysine.

Le grain de sel du RJ-SCF

Les filles et les femmes en science.

l'actualité chimique

Abonnez votre lycée pour un an à **L'Actualité Chimique**

Tarif spécial lycée

11 numéros par an
(y compris les numéros spéciaux)

- Abonnement papier + électronique
 - France métropolitaine 120 €
 - DOM-COM, UE, Suisse 168 €
 - Reste du monde 175 €
- Abonnement électronique seul
 - France/Étranger 70 €

L'Actualité Chimique, le journal de la Société Chimique de France, vous informe sur le monde de la chimie française, particulièrement en ce qui concerne la recherche scientifique, académique et industrielle et l'enseignement. Elle traite aussi des interfaces avec la chimie, comme le médicament, les matériaux et le génie des procédés.

Par ses numéros réguliers et ses numéros thématiques, cette revue est un outil indispensable pour tous, scientifiques et étudiants, notamment dans le cadre de la préparation des TPE ou TIPE.

Elle fournit également pour les enseignants une source irremplaçable d'articles scientifiques, d'informations et de réflexions sur la vie et l'évolution des sciences chimiques, qu'ils seront heureux de trouver pour construire leur enseignement.



Abonnements et adhésions :

SCF, 250 rue Saint-Jacques, F-75005 Paris – Tél. : + 33 (0)1 40 46 71 66/60.
adhesion@societechimiquedefrance.fr – www.societechimiquedefrance.fr

Rédaction :

SCF, 28 rue Saint-Dominique, F-75007 Paris – Tél. : + 33 (0)1 40 46 71 64.
redaction@actualitechimique.org – www.actualitechimique.org



Femmes et sciences

Femmes managers : une légitimité à conquérir ♦ Recherche, engagement, passion : le portrait de Céline Pagis.

À propos de

Le capitaine Nemo utiliserait-il ces nouveaux matériaux issus des océans ? ♦ Vous pouvez le dire en français... : une nouvelle liste de termes généraux de la chimie et des matériaux.

Recherche et développement

Les anneaux de Möbius moléculaires ♦ Les hélicènes et les ions métalliques : une combinaison gagnante ♦ La production de carburants solaires : quand plus épais est synonyme de plus efficace !

Principes et substances actifs

Nouveaux principes actifs pharmaceutiques et nouvelles substances actives phytopharmaceutiques.

Industrie

Startups : Seprosys – Les techniques séparatives : vers la valorisation et le recyclage des matières.

Enseignement et formation

« 118 élèves pour 118 éléments ».

Histoire de la chimie

Toshiko Yuasa (1909-1980), une Japonaise chercheuse en France : correspondance avec Frédéric Joliot-Curie (1900-1958).

Libre opinion

Recherche thérapeutique et modèles animaux : faut-il supprimer l'expérimentation animale ?

Un point sur

Fiche n° 74 : Des nanomatériaux composites à libération de médicaments sous lumière infrarouge.

Le sommaire détaillé, les résumés et certains articles et rubriques en téléchargement libre sont disponibles sur le site de *L'Actualité Chimique* :

<http://www.lactualitechimique.org>

N'hésitez pas à visiter le site où vous attendent aussi les archives d'une grande partie des anciens numéros, ainsi que les rubriques d'actualité et de nombreux d'articles, plus récent.



Séverine BLÉNEAU-SERDEL

Rédactrice en chef adjointe

Société chimique de France

Paris

Parus au BO

Les derniers bulletins officiels

par **Jean WINTHER**
75015 Paris
winther.jean@gmail.com

La sélection ci-dessous est également disponible sur le serveur de l'UdPPC :
<http://www.udppc.asso.fr> – Rubrique « Lu et testé » Dans le BO »



Bulletin Officiel n° 12

19 mars 2020

◆ **Baccalauréat (série STL) :**

Épreuve d'évaluation des compétences expérimentales (session 2020) – Note de service n° 2020-055 du 6 mars 2020.

◆ **Concours général des lycées :**

Calendrier des épreuves d'admission pour les disciplines technologiques (session 2020) – Note de service n° 2020-049 du 28 février 2020.

Bulletin Officiel n° 8

20 février 2020

◆ **Baccalauréat (série S) :**

Épreuves de physique-chimie et de sciences de la vie et de la Terre : évaluation des compétences expérimentales (session 2020) – note de service n° 2020-041 du 14 février 2020.



Jean WINTNER
Professeur retraité
Paris

Prix Perrin de Brichambaut 2020

Appel à candidatures

Le prix Perrin de Brichambaut a été créé en 1997 par l'association Météo et Climat afin d'honorer la mémoire de Christian Perrin de Brichambaut (1928-1995), ancien ingénieur à Météo-France et ancien président de Météo et Climat qui a beaucoup œuvré en faveur de la vulgarisation scientifique.



LE CONCOURS

Règlement et modalités

Ce concours s'adresse aux écoles **primaires**, aux **collèges** et aux **lycées** qui réalisent au cours de l'année scolaire 2019-2020 un projet sur le thème de la météorologie, du climat et disciplines connexes explicitant un lien avec ces deux thématiques (développement durable, eau, environnement, énergie...). Les établissements scolaires étrangers sont autorisés à concourir dans la mesure où le projet soumis et ses annexes sont rédigés en langue française.

Les dotations

1^{er} prix : 700 € ♦ 2^e prix : 500 € ♦ 3^e prix : 300 €.

Comment concourir au prix 2020 ?

Il suffit d'envoyer un dossier par courriel comprenant :

- ♦ Votre **lettre de candidature** mentionnant les coordonnées postales de l'établissement, l'adresse courriel et le numéro de téléphone de l'enseignant responsable du projet, le niveau de la classe participant au concours.
- ♦ Le **titre du projet** accompagné d'un **descriptif détaillé** (une page A4 maximum).
- ♦ **Tous les supports** permettant au jury d'apprécier le projet : dossier illustré, présentation *Powerpoint*, vidéos, liens vers un site web...

Le jury

Les projets sont évalués par un jury composé de météorologistes et d'enseignants. La démarche scientifique, l'implication des élèves et la présentation des projets sont des critères majeurs d'appréciation.

Attribution des prix

Les projets reçus seront examinés par le jury, et la décision d'attribution des prix sera communiquée avant la fin de l'année scolaire. Le premier prix sera remis dans l'établissement lauréat en juin 2020.

RENSEIGNEMENTS ET INSCRIPTIONS

Où envoyer le dossier ?

Météo et Climat
73 avenue de Paris - 94165 Saint-Mandé Cedex
ou par courriel : info@meteoetclimat.fr

Date limite du dépôt du dossier

20 mai 2020

Date de réception de votre candidature par courriel ou dans nos bureaux de Saint-Mandé. Veuillez tenir compte des délais postaux.

Contact

Météo et Climat - Tél. : 01 49 57 18 79
info@meteoetclimat.fr - <http://www.meteoetclimat.fr>

Concours organisé par l'association Météo et Climat, avec le soutien de Météo-France.

L'UdPPC au fil des jours...

FORUM DES ENSEIGNANTS INNOVANTS

(Paris, parc des expositions de la porte de Versailles, samedi 23 novembre 2019)

Le samedi 23 novembre 2019 s'est déroulé le 11^e forum des enseignants innovants, traditionnellement organisé par le Café pédagogique. Cette année, le journal *Libération* s'est associé à cet événement. Philippe Fargeix y a représenté l'UdPPC⁽¹⁾.

Cent projets pédagogiques, disciplinaires ou interdisciplinaires, sur les deux cents soumis par les enseignants, ont été présentés par leurs concepteurs. Un jury composé de professeurs, membres de dix associations professionnelles, dont l'UdPPC, et de représentants du Café pédagogique a décerné cinq prix. Le public venu en nombre, quant à lui, en a attribué cinq autres.

L'après-midi a été consacrée à des débats et des conférences. Un de ces débats a porté sur la question, l'innovation pédagogique peut-elle changer l'école ?

L'ensemble des projets résumés sont répertoriés à l'adresse :

<http://enseignants-innovants-2019.net/projets.php>

Le Bureau national
Le 11 mars 2020

(1) Voir le compte-rendu complet dans *Le Bup* n° 1021 de février 2020, p. 220-222.

Sur votre agenda...

Retrouvez en ligne dès maintenant toutes les manifestations à partir du site de l'UdPPC :
<http://www.udppc.asso.fr/national/index.php/sur-votre-agenda>

Les mercredi 1^{er} et jeudi 2 avril 2020

36^{es} Olympiades nationales de la chimie

Le thème : « Chimie dans la ville ».

Deux concours : scientifique (1^{er} et 2 avril 2020) et « Parlons chimie » (2 avril 2020).

Remise des prix : 3 avril 2020.

Du lundi 6 au mercredi 15 juillet 2020

Les 52^{es} Olympiades internationales de chimie (IChO)

Istanbul (Turquie).

Du samedi 18 au dimanche 26 juillet 2020

Les 51^{es} Olympiades internationales de physique (IPhO)

Vilnius (Lituanie).

Du dimanche 25 au mercredi 28 octobre 2020

68^e congrès des professeurs de physique et de chimie

Le thème : « Place aux sciences » - Nancy.

Le mercredi 2 décembre 2020

Concours interacadémique des Olympiades de Physique France.

Les vendredi 29 et samedi 30 janvier 2021

Finale du XXVIII^e concours national des Olympiades de Physique France - Bordeaux.

Réunions du Bureau national, Assemblée générale et du Conseil de l'association

Afin que vous puissiez soumettre des questions que vous voulez voir traitées aux instances nationales de l'association, nous faisons figurer ici les dates de ces réunions.

- ◆ Les prochaines réunions du Bureau national se tiendront les 13 mai et 2 juin 2020.
- ◆ L'Assemblée générale se tiendra le samedi 13 juin 2020 à 10 h à l'Université Paris-Diderot (Paris 7) - Bâtiment « la Halle aux Farines » - 16 rue François Dolto - Paris 13^e. Elle sera suivie de la réunion du Conseil à 17 h.

Les membres du Conseil

Les présidents d'honneur (cf. ci-dessous), les membres du Bureau national (cf. pages II et III) et les présidents des sections académiques (cf. pages IX à XV) font, de droit, partie du Conseil de l'Union des professeurs de physique et de chimie (UdPPC).

Les membres d'honneur

◆ M. Alain Aspect

Membre de l'Académie des sciences
Membre de l'Académie des technologies
Institut d'optique d'Orsay

◆ M. Michel Boyer

Professeur émérite à l'Université Paris VI
Ancien président des Olympiades nationales de la chimie

◆ M. Claude Cohen-Tannoudji

Membre de l'Académie des sciences

Professeur au Collège de France

Prix Nobel

◆ M. Jean-Marie Lehn

Membre de l'Académie des sciences
Professeur au Collège de France
Prix Nobel

◆ M. Pierre Léna

Membre de l'Académie des sciences
Professeur émérite - Université Denis-Diderot

◆ M. Yves Quéré

Membre de l'Académie des sciences

Les présidents d'honneur

André Durupthy, Jean-Pierre Foulon, Jacques Gatecel, Micheline Izbicki, Jean-Charles Jacquemin, Josette Maurel, Vincent Parbelle, Madeleine Sonnevile, Jacqueline Tinnès et Alain Touren.

Les membres élus (renouvelable par tiers chaque année)

2017 : Florent Goitia, Françoise Kibongui, Jean-Marie Laugier, Dany Launer (2019⁽¹⁾), Nathalie Lebrun, Caroline Luc, Julie Scala et Lauriane Teulé.

2018 : Denis Chadebec, Arnaud Cordonnier, Dominique Ducourant, Cécile Dussine, Mellie Lacave, Ludovic Lopes, Jean-Christophe Nazé et David Rouvel.

2019 : Guy Bouyrie, Emma Gosse, Sylvain Moreggia, François Passebon, Roseline Primout, Damien Scimeca, Abdessamad Seffar et Isabelle Tourtier.

(1) Élu sur poste devenu vacant en cours de mandat.

Les membres du Bureau national

Présidente

Marie-Thérèse Lehoucq

Questions générales - Lycée

presidence@udppc.asso.fr

Vice-présidents

Hervé Demorgny

Lycée général et technologique

herve.demorgny@wanadoo.fr

Jan Duda

Lycée

jan.duda@ac-amiens.fr

Philippe Goutverg

Voies technologiques - Laboratoire - Site Web

philippe.goutverg@libergier.fr

Trésorier

Jan Duda - UdPPC - 42 rue Saint-Jacques - 75005 PARIS

Fonctionnement interne

tresorerie@udppc.asso.fr

Secrétaire général

Vincent Parbelle

Réforme du lycée - Relations internationales

parbelle.udppc@gmail.com

Rédacteur en chef du Bup

Gérard Dupuis

Rédaction du Bup - Olympiades internationales de chimie

lebup.redaction@udppc.asso.fr

Membres

Cécile Dussine

Coresponsable collège
cecile.dussine@outlook.fr

Florent Goitia

Coresponsable collège
f.goitia@protonmail.com

Guillaume Minier

Lycée
guillaume.minier@ac-rennes.fr

Florent Pannetier

Chimie - Enseignement supérieur
florent_pannetier@hotmail.com

Chargé(e)s de mission auprès du Bureau national

Guy Bouyrie

Correspondant TICE - Programmes du lycée
gbouyrie@gmail.com

Julien Calafell

Olympiades nationales de la chimie
julien.calafell@gmail.com

Bernard Ciroux

Culture scientifique
b.ciroux@gmail.com

Paul Cousandier

Collège - Veille du site Web national
paul.cousandier@free.fr

Dominique Ducourant

Collège - Relations avec l'Académie des sciences
domi.ducourant@orange.fr

Catherine Gautier

Coordination de l'organisation des congrès
catherine.gautier@protonmail.ch

Philippe Robert

Lycée général et technologique
robert_philippe@orange.fr

Sophie Robert

Coresponsable collège - Formation des professeurs
robert.pissis@wanadoo.fr

Marion Tironneau

Sécurité au laboratoire
science.tironneau@gmail.com

Jacques Vince

Réforme du lycée - Formation des professeurs
jvince@free.fr

André Gilles

Relations avec la Société chimique de France (SCF)
gillesandre@gmail.com

Alain Jouve

Olympiades de physique France
alain.jouve@wanadoo.fr

Olivier Kempf

Assistance informatique au secrétariat de rédaction du Bup et au secrétariat des abonnements - Gestion de BupDoc, Nous avons lu et BO - Mise en place du nouveau site Web
kempf.olivier@orange.fr

Thierry Martin

Serveur informatique
thierry.martin@ac-toulouse.fr

Le Bup

Bulletin de l'Union des Professeurs de physique et de chimie

Publication des articles

Les articles doivent être composés sous *Microsoft Word* ou *Open Office*. Pour des raisons de compatibilité de polices de caractères, fournir également une version pdf. Les fichiers doivent être envoyés par courrier électronique à la secrétaire de rédaction :

lebup.secretaire@udppc.asso.fr

En cas de problème de police ou de mise en page, une impression papier témoin peut également être adressée à :

Union des professeurs de physique et de chimie
À l'attention du rédacteur en chef
42 rue Saint-Jacques - 75005 PARIS
Tél. : 01 40 46 83 80

Un article trop volumineux pour être transmis par courriel, pourra être déposé sur un site de transfert et le lien de téléchargement envoyé à la secrétaire de rédaction.

Dès réception, l'expéditeur est avisé (ne pas oublier de fournir une adresse postale complète, une adresse courriel, un numéro de téléphone, une photo d'identité, la profession et l'établissement). Les manuscrits sont ensuite soumis, par le comité de rédaction, au comité de lecture pour avis. L'avis du comité de lecture est strictement anonyme. Le comité de rédaction donne ou refuse son accord à la publication ou demande des modifications. L'auteur en est immédiatement avisé. En cas d'acceptation, aucun engagement sur la date de publication ne peut être fourni. L'auteur reçoit les épreuves (BAT) de son article par courrier électronique, afin de vérifier sa conformité à l'original et s'engage à renvoyer les épreuves corrigées dans les huit jours suivant leur réception. Après publication, il reçoit un fichier pdf de l'article sous sa forme définitive.

Recommandations aux auteurs

Un document récapitulatif plus détaillé des principales consignes concernant la présentation des articles ainsi qu'un fichier « modèle » vide sont disponibles sur le serveur de l'UdPPC à l'adresse :

<https://www.udppc.asso.fr> - Rubrique : « Qu'est-ce que l'UdPPC ? » ➡ Vous voulez écrire un article »

Concernant les figures

- ◆ Celles-ci seront insérées dans le texte, ou leur position repérée clairement.
- ◆ Fournir impérativement les fichiers séparés originaux de chaque image scannée ou photo au format jpeg, tif ou eps dans une définition au minimum de 300 dpi. Si la photo a été recadrée, ou redimensionnée, fournir le fichier original qui sera utilisé lors de la composition.

Adhésion et abonnement pour 2020

Les tarifs

Vous souhaitez adhérer et/ou vous abonner au *Bup* à titre individuel, vous pouvez le faire :

- ◆ par Internet : <https://www.udppc.asso.fr> - Rubrique : « Adhérer »
- ◆ par voie postale à : Union des professeurs de physique et de chimie
42 rue Saint-Jacques - 75005 PARIS

Dans tous les cas votre adhésion/abonnement ne seront validés qu'après enregistrement de votre paiement.

Remarques

- ◆ L'UdPPC propose aux étudiants et stagiaires une adhésion et un abonnement à tarifs privilégiés (remise de 50 %) ;
- ◆ L'UdPPC propose à tous ses adhérents deux types d'abonnement :
 - un abonnement papier ;
 - un abonnement en ligne uniquement.

L'ensemble des *Bup* depuis 1907 jusqu'à 2015 inclus peut être consulté en ligne gratuitement. Les numéros à partir de 2016 ne sont accessibles qu'aux adhérents/abonnés à partir de l'« Accès aboné(e)s » sur le site.

Nouveautés depuis 2017

- ◆ Si vous êtes dans un établissement abonné au *Bup* et que vous lisez ce bulletin, sachez qu'en adhérant à l'association, vous pourrez, en indiquant lors de votre adhésion le numéro UAI (ex RNE) de votre établissement, avoir accès en ligne à tous les articles publiés dans la revue.
- ◆ L'association souhaite également relancer le rôle des correspondants d'établissement : en devenant correspondant d'établissement si votre lycée ou votre collège n'en possède pas et en motivant trois collègues à adhérer à l'association, vous bénéficierez également d'un abonnement en ligne gratuit au *Bup*. N'hésitez pas à nous contacter si vous êtes partant⁽¹⁾.

Nouveauté à la rentrée 2019-2020

- ◆ Depuis de la rentrée 2019-2020, l'abonnement qui était jusqu'ici en année civile (du 1^{er} janvier au 31 décembre) deviendra en année glissante au 1^{er} janvier 2020 et une relance vous sera automatiquement envoyée à l'échéance de votre adhésion ou de votre abonnement.

(1) Écrivez à : abonnement@udppc.asso.fr

1. RÉCAPITULATIF DES TARIFS D'ADHÉSION ET D'ABONNEMENT

Pour les individuels

Depuis janvier 2015, vous recevez les dix numéros du *Bup* reliés en quatre fascicules (janvier/février/mars ; avril/mai/juin ; juillet/août/septembre ; octobre/novembre/décembre).

Code tarif	Désignation	Détail des tarifs pour les individuels				Total TTC
		Adhésion	Abonnement papier	Abonnement électronique	Frais postaux	
INDIVIDUEL : ADHÉSION SEULE						
1	Adhésion	30 €	-	-	-	30 €
2	Adhésion pour stagiaires, étudiants...	15 €	-	-	-	15 €
3	Adhésion dans une collectivité déjà abonnée	30 €	-	-	-	30 €
INDIVIDUEL : ABONNEMENT PAPIER NON-MEMBRE						
10	Abonnement papier non-membre (métropole)	-	75 €	-	-	75 €
11	Abonnement papier non-membre (hors métropole)	-	75 €	-	15 €	90 €
INDIVIDUEL : ADHÉSION + ABONNEMENT ÉLECTRONIQUE						
20	Adhésion + abonnement électronique	30 €	-	28 €	-	58 €
21	Adhésion + abonnement électronique pour stagiaires, étudiants...	15 €	-	14 €	-	29 €
22	Adhésion + abonnement articles numériques collège	30 €	-	5 €	-	35 €
INDIVIDUEL : ADHÉSION + ABONNEMENT PAPIER ET ÉLECTRONIQUE						
30	Adhésion + abonnement papier et électronique (métropole)	30 €	-	38 €	-	68 €
31	Adhésion + abonnement papier et électronique (hors métropole)	30 €	-	38 €	15 €	83 €
32	Adhésion + abonnement papier et électronique pour stagiaires, étudiants...	15 €	-	19 €	-	34 €

Pour les collectivités

Depuis la rentrée 2019-2020, l'abonnement collectivités passera en année glissante. L'abonnement consiste en dix numéros par an reliés en quatre fascicules (janvier/février/mars ; avril/mai/juin ; juillet/août/septembre ; octobre/novembre/décembre).

Code tarif	Désignation	Détail des tarifs pour les collectivités				Total TTC
		Adhésion	Abonnement papier	Abonnement électronique	Frais postaux	
COLLECTIVITÉ : ABONNEMENT						
40	Abonnement lycée (métropole)	-	136 €	-	-	136 €
41	Abonnement lycée (hors métropole)	-	136 €	-	15 €	151 €
42	Abonnement collège (métropole)	-	102 €	-	-	102 €
43	Abonnement collège (hors métropole)	-	102 €	-	15 €	117 €
44	Abonnement université électronique	-	-	500 €	-	500 €
COLLECTIVITÉ : ABONNEMENT PAR AGENCE						
50	Abonnement lycée par agence (métropole)	-	122,40 €	-	-	122,40 €
51	Abonnement lycée par agence (hors métropole)	-	122,40 €	-	15 €	137,40 €
52	Abonnement collège par agence (métropole)	-	91,80 €	-	-	91,80 €
53	Abonnement collège par agence (hors métropole)	-	91,80 €	-	15 €	106,80 €

Les publications hors abonnement et numéros anciens

	Numéro ou année	Prix version papier	Prix version électronique	Prix total
LE BUP PHYSIQUE CHIMIE				
Tous les articles du <i>Bup</i> de 1907 à 2015 (n° 1 à 979) sont en consultation gratuite dans <i>BupDoc</i> : https://www.udppc.asso.fr/ - Rubrique : « Le bulletin » ⇒ BupDoc archives du Bup »				
Numéros thématiques				
● « Les 150 ans du tableau périodique » (256 pages - format A5)	 1016	28 €	21 €
Numéros ordinaires (parution trimestrielle : disponible à partir du n° 980 au n° 1019)				
● 1 ^{er} trimestre (janvier-février-mars)	35 €	21 €
● 2 ^e trimestre (avril-mai-juin)
● 3 ^e trimestre (juillet-août-septembre)
● 4 ^e trimestre (octobre-novembre-décembre)
Numéros ordinaires (parution trimestrielle : disponible à partir du n° 1020)				
● 1 ^{er} trimestre (janvier-février-mars)	Non vendu	21 €
● 2 ^e trimestre (avril-mai-juin)
● 3 ^e trimestre (juillet-août-septembre)
● 4 ^e trimestre (octobre-novembre-décembre)
Article paru				
● Disponible sur le site de l'UdPPC à la vente	-	Non vendu	7 € =
			Total €
Frais d'expédition				
(Pour un bulletin en version papier ajouter : 5 € pour la France - 10 € pour l'étranger)			 €
Montant de la commande (total + frais d'expédition)			 €

● Disponible en version papier - ● Disponible en version papier et/ou électronique - ● Disponible en version électronique.

Les responsables des sections académiques

Aix - Marseille (région Provence-Alpes-Côte d'Azur)

Présidente et Courrier : Nathalie BARDE - pa_aix-marseille@udppc.asso.fr

Vice-président : François DURUPHTY - fduruphty@hotmail.fr

Secrétaire : Marie-Aimée ATGER - claude.atger@wanadoo.fr

Trésorière : Anne-Laure RAMON - al.dom13@orange.fr

Chimie : Michel BARDE - lesbarde@club-internet.fr

Chimie (olympiades) : Michel BARDE - lesbarde@club-internet.fr

Collège : Contacter les responsables « collège » nationaux (voir page XV)

Formation des maîtres : Michel BARDE - lesbarde@club-internet.fr

Informatique : Marie-Agnès MARTENS - agnes.martens@gmail.com

Relations enseignement supérieur : Jean-Marie LAUGIER - laugierj@up.univ-mrs.fr

Autres membres : Michel FANGUET - michel.fanguet@orange.fr ♦ Rosine FANGUET - rosine.fanguet@orange.fr

Amiens (région Hauts-de-France)

Courrier : Jan DUDA - pa_amiens@udppc.asso.fr

Chimie (olympiades) : Jan DUDA - jan.duda@ac-amiens.fr

Collège : Contacter les responsables « collège » nationaux (voir page XV)

Physique (olympiades) : Jan DUDA - jan.duda@ac-amiens.fr

Besançon (région Bourgogne-Franche-Comté)

Courrier : Anne-Marie STUDER - pa_besancon@udppc.asso.fr

Collège : Contacter les responsables « collège » nationaux (voir page XV)

Enseignement technologique : Anne-Marie STUDER - anne-marie.studer@ac-besancon.fr

Bordeaux (région Nouvelle Aquitaine)

Président et Courrier : Pierre DUPLAA - pa_bordeaux@udppc.asso.fr

Vice-président : Ali RAIMI - ali.raimi@gmail.com

Trésorier : Michel PAYA - paya.michel33@orange.fr

Trésorière adjointe : Laurence LOZANO - laurence.lozano@gmail.com

Collège : Roseline PRIMOUT - roseline.primout@ac-bordeaux.fr

Enseignement technologique (STL) : Christophe GOUCHET - christophe.gouchet@ac-bordeaux.fr ♦

Enseignement technologique (STI2D) : Marc KEFER - marc.kefer@ac-bordeaux.fr

Physique (olympiades) : Sylvie CUENOT - sylvie.cuenot@ac-bordeaux.fr ♦ Laurence LOZANO - laurence.lozano@gmail.com

Relations enseignement privé : Laurence LOZANO - laurence.lozano@gmail.com

Relations enseignement supérieur : Ali RAIMI - ali.raimi@gmail.com ♦ Isabelle MULLER - isabellemuller33@yahoo.fr

Webmestre : Christophe GOUCHET - christophe.gouchet@ac-bordeaux.fr ♦ Denis MONNEREAU - denis.monnerEAU@ac-bordeaux.fr

Autres membres : Claude BENOÎT - claude.benoit33470@gmail.com ♦ Vincent BESNARD - vincent.besnard@ac-bordeaux.fr ♦

Guy BOUYRIE - gbouyrie@gmail.com ♦ Vanina MONNET - vaninamonnet@orange.fr

Caen (région Normandie)

Voir académie de Rouen et région Normandie.

Clermont-Ferrand (région Auvergne-Rhône-Alpes)

Président et Courrier : Philippe FARGEIX - pa_clermont-ferrand@udppc.asso.fr
 Secrétaire : Christelle LEBRUN - gaulierchristelle@gmail.com
 Trésorier : Laurent BIGNET - bignet.laurent10@orange.fr
 Chimie (olympiades) : Frédérique CHAPTAL - fchaptal@ac-clermont.fr
 Collège : Laila MARGOUM - laila.margoum@gmail.com
 Enseignement technologique : Joël JAUSSAUD - joel.jaussaud@ac-clermont.fr
 Physique (olympiades) : Philippe FARGEIX - fargphi1@free.fr
 Relations enseignement supérieur : Stéphanie MORTIER - smortier@cegetel.net

Corse (région Corse)

Présidente et Courrier : Véronique MAROSELLI - pa_corse@udppc.asso.fr
 Vice-présidente : Céline CASTEL - ce.castel@laposte.net
 Trésorière : Véronique MAROSELLI - maroselli.veronique@gmail.com
 Collège : Marie-Catherine TAFANI - marie-cath.tafani@ac-corse.fr
 Chimie (olympiades) : Philippe GRAZIANI CAUNANT - p.graziani@wanadoo.fr
 Enseignement technologique : Émilie GUIDICELLI - em.guidicelli@gmail.com
 Lycée : Émilie BERTHET - emilie-berthet@orange.fr
 Physique : Corinne AVENOSO - corinne.avenoso@free.fr

Dijon (région Bourgogne-Franche-Comté)

Voir académie de Besançon et région Bourgogne-Franche-Comté.

Grenoble (région Auvergne-Rhône-Alpes)

Présidente et Courrier : Catherine GAUTIER - pa_grenoble@udppc.asso.fr
 Vice-présidentes : Sandrine PIERRE - pierre_sand@hotmail.com ♦ Mellie LACAVERIE - mellielacave@gmail.com
 Secrétaire : Stéphanie LARBAUD - stephanie.larbaud@wanadoo.fr
 Secrétaire adjoint : Gilles SCHAFF - gilles.schaff26@orange.fr
 Trésorier : Nicolas SARD - nicolas.sard@ac-grenoble.fr
 Trésorière adjointe : Martine SANQUER - mm.sanquer@wanadoo.fr
 Chimie (olympiades) : Christophe GAUTHIER - christophe-gauthier@orange.fr ♦ Maria VUONG - vuong56@aliceadsl.fr
 Collège : Sandrine PIERRE - pierre_sand@hotmail.com
 Enseignement technologique (STL) : Laurence FOUILLOUX BUTTARD - laurence.fouilloux@orange.fr
 Enseignement technologique (STI2D) : Fabrice BUTHION - bufab@orange.fr
 Physique (olympiades) : Catherine GAUTIER - catherine-gautier@protonmail.ch
 Webmestre : Maryline LE MEUR-PIQUE - maryline.le-meur@ac-grenoble.fr ♦
 Christophe GAUTHIER - christophe.gauthier@orange.fr ♦ Victor POLICARPO - victor.policarpo@gmail.com
 Correspondante avec UGA et GePhyX : Stéphanie LARBAUD - stephanie.larbaud@wanadoo.fr
 Correspondante équipes techniques : Maria VUONG - vuong56@aliceadsl.fr
 Correspondante INSPÉ : Évelyne CHEVIGNY - evelyne.chevigny@ac-grenoble.fr
 Correspondant SFP et APMST : Gilles BAUDRANT - g-baudrant@wanadoo.fr
 Autres membres : Henri BERGER - henri.j.berger@wanadoo.fr ♦ Guillaume CHATELAN - gchatelan@hotmail.com ♦
 Annie GUILLOT - annieguillot73@orange.fr ♦ Didier PETITJEAN - didier.petitjean@ac-grenoble.fr ♦
 Sébastien ROCH - sebastien.roch@ac-grenoble.fr

Créteil (région Île-de-France)

Voir académie de Paris - Créteil - Versailles (région Île-de-France).

Guadeloupe

Courrier : Jocelyn LUBINO - pa_guadeloupe@udppc.asso.fr

Collège : Contacter les responsables « collège » nationaux (voir page XV)

La Réunion

Plus de section académique pour le moment

Lille (région Hauts-de-France)

Président et Courrier : Vincent VANDEWALLE - pa_lille@udppc.asso.fr

Trésorier : Jérôme BAILLEUL - j.bailleul10@gmail.com

Chimie (olympiades) : Aurélien MONCOMBLE - aurelien.moncomble@univ-lille.fr

Collège : Geoffroy LAMIRAND - geoffroy.lamirand@ac-lille.fr

CPGE : Gérard DUPUIS - gerarddupuis@infonie.fr

Enseignement technologique : Christophe FRANQUE - christophe.franque@ac-lille.fr

Lycée : Léandre MACHIN - leandre.machin@gmail.com

Physique (olympiades) : Arnaud DURIEUX - arnaud.durieux@ac-lille.fr ♦ Stéphane LESPINASSE - stephane.lespinasse@ac-lille.fr

Université : Nathalie LEBRUN - nathalie.lebrun@univ-lille.fr

Limoges (région Nouvelle Aquitaine)

Président et Courrier : Romain LUCAS - pa_limoges@udppc.asso.fr

Vice-présidente : Sophie RÉMY - sophie.remy@ac-limoges.fr

Trésorière : Anne-Marie BOURZAT-DUPUY - am-dupuy@orange.fr

Collège : Contacter les responsables « collège » nationaux (voir page XV)

Relations avec l'université : Christophe GENIN - christophe.genin@unilim.fr

Lyon (région Auvergne-Rhône-Alpes)

Présidente et Courrier : Laure LUCAS-FRADIN - pa_lyon@udppc.asso.fr

Trésorier : Jean-Marie BIAU - jm.biau@free.fr

Collège : Cécile DUSSINE - cecile.dussine@outlook.fr

Chimie (olympiades) : Jean-Baptiste ROTA - jean-baptiste.ropa@ac-lyon.fr

Concours Mendeleïev : Anne LAURENT - laurent.prof@free.fr

CPGE : Cécile VINCE - cecilevince@free.fr ♦ Marc VINCENT - marc.vincent@ac-lyon.fr

Laboratoire : Patrick ROCHET - patrick.rochet@ac-lyon.fr

Physique (olympiades) : Alain JOUVE - alain.jouve@wanadoo.fr

Sécurité : Patrick ROCHET - patrick.rochet@ac-lyon.fr

Autres membres : Anne-Emmanuelle BADEL - aebadel@orange.fr ♦ Mathilde DOUARD - mathilde.douard@laposte.net ♦

Micheline IZBICKI - izbickim@orange.fr ♦ Audrey LARHANT - a.larhant@wanadoo.fr ♦

Françoise LANGLOIS - francoise.langlois@univ-lyon1.fr ♦ Danièle EHLEH - danielle.oehler@gmail.com ♦

Vincent PARBELLE - parbelle.condorcet@gmail.com ♦ Jacques VINCE - jvince@ac-lyon.fr

Martinique

Président et Courrier : Louis RICHER - pa_martinique@udppc.asso.fr

Collège : Contacter les responsables « collège » nationaux (voir page XV)

Montpellier (région Occitanie)

Présidente et Courrier : Anne RAVAILLE - pa_montpellier@udppc.asso.fr

Secrétaire : Martine JEANJEAN - jeanmarjean@yahoo.fr

Trésorière : Sylvie BEAUFORT - sylvie.beaufort@cegetel.net

Collège : Sabrina MITEL - sabm45@hotmail.com

Relations enseignement supérieur : Johan ALAUZUN - johan.alauzun@gmail.com

Nancy - Metz (région Grand Est)

Présidente et Courrier : Alix LENORMAND - pa_nancy-metz@udppc.asso.fr

Secrétaire : Aurélie FLORY-TIXIDOR - tixidor@laposte.net

Trésorier : Nicolas GUIRTEN - nicolas.guirten@gmail.com

Chimie (olympiades) : Édith ANTONOT - edith.antonot@ac-nancy-metz.fr

Collège : Contacter les responsables « collège » nationaux (voir page XV)

Concours Mendeïev : Élodie POLISINI - elodie.cortelazzo@hotmail.fr

Congrès : Emelyne RENAGLIA - emelyne.renaglia@gmail.com

Physique (olympiades) : Pierre DANIOU - p.daniou@laposte.net

Autres membres : David BERHAULT - david.berhault@wanadoo.fr ♦ M. Dominique DESER - ddeser57@gmail.com ♦

Sandrine JOLIVALT - sandrine.jolivalt1@ac-nancy-metz.fr

Nantes (région Pays de la Loire)

Président et Courrier : Jean-François HUET - pa_nantes@udppc.asso.fr

Vice-président : Frédéric VOLTEAU - frvolteau@orange.fr

Trésorier : Thomas ZABULON - thomas.zabulon@orange.fr

Chimie (olympiades) : Jean-François HUET - jeanfrancoishuet@sfr.fr

Collège : Sophie ROBERT - sophie.robert@ac-nantes.fr

Physique (olympiades) : Fabrice LE MEIGNEN - fabrice.le-meignen@ac-nantes.fr

Représentant au conseil national : François PASSEBON - francois.passebon@orange.fr

Nice - Toulon (région Provence-Alpes-Côte d'Azur)

Président et Courrier : Régis LATÈTE - pa_nice-toulon@udppc.asso.fr

Trésorier : Emmanuel MENINI - e.menini@infonie.fr

Chimie (olympiades) : Lauriane TEULÉ-GOARANT - laurianetg@yahoo.fr

Classes préparatoires : Djamel GHOUBALI - djamal.ghoubali@orange.fr

Collège : Contacter les responsables « collège » nationaux (voir page XV)

Lycée : Ghislain BERNARD - ghismu.bernard@orange.fr

Physique (olympiades) : Ghislain BERNARD - ghismu.bernard@orange.fr

Université : Fabien KEFELIAN - fabien.kefelian@unice.fr

Orléans - Tours (région Centre-Val-de-Loire)

Président et Courrier : Tony BOIVIN - pa_orleans-tours@udppc.asso.fr

Vice-présidente : Murielle SABATIER - sabatier.murielle@orange.fr

Trésorier : David DUFOUR - david.dufour10@free.fr

Trésorière adjointe : Marie-Séverine DUFOUR - dufour_prof@yahoo.fr

Chimie (olympiades) : Agnès ROUZAIRE - mmerouzaire@free.fr

Collège : Arnelle BOICHÉ - arnelle.boiche@ac-orleans-tours.fr

Lycée : José ABLANCOURT - jose.ablancourt@wanadoo.fr ♦ Christelle DEBREE - christelledebree@gmail.com

Relations enseignement agricole : Luc DUFETEL - luc.dufetel@educagri.fr

Relations enseignement supérieur : Florent PANNETIER - florent_pannetier@hotmail.com

Relations Maison pour la science : Élodie LEBERT - elodie.lebert@hotmail.fr

Webmestre : Tony BOIVIN - tboivin@free.fr

Autre membre : Lény ROBIN - leny.robin@ac-orleans-tours.fr

Paris - Créteil - Versailles (région Île-de-France)

Président et Courrier : Mickaël SALAMAT - pa_idf@udppc.asso.fr
 Secrétaires : Marion TIRONNEAU (Paris) - science.tironneau@gmail.com ♦ Éric JOUGUELET (Créteil) - jougueleteric@orange.fr ♦
 Marie-Lys BEOUTIS (Versailles) - marielys.beoutis@gmail.com
 Trésorier : Florent GOITIA - f.goitia@protonmail.com
 Collège : Arnaud CORDONNIER (Paris) - a.cordonnier.ac@gmail.com ♦ Florent GOITIA (Créteil) - f.goitia@protonmail.com
 Lycée : Damien SCIMECA (Paris) - dam.scimeca@orange.fr ♦ Marie-Lys BEOUTIS (Versailles) - marielys.beoutis@gmail.com
 Physique (olympiades) : Senem KILIC (Paris) - senem.kilic@ac-paris.fr ♦ Éric JOUGUELET (Créteil) - jougueleteric@orange.fr
 Relation enseignement privé : Damien SCIMECA - dam.scimeca@orange.fr
 Autres membres : Jonathan PIARD - jonathan.piard@ens-paris-saclay.fr ♦ Madeleine MASLE - madeleine.masle@wanadoo.fr

Poitiers (région Nouvelle Aquitaine)

Président et Courrier : Thierry DEXANT - pa_poitiers@udppc.asso.fr
 Vice-président : Denis KERIGNARD - denis.kerignard@neuf.fr
 Secrétaire : Patrice ENSELME - patrice.enselme@wanadoo.fr
 Trésorier : Christophe AURIEL - christophe.auriel@wanadoo.fr
 Chimie : Florence EDARD - florence.edard@orange.fr
 Chimie (olympiades) : Thibault PELLETIER - pelletier.thibault@sfr.fr
 Collège : Contacter les responsables « collège » nationaux (voir page XV)
 Enseignement technologique : Denis KERIGNARD - denis.kerignard@neuf.fr
 Physique (olympiades) : Denis KERIGNARD - denis.kerignard@neuf.fr
 Relations enseignement supérieur : Thomas MARSH - tmarsh@univ-lr.fr
 Webmestre : Hubert FRIEDMANN - hubert.friedmann@univ-lr.fr
 Autre membre : Jean-Luc FOUQUET - jean-luc.fouquet@wanadoo.fr

Reims (région Grand Est)

Présidente et Courrier : Éléna MILHOMME - pa_reims@udppc.asso.fr
 Trésorier : Thierry LAURENT - thierry.laurent@ac-reims.fr
 Chimie (olympiades) : Benoît MATHGEN - benoit.mathgen@ac-reims.fr
 Collège : Émilie SINGERY - esingery@gmail.com
 Enseignement technologique : Philippe GOUTVERG - philippe.goutverg@ac-reims.fr
 Physique (olympiades) : Philippe GOUTVERG - philippe.goutverg@ac-reims.fr

Rennes (région Bretagne)

Présidente et Courrier : Gaëlle SCHOLLHAMMER - pa_rennes@udppc.asso.fr
 Secrétaire : Jean-Marc ROTY - jean-marc.rot@ac-rennes.fr
 Secrétaire adjointe : Joëlle REBOUX - joreboux@gmail.com
 Trésorier : Christian GUITARD - christian.guitard@ac-rennes.fr
 Chimie (olympiades) : Jean-Marc ROTY - jean-marc.rot@ac-rennes.fr
 Collège : Corinne GUITARD - corinne.guitard@ac-rennes.fr
 Enseignement technologique : Laurent JOSSE - ljossedz@orange.fr
 Enseignement supérieur : Laurent BEAU - laurent.beau@ac-rennes.fr
 Physique (olympiades) : Catherine GUERNION - guernion.catherine@orange.fr
 Autres membres : Christiane CARRÉ - christiane.carre@ac-rennes.fr ♦ Philippe COACOLO - philippe.coacolo@ac-rennes.fr ♦
 Guillaume MINIER - guillaume.minier@ac-rennes.fr ♦ Ali OUNANE - ali.ounane@ac-rennes.fr

Rouen (région Normandie)

Président et Courrier : Hervé DEMORGNY - pa_rouen@udppc.asso.fr
 Vice-président : Christophe BAILLEUL - christophe.bailleul@ac-rouen.fr

Trésorier : Stéphane DEMAUTIS - dmeautis@ac-rouen.fr
 Chimie (olympiades) : Hervé DEMORGNY - herve.demorgny@orange.fr
 Collège : Contacter les responsables « collège » nationaux (voir page XV)
 CPGE : Mme Dominique LOEUILLET - dominique.loeuillet@wanadoo.fr
 Échanges internationaux : Denis LEROUTIER - denis.leroutier@aliceadsl.fr
 Enseignement STL : David ALBERTO - thalesmilet@gmail.com
 Enseignement STI2D : Christophe BAILLEUL - christophe.bailleul@ac-rouen.fr
 Formation des maîtres : Jacques BOURET - jacques.bouret@ac-rouen.fr
 Autres membres : Catherine BOIVIN - catherineboivin4@gmail.com ♦ Emma GOSSE - gossee@ac-rouen.fr

Strasbourg (Région Grand Est)

Président et Courrier : Paul COUSANDIER - pa_strasbourg@udppc.asso.fr
 Vice-président : David ROUVEL - david.rouvel@laposte.net
 Secrétaire : Barbara FERRY - barbara.ferry@ac-strasbourg.fr
 Trésorier : Bruno HERRBACH - bruno.herrbach@gmail.com
 Chimie (olympiades) : Hélène RISLER - risler.helene@mac.com
 Collège : Paul COUSANDIER - paul.cousandier@ac-strasbourg.fr
 CPGE : David ROUVEL - david.rouvel@laposte.net
 Formation des professeurs : Nathalie LUDWIG - ludwig@unistra.fr
 Lycée : Maxime CHOQUET - maxime.choquet@ac-strasbourg.fr ♦ Denis DUBAJ - denis.dubaj@ac-strasbourg.fr
 Physique (olympiades) : Marc STRUBEL - marc.strubel@ac-strasbourg.fr
 Enseignement supérieur : Nathalie LUDWIG - ludwig@unistra.fr
 Formation des maîtres : Nathalie LUDWIG - ludwig@unistra.fr
 Consultants : Jean-Marc DIRRIG - jmdirrig@yahoo.fr ♦ Alain SPRAUER - sprual@club-internet.fr ♦
 Jean-François THIVENT - jf.thivent@hotmail.com

Toulouse (région Occitanie)

Vice-présidente et Courrier : Marie-Ghislaine GASNET - pa_toulouse@udppc.asso.fr
 Secrétaire : Claudine CAYRON - claudine.cayron@ac-toulouse.fr
 Trésorier : André GILLES - gillesandre@gmail.com
 Chimie : Cécile MANGHI - cmanghi@free.fr
 Chimie (olympiades) : Mireille GALIAN - mireille.galian@wanadoo.fr
 Collège : Cathy PARIS - paris.cathy31@gmail.com
 Enseignement supérieur : Benoît CHAMPIN - benoit.champin@iut-tlse3.fr
 Informatique : Thierry MARTIN - thierry.martin@udppc.asso.fr
 Physique : Paul COLIN - pcolin@nordnet.fr
 Physique (olympiades) : Marie-Ghislaine GASNET - marie-ghislaine.gasnet@ac-toulouse.fr
 TICE : Thierry MARTIN - thierry.martin@udppc.asso.fr
 Autres membres : Sylvie PARDESSUS - sylvie.pardessus@wanadoo.fr ♦ Christian PÉLISSIER - christian.pelissier@ac-toulouse.fr ♦
 Pascale PUPPO - pascale.puppo@gmail.com ♦ Florence TROGNEUX - florence.trogneux@free.fr

Versailles (région Île-de-France)

Voir académie de Paris - Créteil - Versailles (région Île-de-France).

Les correspondants académiques

Collège

Cécile DUSSINE - cecile.dussine@outlook.fr ♦ Florent GOITIA - f.goitia@protonmail.com

Aix-Marseille (*région Provence-Alpes-Côte d'Azur*) : Contacter les responsables « collège » nationaux (voir ci-dessus)

Amiens (*région Hauts-de-France*) : Contacter les responsables « collège » nationaux (voir ci-dessus)

Besançon (*région Bourgogne-Franche-Comté*) : Contacter les responsables « collège » nationaux (voir ci-dessus)

Bordeaux (*région Nouvelle Aquitaine*) : Roseline PRIMOUT - roseline.primout@ac-bordeaux.fr

Caen (*région Normandie*) : Voir académie de Rouen ou région Normandie

Clermont-Ferrand (*région Auvergne-Rhône-Alpes*) : Laila MARGOUM - laila.margoum@gmail.com

Corse (*région Corse*) : Marie-Catherine TAFANI - mairie-cath.tafani@ac-corse.fr

Créteil (*région Île-de-France*) : Florent GOITIA - f.goitia@protonmail.com

Dijon (*région Bourgogne-Franche-Comté*) : Voir académie de Besançon et région Bourgogne-Franche-Comté

Grenoble (*région Auvergne-Rhône-Alpes*) : Sandrine PIERRE - pierre_sand@hotmail.com

Guadeloupe : Contacter les responsables « collège » nationaux (voir ci-dessus)

La Réunion : Plus de section académique pour le moment

Lille (*région Hauts-de-France*) : Geoffroy LAMIRAND - geoffroy.lamirand@ac-lille.fr

Limoges (*région Nouvelle Aquitaine*) : Contacter les responsables « collège » nationaux (voir ci-dessus)

Lyon (*région Auvergne-Rhône-Alpes*) : Cécile DUSSINE - cecile.dussine@outlook.fr

Martinique : Contacter les responsables « collège » nationaux (voir ci-dessus)

Montpellier (*région Occitanie*) : Sabrina MITEL - sabm45@hotmail.com

Nancy-Metz (*région Grand Est*) : Contacter les responsables « collège » nationaux (voir ci-dessus)

Nantes (*région Pays de la Loire*) : Sophie ROBERT - sophie.robert@ac-nantes.fr

Nice - Toulon (*région Provence-Alpes-Côte d'Azur*) : Contacter les responsables « collège » nationaux (voir ci-dessus)

Orléans - Tours (*région Centre-Val-de-Loire*) : Arnelle BOICHÉ - arnelle.boiche@ac-orleans-tours.fr

Paris (*région Île-de-France*) : Arnaud CORDONNIER - a.cordonnier.ac@gmail.com

Poitiers (*région Nouvelle Aquitaine*) : Contacter les responsables « collège » nationaux (voir ci-dessus)

Reims (*région Grand Est*) : Émilie SINGERY - esingery@gmail.com

Rennes (*région Bretagne*) : Corinne GUITARD - corinne.guitard@ac-rennes.fr

Rouen (*région Normandie*) : Contacter les responsables « collège » nationaux (voir ci-dessus)

Strasbourg (*région Grand Est*) : Paul COUSANDIER - paul.cousandier@ac-strasbourg.fr

Toulouse (*région Occitanie*) : Cathy PARIS - paris.cathy31@gmail.com

Versailles (*région Île-de-France*) : Contacter les responsables « collège » nationaux (voir ci-dessus)

Olympiades de physique France

Alain JOUVE - alain.jouve@wanadoo.fr

Site des Olympiades de physique France : <http://www.odpf.org>

Aix-Marseille (*région Provence-Alpes-Côte d'Azur*) : Nathalie BARDE (présidente) - nath.barde@club-internet.fr

Amiens (*région Hauts-de-France*) : Jan DUDA - jan.duda@ac-amiens.fr

Besançon (*région Bourgogne-Franche-Comté*) : Anne-Marie STUDER (courrier) - anne-marie.studer@ac-besancon.fr

Bordeaux (*région Nouvelle Aquitaine*) : Sylvie CUENOT - sylvie.cuenot@ac-bordeaux.fr ♦

Laurence LOZANO - laurence.lozano@gmail.com

Caen (*région Normandie*) : Voir académie de Rouen ou région Normandie

Clermont-Ferrand (*région Auvergne-Rhône-Alpes*) : Philippe FARGEIX - fargphi1@free.fr

Corse (*région Corse*) : Véronique MAROSELLI (présidente) - maroselli.veronique@gmail.com

Créteil (*région Île-de-France*) : Éric JOUGUELET - jougueleteric@orange.fr

Dijon (*région Bourgogne-Franche-Comté*) : Voir académie de Besançon et région Bourgogne-Franche-Comté
 Grenoble (*région Auvergne-Rhône-Alpes*) : Catherine GAUTIER - catherine.gautier1@ac-grenoble.fr
 Guadeloupe : Jocelyn LUBINO (courrier) - lubino.jocelyn@orange.fr
 La Réunion : Plus de section académique pour le moment
 Lille (*région Hauts-de-France*) : Arnaud DURIEUX - arnaud.durieux@ac-lille.fr ♦ Stéphane LESPINASSE - stephane.lespinasse@ac-lille.fr
 Limoges (*région Nouvelle Aquitaine*) : Romain LUCAS (président) - romain.lucas@unilim.fr
 Lyon (*région Auvergne-Rhône-Alpes*) : Alain JOUVE - alain.jouve@wanadoo.fr ♦ Fabien BRUNO - fabien.bruno@ac-lyon.fr
 Martinique : Louis RICHER (président) - louis.richer@wanadoo.fr
 Montpellier (*région Occitanie*) : Anne RAVAILLE (présidente) - anne.ravaille@wanadoo.fr
 Nancy-Metz (*région Grand Est*) : Pierre DANIOU - p.daniou@laposte.net
 Nantes (*région Pays de la Loire*) : Fabrice LE MEIGNEN - fabrice.le-meignen@ac-nantes.fr
 Nice - Toulon (*région Provence-Alpes-Côte d'Azur*) : Ghislain BERNARD - ghismu.bernard@orange.fr
 Orléans - Tours (*région Centre-Val-de-Loire*) : Tony BOIVIN (président) - tboivin@free.fr
 Paris (*région Île-de-France*) : Senem KILIC - senem.kilic@ac-paris.fr
 Poitiers (*région Nouvelle Aquitaine*) : Denis KERIGNARD - denis.kerignard@neuf.fr
 Reims (*région Grand Est*) : Philippe GOUTVERG - philippe.goutverg@ac-reims.fr
 Rennes (*région Bretagne*) : Catherine GUERNION - guernion.catherine@orange.fr
 Rouen (*région Normandie*) : Hervé DEMORGNY (président) - herve.demorgny@orange.fr
 Strasbourg (*région Grand Est*) : Marc STRUBEL - marc.strubel@ac-strasbourg.fr
 Toulouse (*région Occitanie*) : Marie-Ghislaine GASNET - marie-ghislaine.gasnet@ac-toulouse.fr
 Versailles (*région Île-de-France*) : Mickaël SALAMAT (président) - admin@prof-salamat.fr

Olympiades nationales de la chimie

Julien CALAFELL - julien.calafell@gmail.com

Site des Olympiades nationales de la chimie : <http://www.olympiades-chimie.fr/>

Aix-Marseille (*région Provence-Alpes-Côte d'Azur*) : Michel BARDE - lesbarde@club-internet.fr
 Amiens (*région Hauts-de-France*) : Jan DUDA - jan.duda@ac-amiens.fr
 Besançon (*région Bourgogne-Franche-Comté*) : Anne-Marie STUDER (courrier) - anne-marie.studer@ac-besancon.fr
 Bordeaux (*région Nouvelle Aquitaine*) : Pierre DUPLAA (président) - pierre.duplaa@gmail.com
 Caen (*région Normandie*) : Voir académie de Rouen ou région Normandie
 Clermont-Ferrand (*région Auvergne-Rhône-Alpes*) : Frédérique CHAPTAL - fchaptal@ac-clermont.fr
 Corse (*région Corse*) : Philippe GRAZIANI CAUNANT - p.graziani@wanadoo.fr
 Créteil (*région Île-de-France*) : Mickaël SALAMAT (président) - admin@prof-salamat.fr
 Dijon (*région Bourgogne-Franche-Comté*) : Voir académie de Besançon et région Bourgogne-Franche-Comté
 Grenoble (*région Auvergne-Rhône-Alpes*) : Christophe GAUTHIER - christophe.gauthier@ac-grenoble.fr
 Guadeloupe : Jocelyn LUBINO (courrier) - lubino.jocelyn@orange.fr
 La Réunion : Plus de section académique pour le moment
 Lille (*région Hauts-de-France*) : Aurélien MONCOMBLE - aurelien.moncomble@univ-lille.fr
 Limoges (*région Nouvelle Aquitaine*) : Romain LUCAS (président) - romain.lucas@unilim.fr
 Lyon (*région Auvergne-Rhône-Alpes*) : Jean-Baptiste ROTA - jean-baptiste.ota@ac-lyon.fr
 Martinique : Louis RICHER (président) - louis.richer@wanadoo.fr
 Montpellier (*région Occitanie*) : Anne RAVAILLE (présidente) - anne.ravaille@wanadoo.fr
 Nancy-Metz (*région Grand Est*) : Édith ANTONOT - edith.antonot@ac-nancy-metz.fr
 Nantes (*région Pays de la Loire*) : Jean-François HUET - jeanfrancoishuet@sfr.fr
 Nice - Toulon (*région Provence-Alpes-Côte d'Azur*) : Lauriane TEULÉ-GOARANT - laurianetg@yahoo.fr
 Orléans - Tours (*région Centre-Val-de-Loire*) : Agnès ROUZAIRE - mmerouzaire@free.fr
 Paris (*région Île-de-France*) : Mickaël SALAMAT (président) - admin@prof-salamat.fr
 Poitiers (*région Nouvelle Aquitaine*) : Thibault PELLETIER - pelletier.thibault@sfr.fr
 Reims (*région Grand Est*) : Benoît MATHGEN - benoit.mathgen@ac-reims.fr
 Rennes (*région Bretagne*) : Jean-Marc ROTY - jean-marc.roty@ac-rennes.fr

Rouen (*région Normandie*) : Hervé DEMORGNY - herve.demorgny@orange.fr

Strasbourg (*région Grand Est*) : Hélène RISLER - risler.helene@mac.com

Toulouse (*région Occitanie*) : Mireille GALIAN - mireille.galian@wanadoo.fr

Versailles (*région Île-de-France*) : Mickaël SALAMAT (président) - admin@prof-salamat.fr

VÉRIFIEZ QUE VOS COORDONNÉES SONT À JOUR !

Vous pouvez modifier les informations vous concernant (adresses postale ou électronique, établissement scolaire...) directement sur votre fiche de « Mon compte » sur le site :

<http://udppc.asso.fr>

Vous pouvez également vous adresser au secrétariat des abonnements :

abonnement@udppc.asso.fr

Tél. : 01 40 46 83 80 - Fax : 01 46 34 76 61

Courrier : UdPPC - 42 rue Saint-Jacques - 75005 PARIS



CHIMIE & TERROIR

Osez l'expérience !

Ateliers, animations, rencontres

14 - 16 mai 2020

Espace André LEJEUNE, GUÉRET

Entrée libre et gratuite
www.chimieetsociete.org



(BnF) AJSPI   SIF SFdS VSMAT 

Sciences | Médias

Femmes scientifiques à la Une !

Comment améliorer la représentation des femmes scientifiques dans les médias ?

Journée de conférences et débats



Événement soutenu par :



28 mai 2020
Bibliothèque nationale de France - Paris



Inscription gratuite et obligatoire sur

www.sciencesetmedias.org

udppc

UNION DES PROFESSEURS
DE PHYSIQUE ET DE CHIMIE

Place
15

aux

ScienCeS
16 58

DU 25
AU 28 2020
OCTOBRE

68^e
Congrès
des professeurs
de physique
et de chimie

NANCY

COLLECTION
DE MINÉRAUX

EXPOSITION

DU MYTHE
À LA CLASSIFICATION
DE MENDELEÏEV

La quête des éléments

DU 4 NOV
2019

AU 10 JUL
2020

Entrée libre

Clôture le 4 juin 2020 à 18h00
Dernière journée, le dimanche 10 juin 2020
Circuit Pierre et Marie Curie
4 place Jussieu 75005 Paris

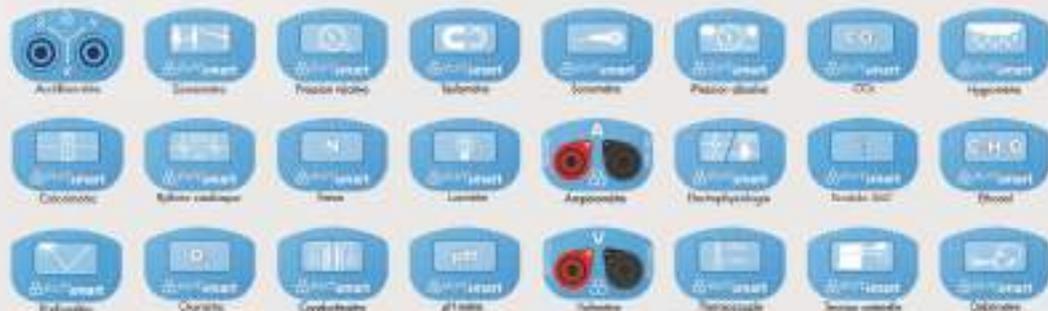
AMS
Association des Minéralogues de Sorbonne Université

ES2 + 008



Centrale SYSAM-Campus SVT & SPC

- Une centrale USB élégante et puissante qui laisse trôner l'expérience
- Une gamme de capteurs pour les Sciences Physiques et la Chimie.
- Une gamme de capteurs pour les Sciences de la Vie et de la Terre.
- Un module Bluetooth pour une totale indépendance des capteurs.
- Un logiciel Unique, qui est vraiment unique !



en savoir plus : www.sysam-campus.com

Capteurs compatibles avec la carte microcontrôleur EDUCADUINO-Lab



Des kits proposant une réelle approche pédagogique adaptée à l'objectif des nouveaux programmes.

Clé USB
Python, Pyzo
Jupyter, Spyder

- Kit initiation 2nde
- Kit initiation 2nde / 1ère
- Kit mesures électriques
- Kit Sciences Physiques 2nde / 1ère
- Kit Sciences Physiques 2nde / 1ère / Terminale

En savoir plus : www.educaduino-lab.com