MIRE

InSAR : un outil de décision pour la gestion des risques et le suivi des infrastructures

MIRE, la topographie au service du multimétiers

MIRE, filiale du Groupe NGE, est **spécialisée** dans les métiers de la **mesure appliquée** aux projets du BTP et la maintenance des infrastructures.

Nos équipes interviennent sur des **environnements exigeants** tels que la SNCF, la RATP, La Société du Grand Paris, EDF, **les ouvrages d'art, tunnels et sites sensibles**, avec un haut niveau de **précision et de fiabilité**.

6 métiers de la topographie

- Topographie
- Auscultation
- InSAR
- Bureau d'Etudes ferroviaires
- Scanner 3D
- BIM

CA 2025 **6,3 M€**

22% de Femmes

10% du personnel à l'INTERNATIONAL

55% de Cadres

SIÈGE
ZI rue Eugène Freyssinet
77500 Chelles - FRANCE

Pierre GARDEUX
Portable : (+33) 06 02 16 02 26
@ : pgardeux@mire-sas.com

Bureau Paris
Batimen URBAN GARDEN
11 rue Camille Desmoulins
92130 Issy-Les-Moulineaux - FRANCE

Stéphane GACHON
Portable: (+33) 06 07 89 90 64
@ : stephane.gachon@mire-sas.com

Bureau Sud-Ouest
NGE - Direction régionale Midi-Pyrénées
4 rue Eric Tabarly - 31600 Muret - FRANCE

Romain TEODOMANTE
Portable: (+33) 07 61 84 22 55
@ : romain.teodomante@mire-sas.com

25 000 collaborateurs

Nos labels

GOLD 2023 ecovadis Sustainability Rating

NGE a obtenu la médaille « gold » pour son engagement et sa performance en matière de RSE.

THE GLOBAL COMPACT

NGE est signataire du Pacte Mondial des nations Unies depuis 2016 et participe activement au programme en mettant en œuvre ses dix principes fondamentaux.

INTERNATIONAL
20 Pays
EN FRANCE
14 Régions
Multimétiers

ORGANISATION
- Régions/ Pays multimétiers
- Cycle de l'eau
- Ferroviaire
- Énergies
- Autres FNS (Filiales Nationales spécialisées)
- Grands Projets

CA 2025
5,2 Md€

INVESTISSEMENT MATÉRIEL 2025
190 M€

INTENSITÉ CARBONE 2024
435 kg eqCO2/ K€ CA

OBJECTIF 2030
275 kg eqCO2/ K€ CA

8 métiers au service de la transition énergétique

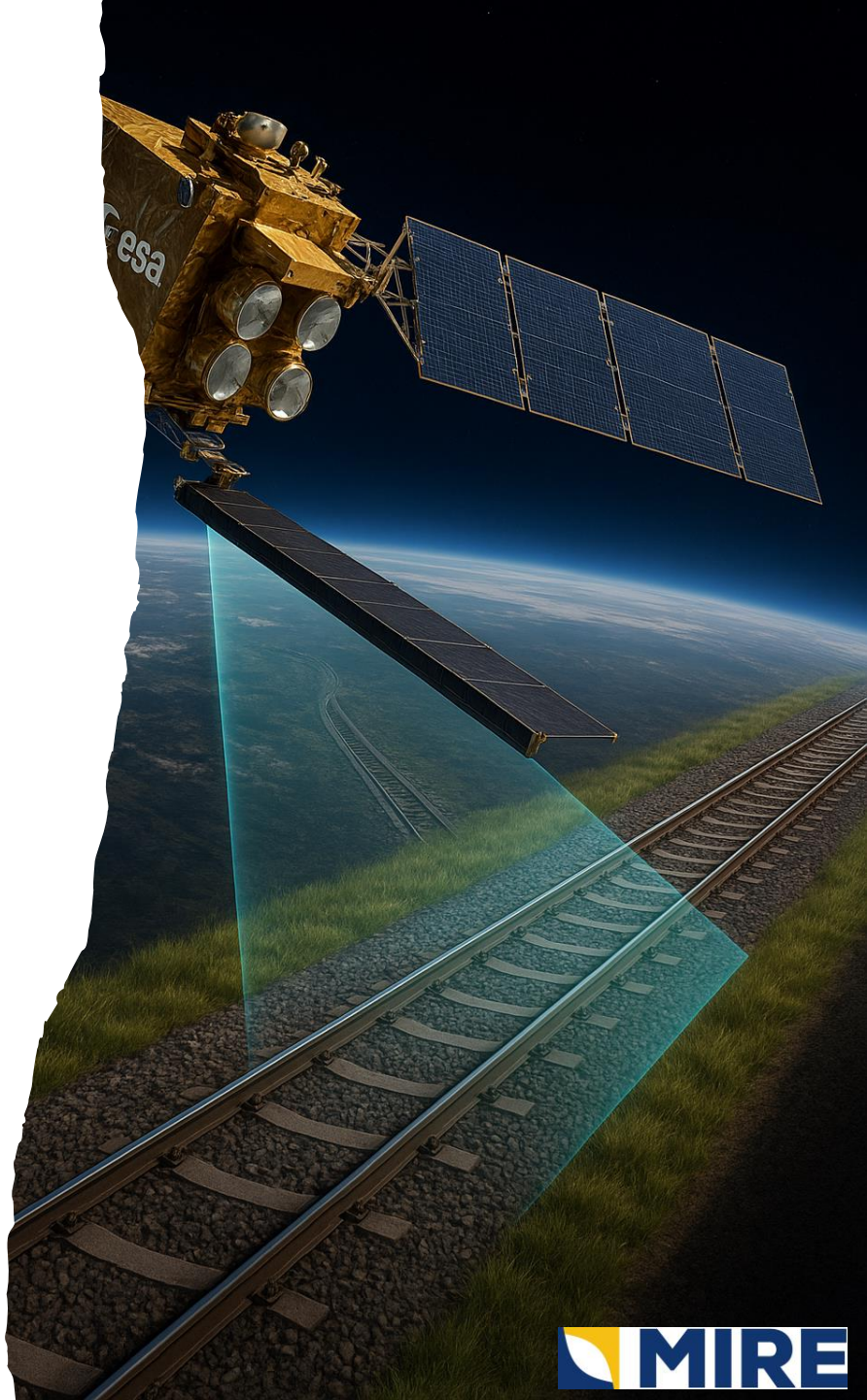
- VRD & Terrassement
- Cycle de l'eau
- Génie civil
- Routes
- Fondations
- Ferroviaire
- Bâtiment
- Energie & Télécom

GROUPE INDÉPENDANT
4e acteur du BTP en France

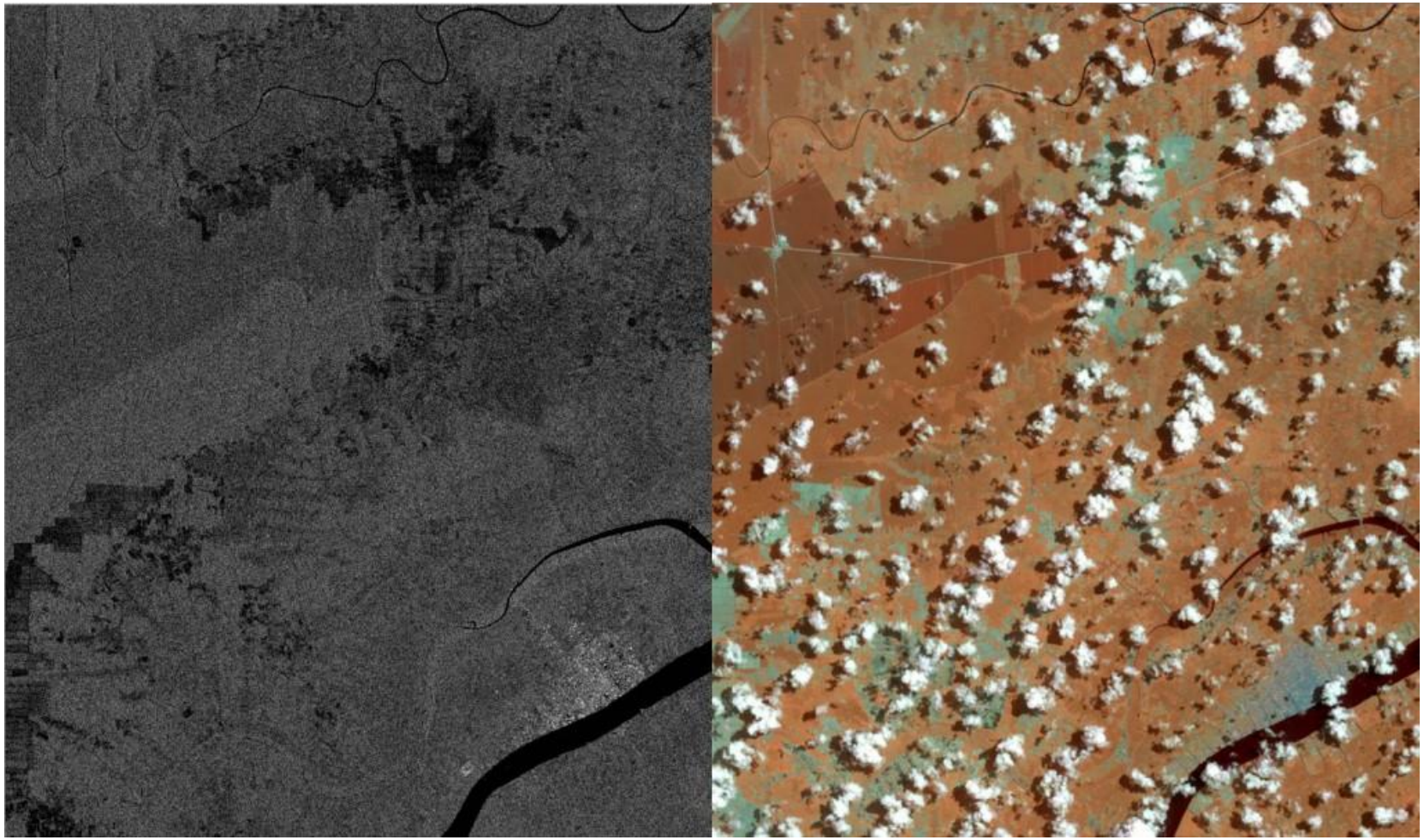
RÉPARTITION DU CAPITAL
28% Montefiore Investment
72% collaborateurs, dirigeants et fondateurs

NOTRE POLITIQUE RSE
- Placer l'humain au cœur de nos projets.
- Développer durablement notre ancrage territorial.
- Œuvrer pour la transition écologique.
- Promouvoir une culture de responsabilité sociétale forte ...

Pôle InSAR - Aurigami



Acquisition SAR (Synthetic Aperture Radar) VS optique

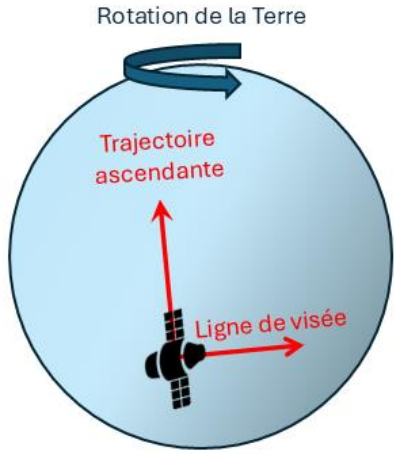


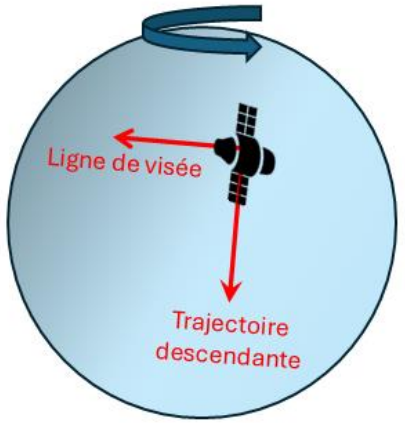
Comparaison entre une image radar Sentinel-1 (gauche) et une image optique Landsat-8 (droite) acquise lors d'un survol de Sumatra en Indonésie

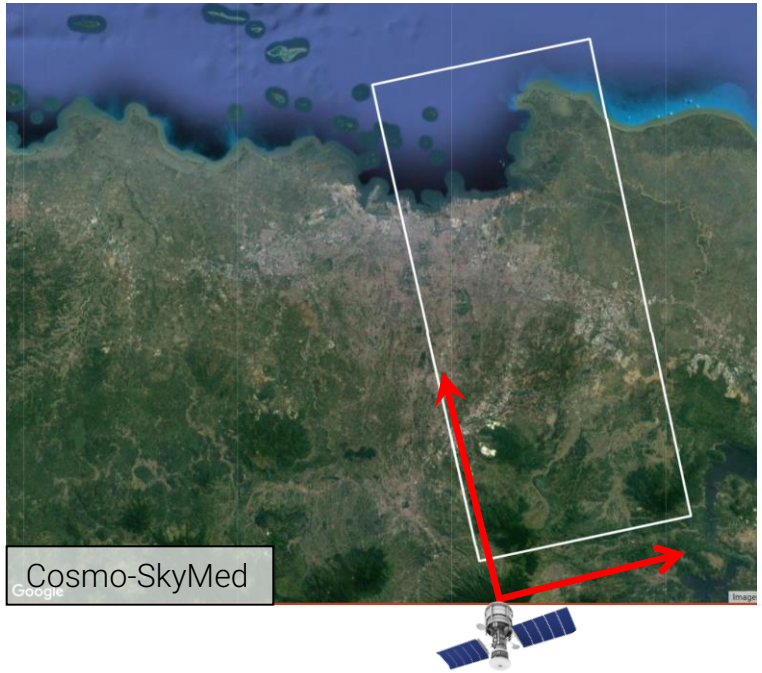
(© Copernicus Sentinel data (2015), © U.S. Geological Survey.)

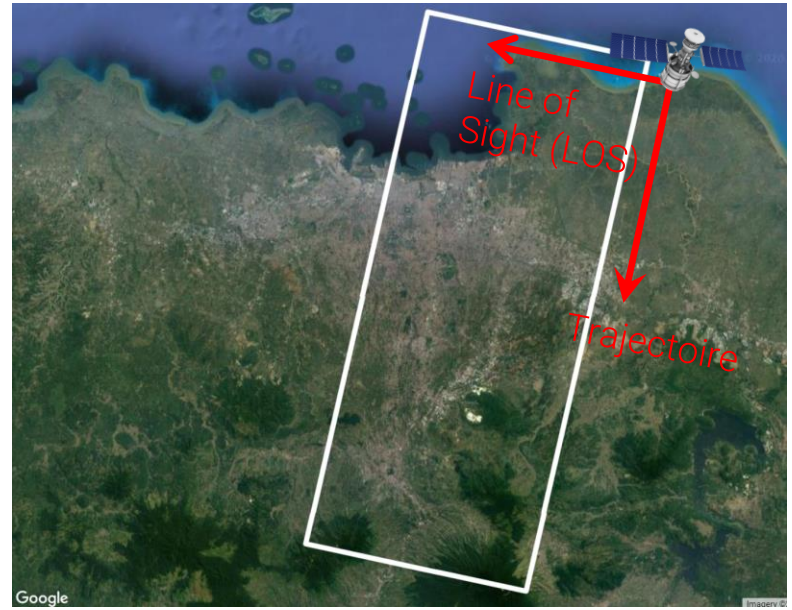
Acquisitions SAR

- Capteurs actifs : opérationnels de jour comme de nuit
- Courtes longueurs d'ondes : mesures possibles même avec une couverture nuageuse importante
- Couverture spatiale : une seule image couvre une très grande superficie
- Couverture quasi-globale : accessibilité des données

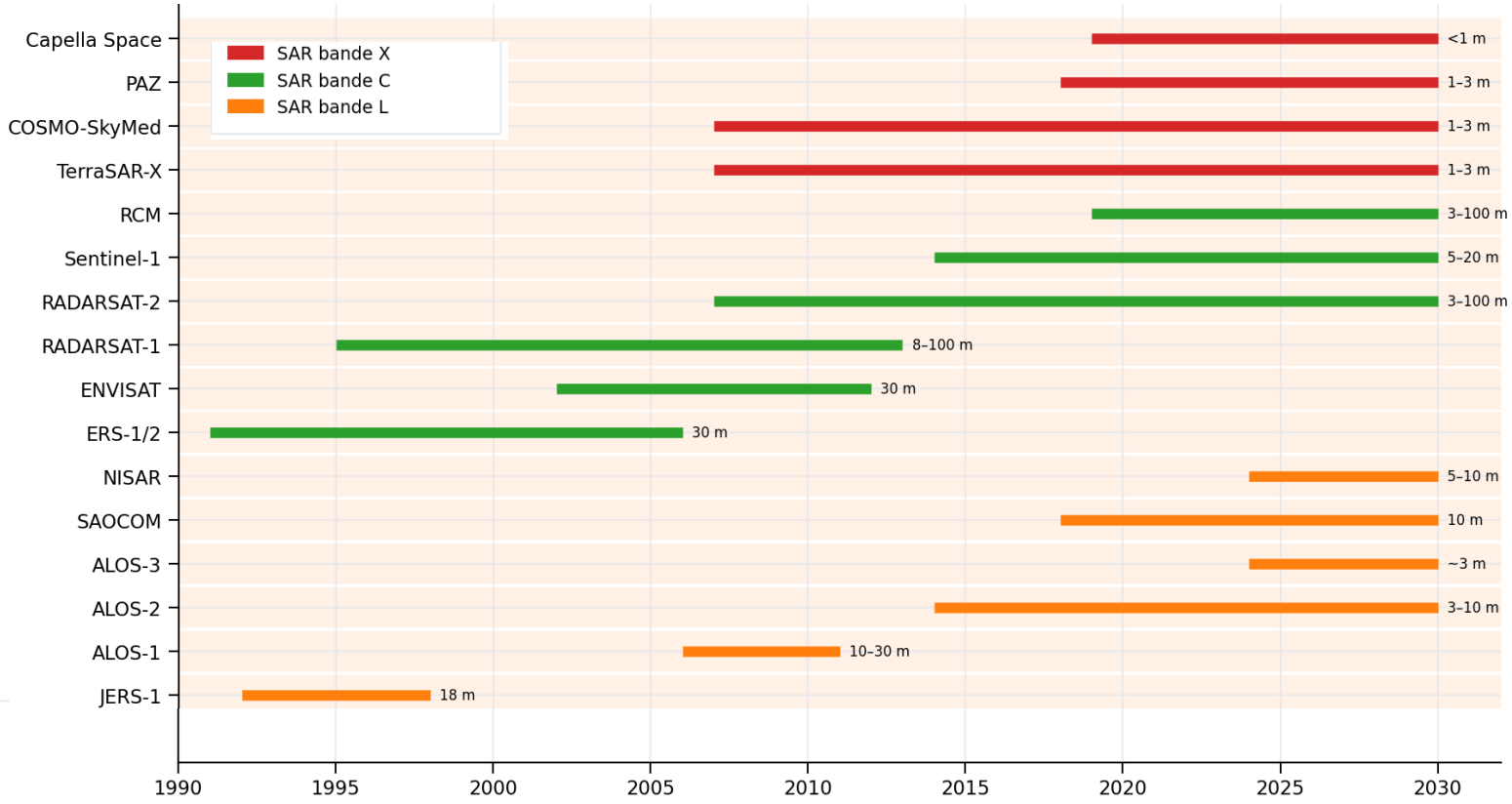


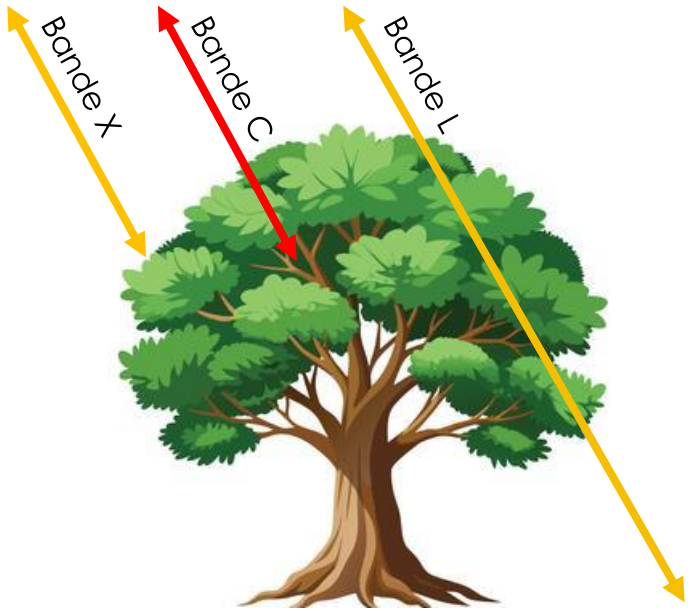






Acquisitions SAR





Capacité en pénétrer la végétation en fonction de la longueur d'onde

Bande	Longueur d'onde
X	2,4 - 3,75 cm
C	3,75 - 7,5 cm
S	7,5 - 15 cm
L	15 - 30 cm

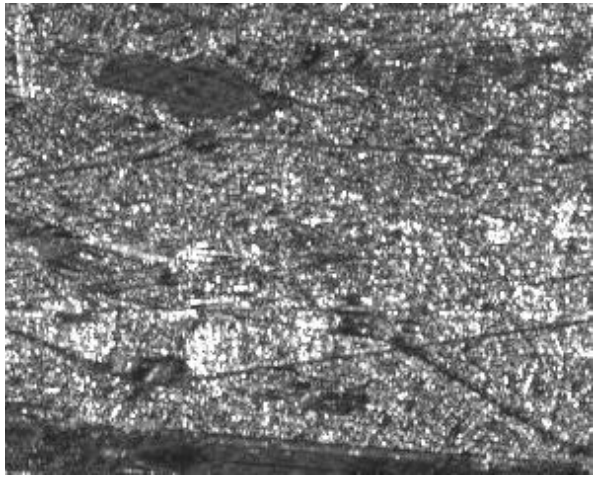
Acquisitions SAR

Image SAR = Image complexe

Single Look Complex (SLC) : $z=Ae^{j\Phi}$

Amplitude : intensité de la rétrodiffusion

- Caractéristiques du système d'acquisition : longueur d'onde, angle d'incidence, polarisation
- Propriétés sol : pente, rugosité, humidité, etc.

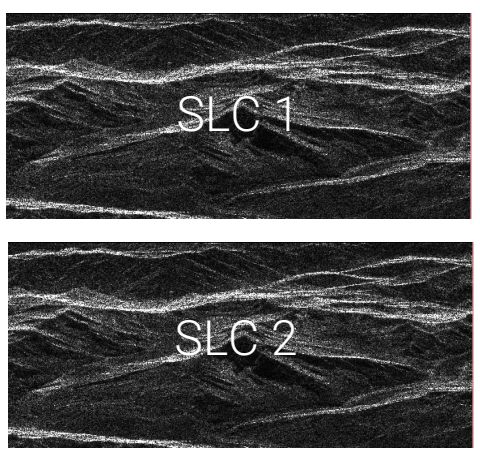


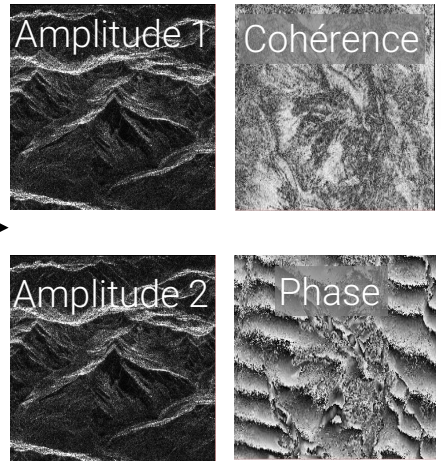
Phase : somme de deux contributions

- Phase géométrique : trajet aller-retour du signal (déterministe). $\phi_{géom} = 4\pi . R/\lambda$
- Phase propre : contribution interne du pixel (aléatoire et inaccessible)

Interférométrie SAR

Utilisation de 2 images : distance radar-objet accessible (Φ_{propre} doit rester stable)



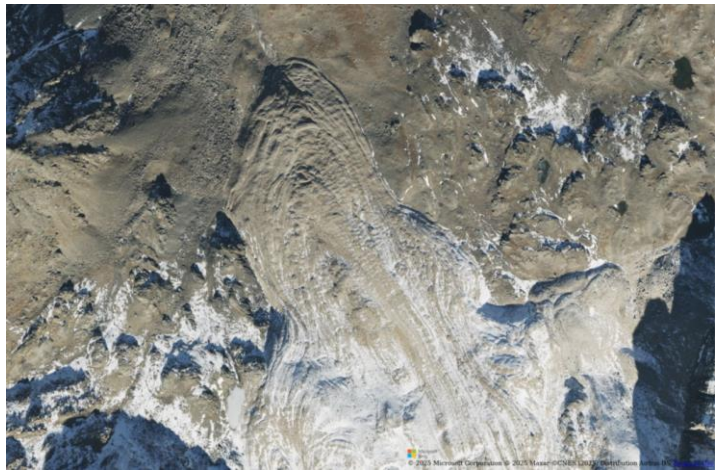


γ Cohérence

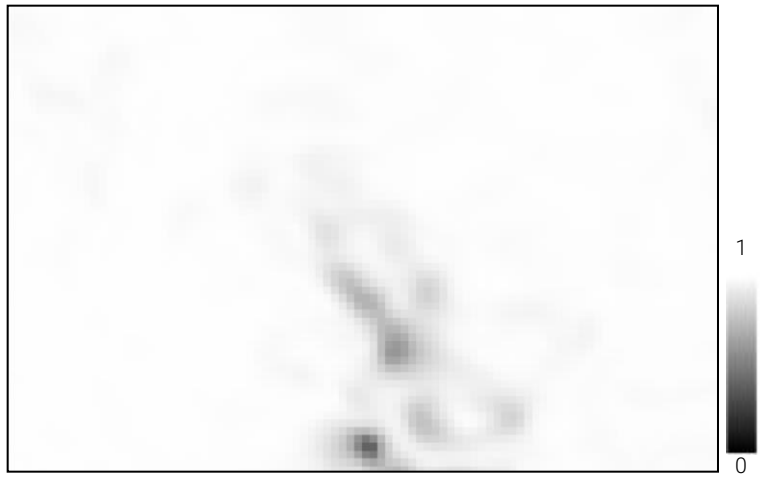
φ Phase interférométrique

Interférogramme :

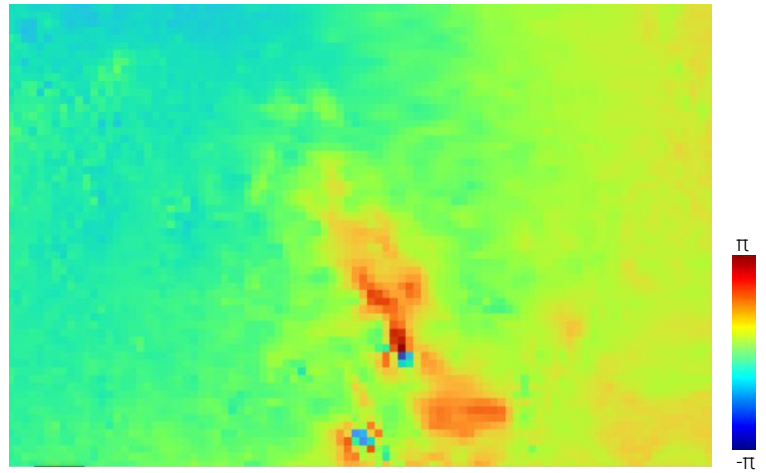
$$\gamma e^{j\varphi}(i,j) = \frac{\sum_{i,j\in\Omega} z_1(i,j) z_2^*(i,j)}{\sqrt{\sum_{i,j\in\Omega} z_1(i,j) z_1^*(i,j) \sum_{i,j\in\Omega} z_2(i,j) z_2^*(i,j)}}$$



Glacier rocheux du Thabor-Cheval Blanc

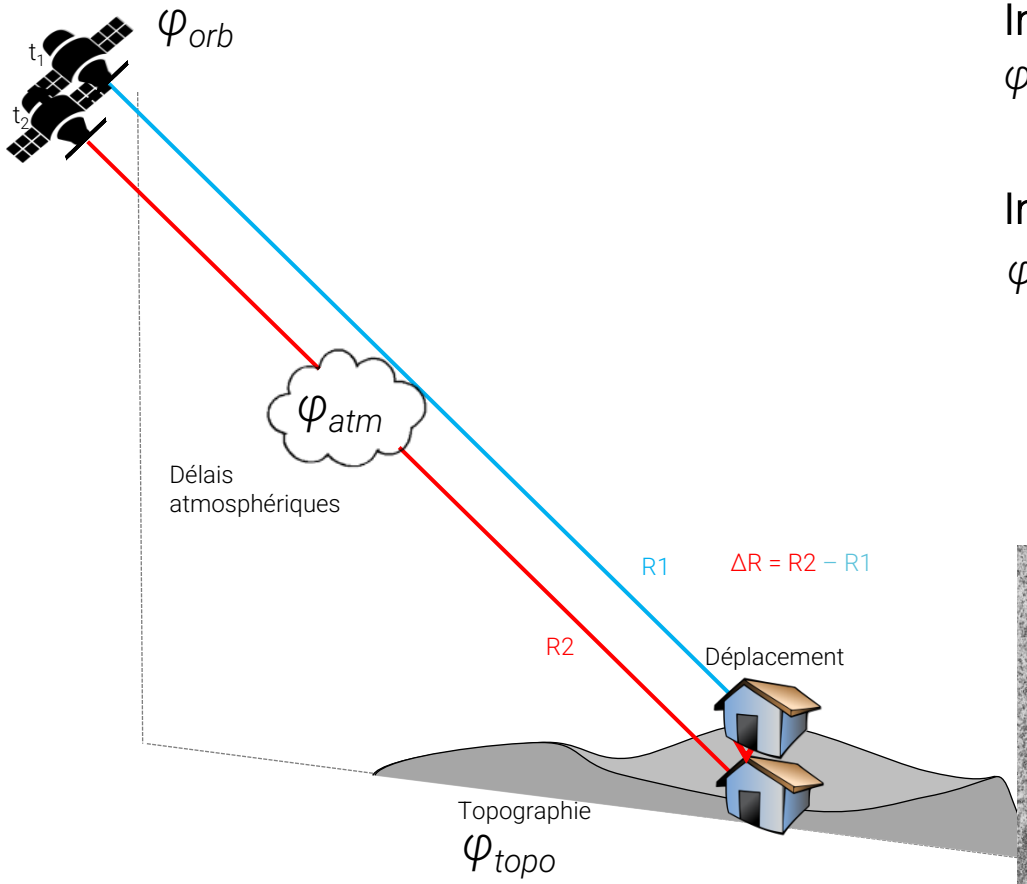


S1A/S1C - CC - 05/08/2021-11/08/2021



S1A/S1C - INT - 05/08/2025-11/08/2025

Interférométrie SAR



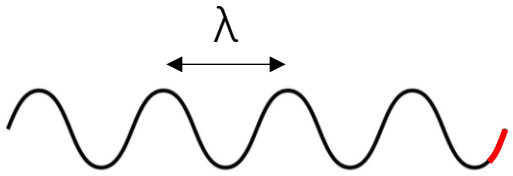
Interférogramme :

$$\varphi = \varphi_{orb} + \varphi_{topo} + \varphi_{dép} + \varphi_{atm} + \varphi_{bruit}$$

Interférogramme différentiel:

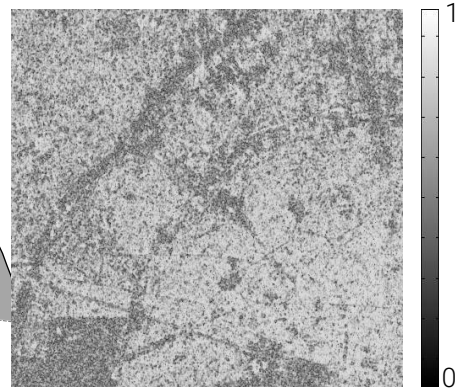
$$\varphi_{diff} = \varphi_{orb} + \varphi_{topo} + \varphi_{dép} + \varphi_{atm} + \varphi_{bruit}$$

Une frange = Déplacement de λ/2 dans la ligne de visée du radar

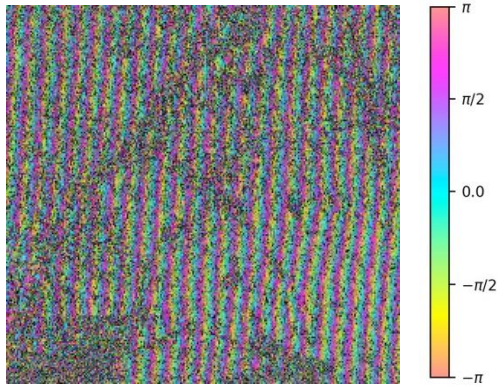


$$\varphi_{dép} = 4\pi . \Delta R/\lambda$$

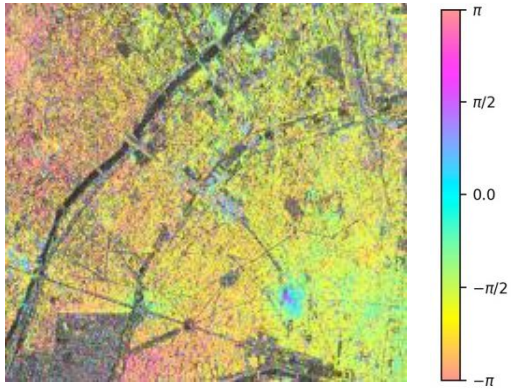
Cohérence



Interférogramme



Interférogramme différentiel



Interférométrie SAR

Limites de l'interférométrie différentielle

$$\varphi_{diff} = \varphi_{orb} + \varphi_{topo} + \varphi_{dép} + \varphi_{atm} + \varphi_{bruit}$$

- Décorrélation = perte d'information
- Délai atmosphérique : Forte variabilité spatiale et temporelle

Méthodes multi-temporelles

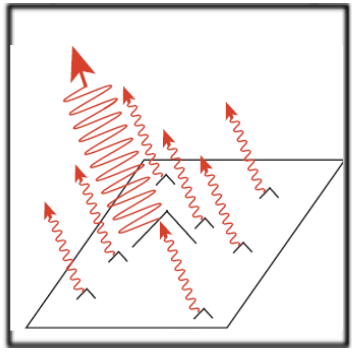
- Traitement de séries temporelles d'images radar
- Construction de réseaux d'interférogrammes
- Prise en compte de la variabilité de la cohérence et/ou des propriétés de rétrodiffusion des réflecteurs

Les rétrodiffuseurs

PS

DS

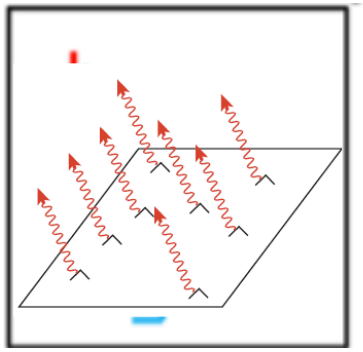
Rétrodiffuseur Ponctuel cohérent



Infrastructures, ponts, bâtiments, etc.

Rétrodiffuseur Ponctuel incohérent

Rétrodiffuseurs distribués cohérents



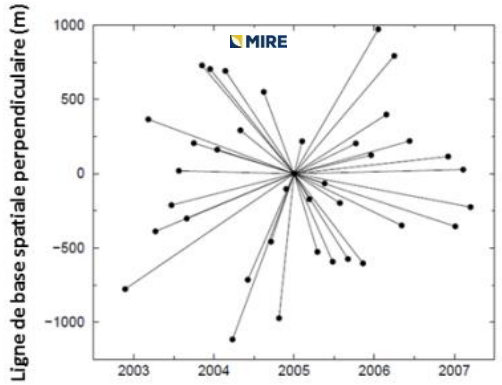
Enrochements, digues, etc.

Rétrodiffuseurs distribués incohérents

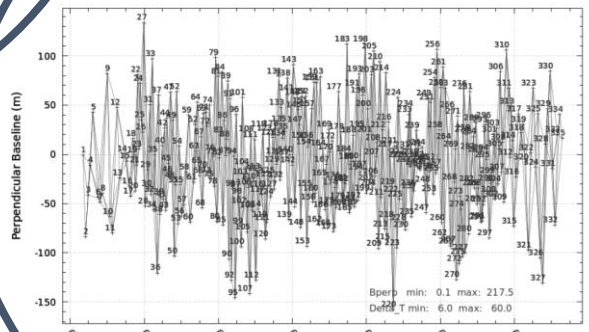
Méthodes multi-temporelles

- Sélection des diffuseurs
- Pleine résolution
- Suivi d'infrastructures

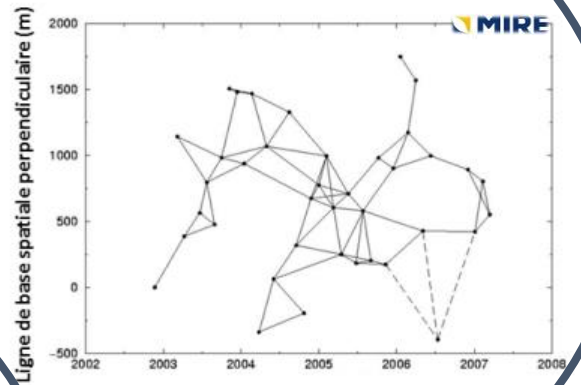
Méthodes PS



Méthodes hybrides



Méthodes SB



- Sélection d'images
- Résolution moyennée
- Phénomènes géophysiques

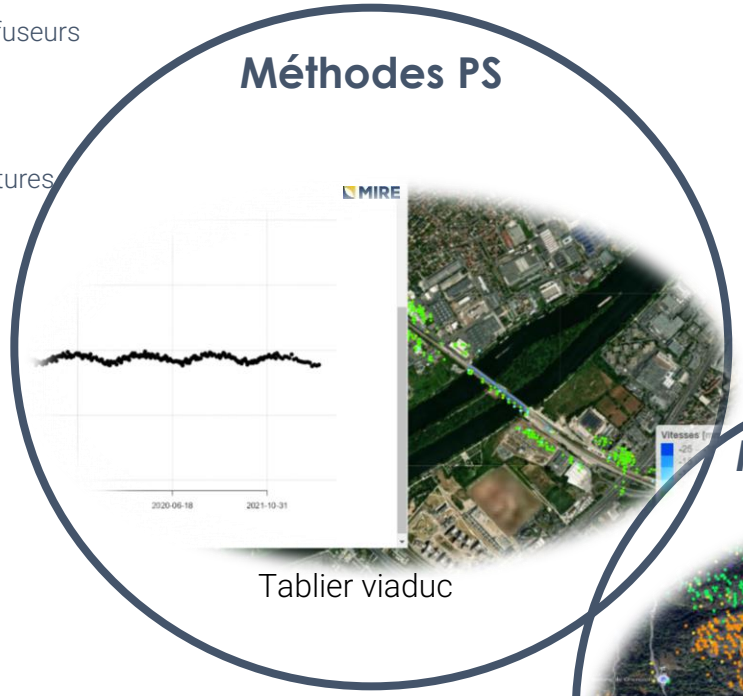
LIVRABLES

- Cartes de vitesses
- Cartes de déplacements cumulés
- Séries temporelles de déplacements

Méthodes multi-temporelles

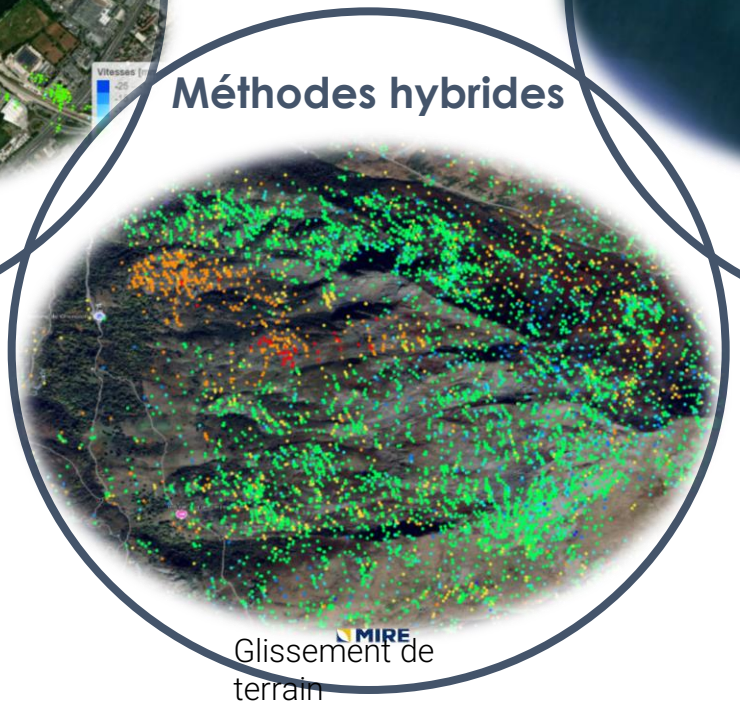
- Sélection des diffuseurs
- Pleine résolution
- Suivi d'infrastructures

Méthodes PS



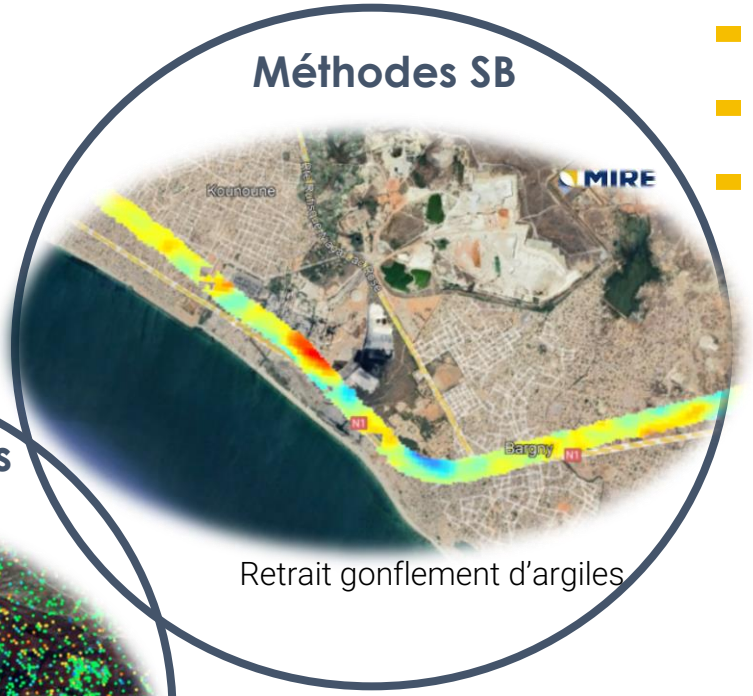
Tablier viaduc

Méthodes hybrides



Glissement de terrain

Méthodes SB



Retrait gonflement d'argiles

- Sélection d'images
- Résolution moyennée
- Phénomènes géophysiques

LIVRABLES

- Cartes de vitesses
- Cartes de déplacements cumulés
- Séries temporelles de déplacements

Méthodes multi-temporelles

$$\varphi_{diff} = \varphi_{orb} + \varphi_{topo} + \varphi_{dép} + \varphi_{atm} + \varphi_{bruit}$$

Composantes de phase	Impact sur la mesure LOS
Erreurs de MNT	Limité (mm)
Erreurs orbitales	Limité (mm)
Effets sur la rétrodiffusion (végétation)	Important (cm)
Délais atmosphériques	Important (cm)

Conditions optimales pour une étude InSAR multi-temporelle

- Référence < 2km
- Zone relativement plane
- Déplacement « lent » et comportement linéaire

Satellite	Bande	Resolution	Emprise	Temps de revisite	Potentiel avec Végétation	Précision vitesse annuelle
TerraSAR-X	X	3 m	30 km x 50 km	4–11	Faible	1 mm/an
Cosmo	X	3 m	40 km x 40 km	1–16	Faible	1 mm/an
Sentinel	C	20 m	250 km x 250 km	6–12	Modéré	~2 mm/an
ALOS-2	L	3 m	55 km x 70 km	14	Excellent	1 cm/an

Points de vigilance : déroulement de phase, fermeture de phase, estimation du délai atmosphérique

Application - Risque de dissolution de gypse

Entonnement Ouest – Gare Haussmann-Saint-Lazare

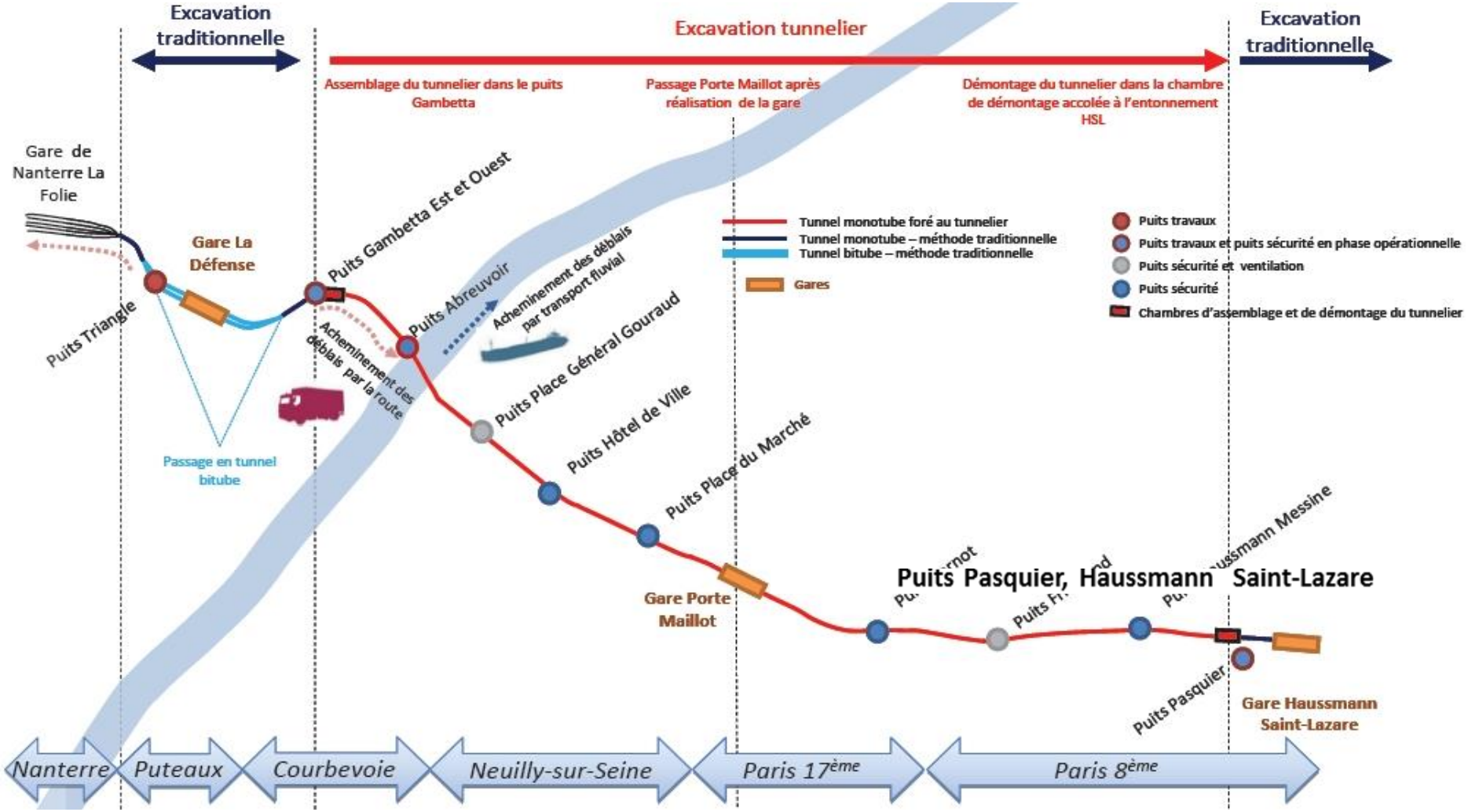
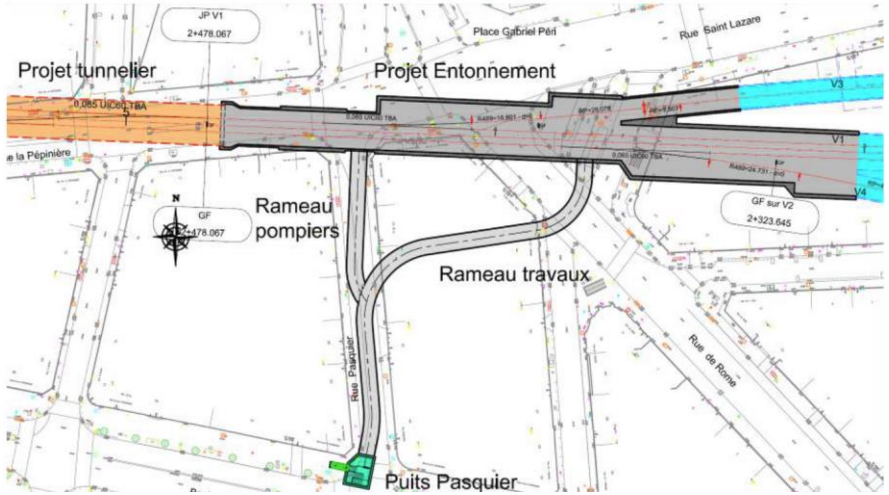


Schéma synthétique des ouvrages souterrains du projet EOLE (Source : SYSTRA)

Application - Risque de dissolution de gypse

Entonnement Ouest – Gare Haussmann-Saint-Lazare



Puits Pasquier, Haussmann Saint-Lazare

Maîtrise d'ouvrage

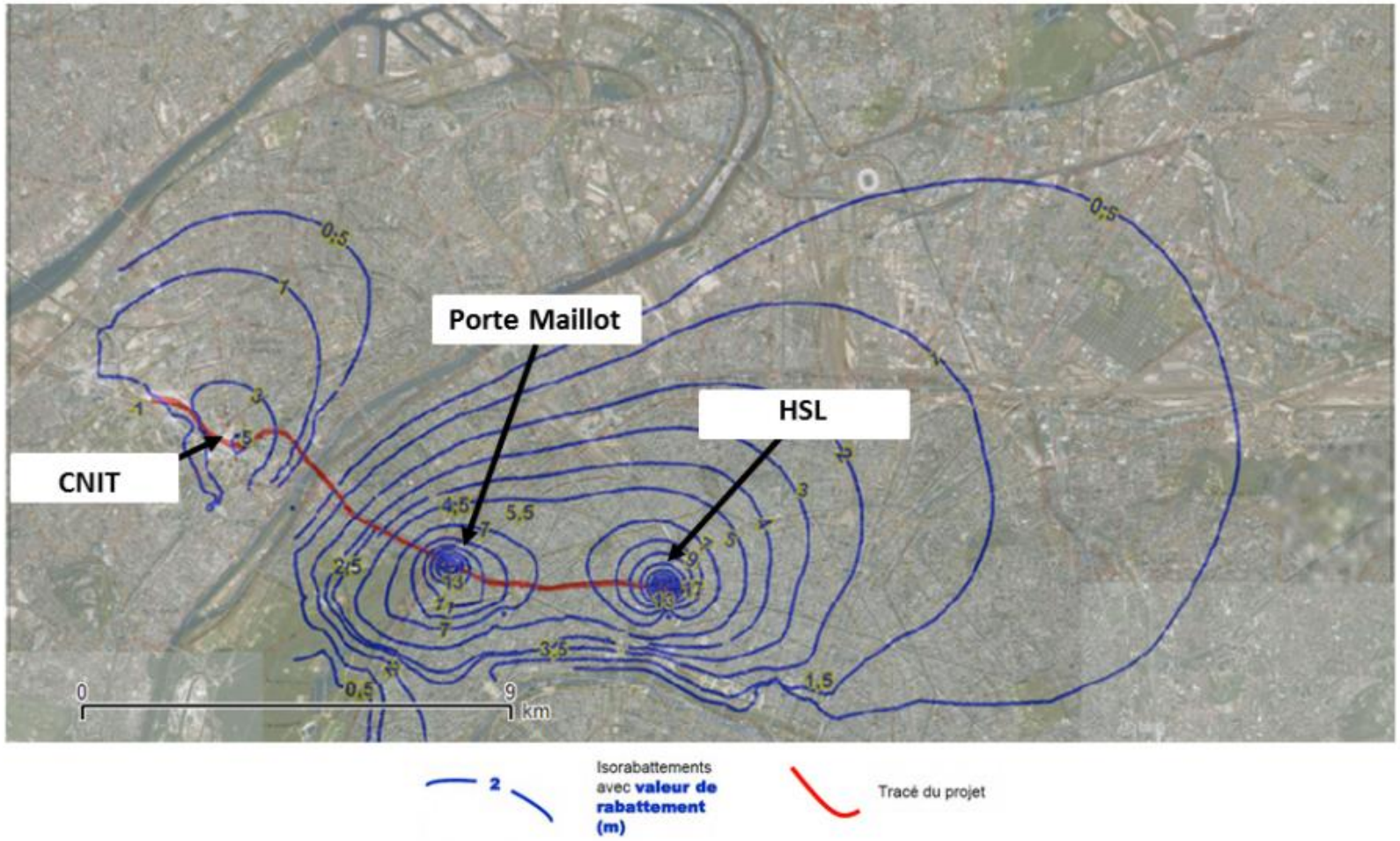
Maîtrise d'Œuvre des infrastructures souterraines

GUINTOLI demathieu bard CONSTRUCTION PIZZAROTTI FONDÉE EN 1910

Schéma synthétique des ouvrages souterrains du projet EOLE (Source : SYSTRA)

Application - Risque de dissolution de gypse

Entonnement Ouest – Gare Haussmann-Saint-Lazare



Carte d'isorabattement (estimation) dans la nappe des Sables du Cuissien liées aux pompages de rabattement de nappe (source : SNCF)

Application - Risque de dissolution de gypse

Entonnement Ouest – Gare Haussmann-Saint-Lazare

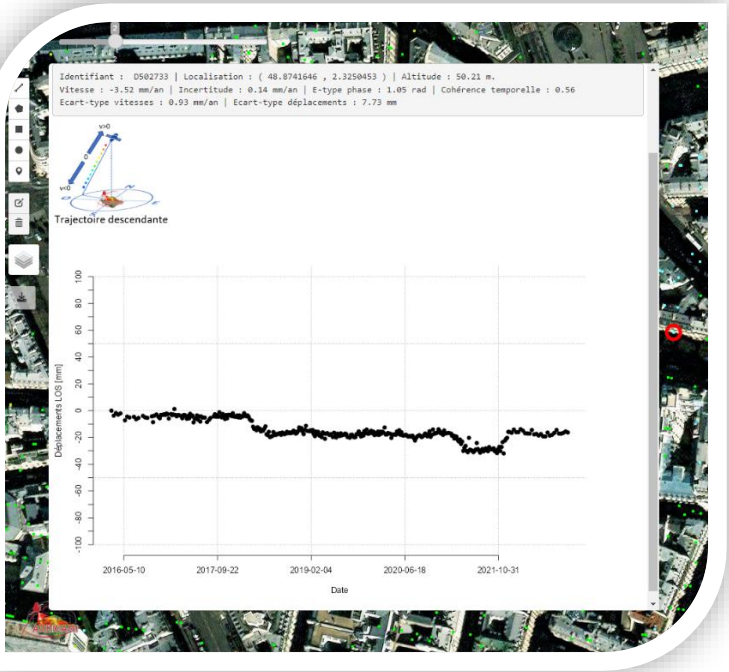
Etat zéro avant travaux sur 1 an

Suivi mensuel pendant les travaux préparatoires (2017-2018)

Suivi bimensuel sur 50 mois pendant les rabattements nappe

Suivi mensuel après arrêt des pompages

Au total
+ de 300 images radar traitées
+ de 100 mises à jour réalisées
~6 millions de mesures de déplacement



Phase conception

Analyse des mouvements **historiques** à partir des archives

Phase construction

Détermination de l'**étendue** de la zone de déformation.

Identification des **tendances** de déformation (linéaires, saisonnières, etc.)

Stabilisation

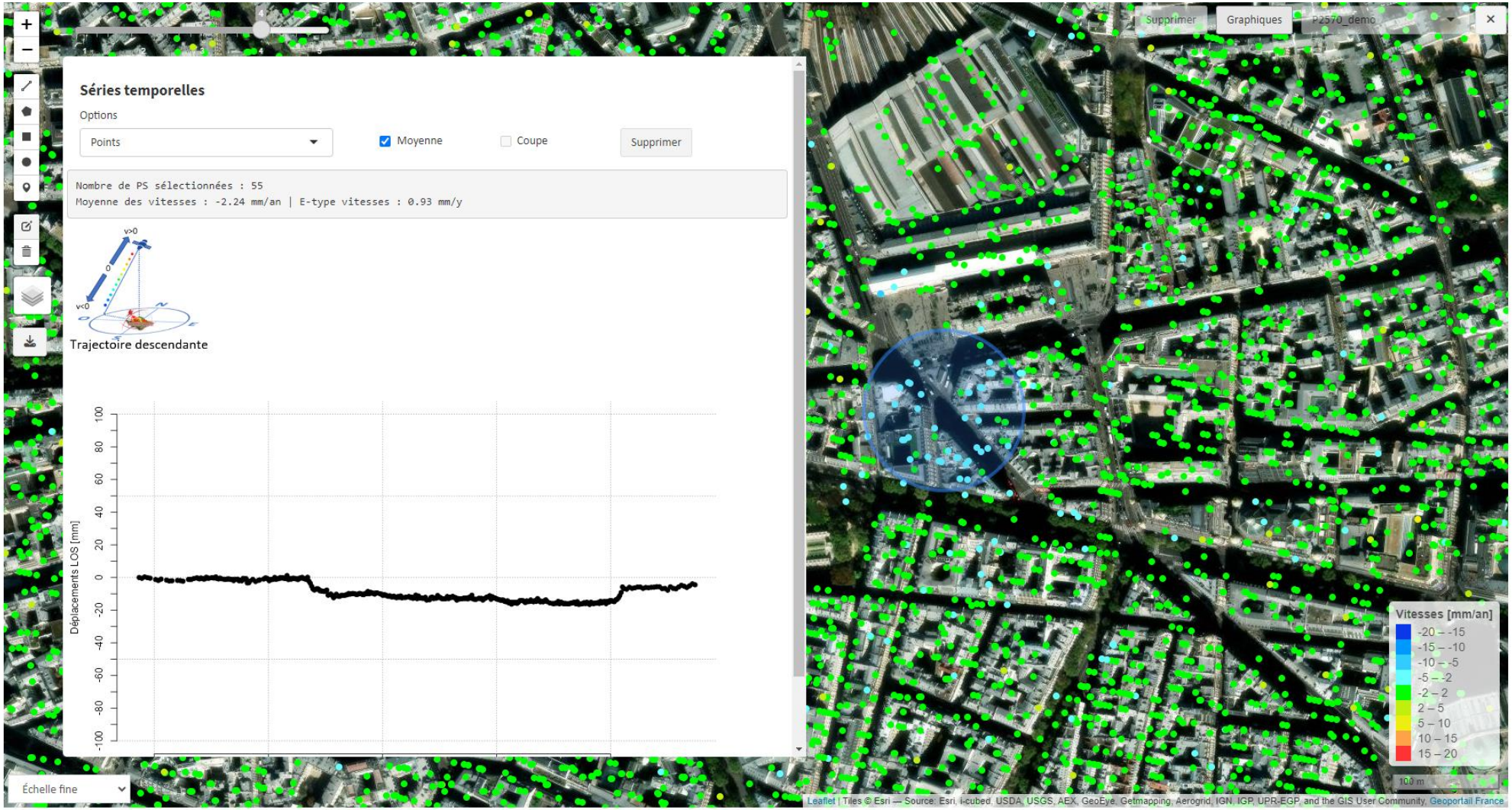
Identifier de potentiels problèmes de structures ou géotechniques

Exploitation

Remplacement possible des méthodes d'auscultation traditionnelles

Application - Risque de dissolution de gypse

Entonnement Ouest – Gare Haussmann-Saint-Lazare



Application - Risque de dissolution de gypse

Entonnement Ouest – Gare Haussmann-Saint-Lazare

Comparaison avec les mesures topographiques traditionnelles

Station totale : mesure de déplacement en 3D

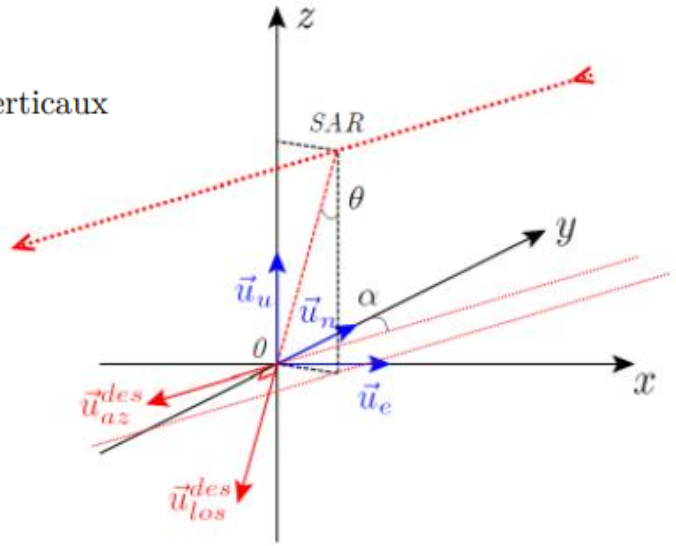
InSAR : mesure de déplacement 1D

Comment comparer ces 2 méthodes, sans interpolation et de façon qualitative ?

⇒Projection du déplacement 3D dans la ligne de visée

$$\vec{D}_{3D}^{grd} = \begin{bmatrix} D_e \\ D_n \\ D_z \end{bmatrix}$$ où D_e,D_n et D_z sont les composantes de déplacements Est/Ouest, Nord/Sud et verticaux

$$\vec{u}_{los}^{des} = \begin{bmatrix} -sin(\theta)cos(\alpha) \\ sin(\theta)sin(\alpha) \\ -cos(\theta) \end{bmatrix}$$ où θ et α sont les angles d'incidence et de la direction azimutale



Projection déplacement 3D dans la ligne de visée

$$d_{los}^{des} = (sin(\theta)cos(\alpha) \times D_e - sin(\theta)sin(\alpha) \times D_n + cos(\theta) \times D_z)$$

où θ et α sont les angles d'incidence et de la direction azimutale

Application - Risque de dissolution de gypse

Entonnement Ouest – Gare Haussmann-Saint-Lazare

Suivi InSAR réalisé par AURIGAMI sur HSL

- Etat zéro avant travaux sur 1 an (2016-2017)
- Suivi mensuel pendant les travaux préparatoires (2017-2018)
- Suivi bimensuel sur 50 mois pendant les rabattements de nappe

Comparaison mesures topographiques terrestres vs satellitaires

Type de mesure	Intervalle 1	Intervalle 2	Intervalle 3
Prismes	-0.4	-11.9	-8.5
InSAR	0.1	-11.3	-9.5

- Très forte corrélation entre mesures piézométriques, mesures InSAR et mesures topographiques
- Etude des vitesses de déformation sur 3 périodes (travaux préparatoires, début pompage, phase travaux)
- Analyse de mesures sur plus de 170 prismes
- Différence entre stations totales et InSAR ~1mm/an sur la période avec le plus de déplacements

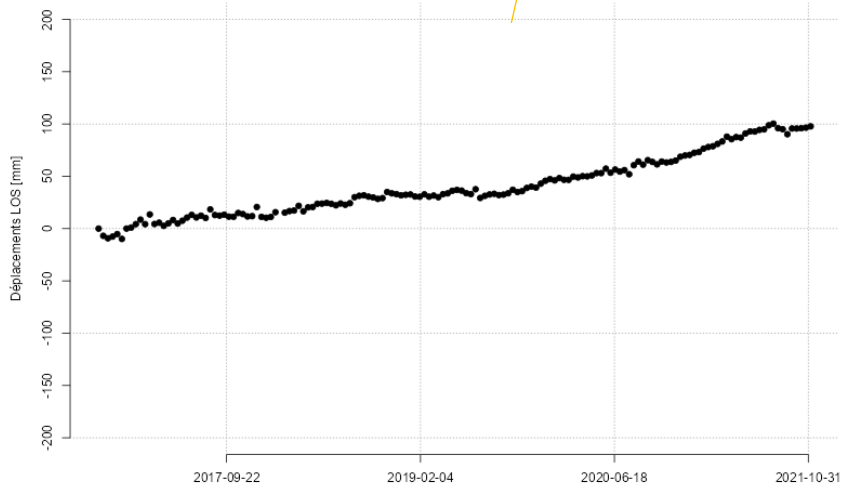
Application – Argiles gonflantes

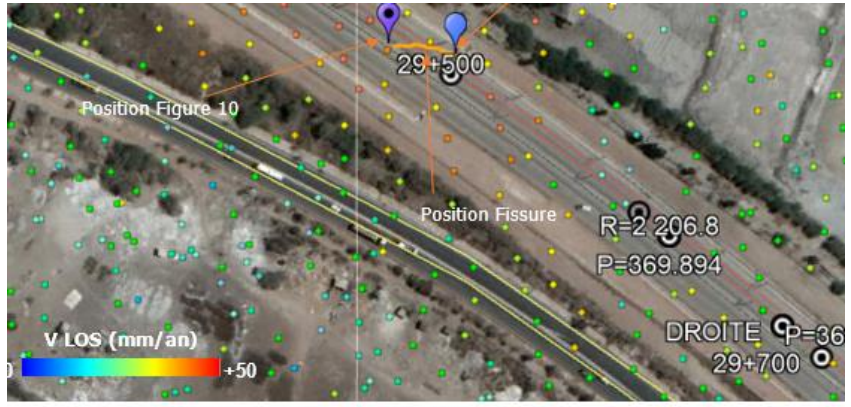
TER Dakar – Aéroport AIBD (Sénégal)

- **Périmètre analysé** : Analyse de plus de 36 km de voies existantes, ciblant une bande de 250 m centrée sur l'axe de la voie ferrée,
- **Méthodologie InSAR** : Utilisation de techniques multi-temporelles hybride à partir des images descendantes Sentinel-1.
- Une étude historique sur deux ans (2017/2018)
- Suivi opérationnel avec des mises à jour trimestrielles (2019, 2020 & 2021)
- **Résultats clés** : identification de zones instables liées aux argiles gonflantes
- **Intérêt de l'InSAR** : meilleure gestion du risque de déformation lié à la présence d'argile et de la planification des inspections après la saison des pluies

Application – Argiles gonflantes

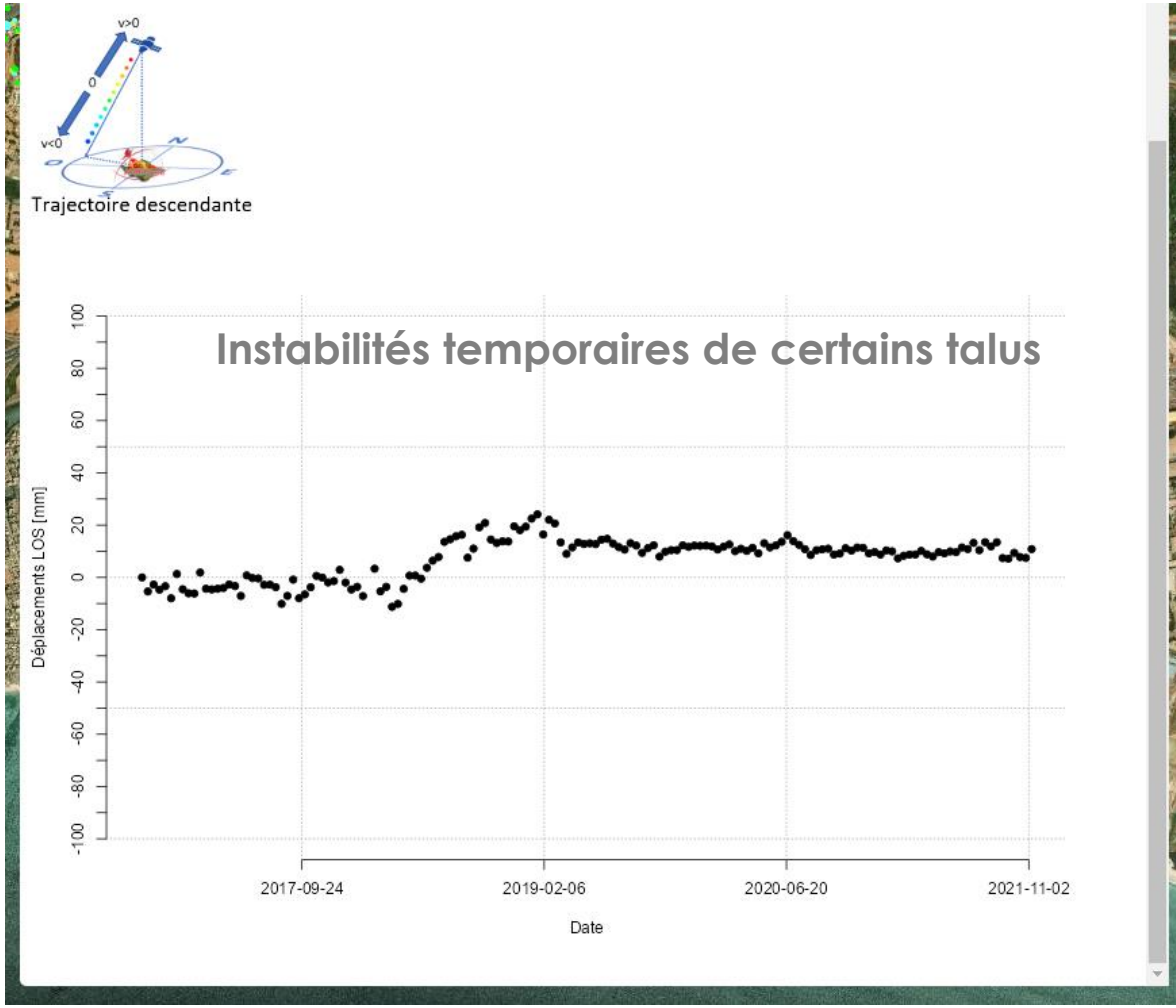
TER Dakar – Aéroport AIBD (Sénégal)

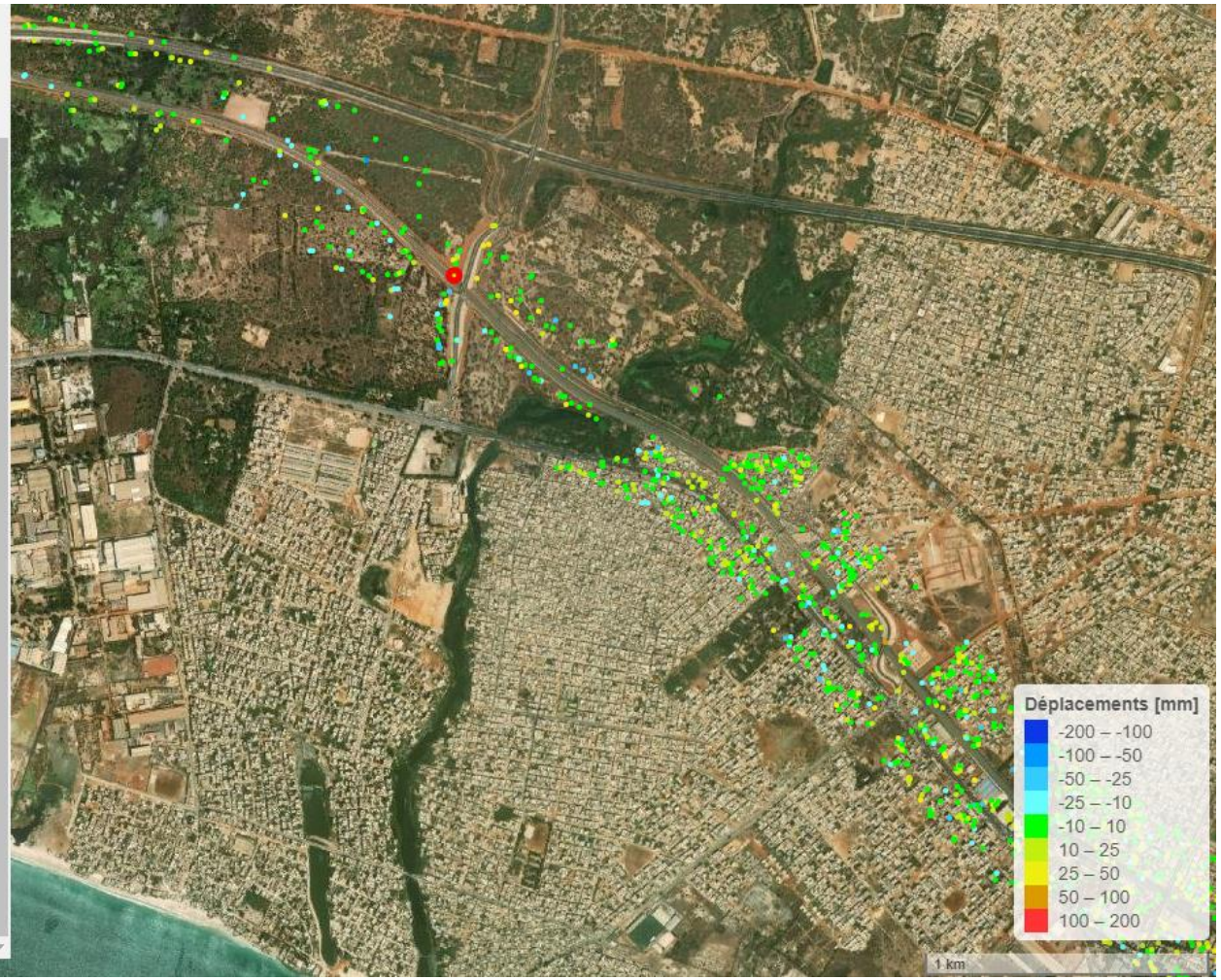




Application – Argiles gonflantes

TER Dakar – Aéroport AIBD (Sénégal)

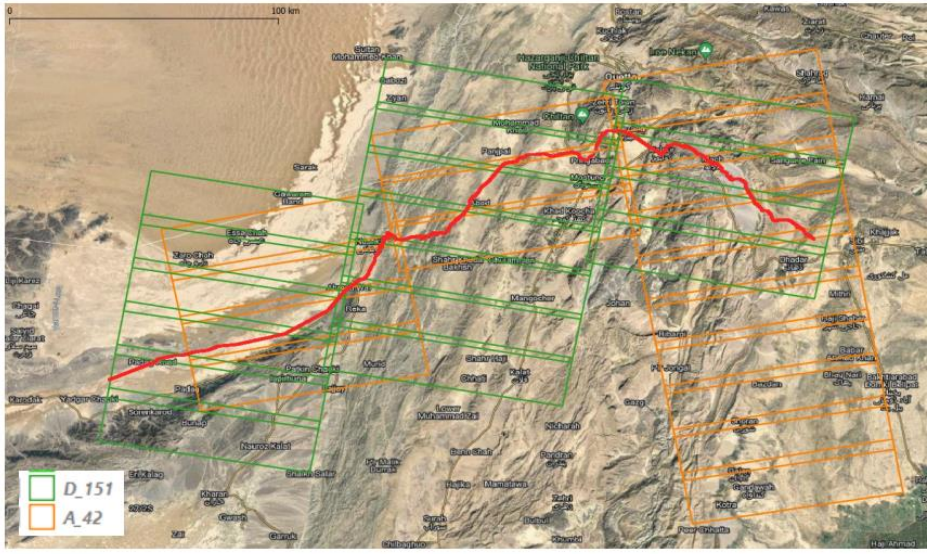




Application – Ouvrages ferroviaires

Pakistan – Projet Reko Diq

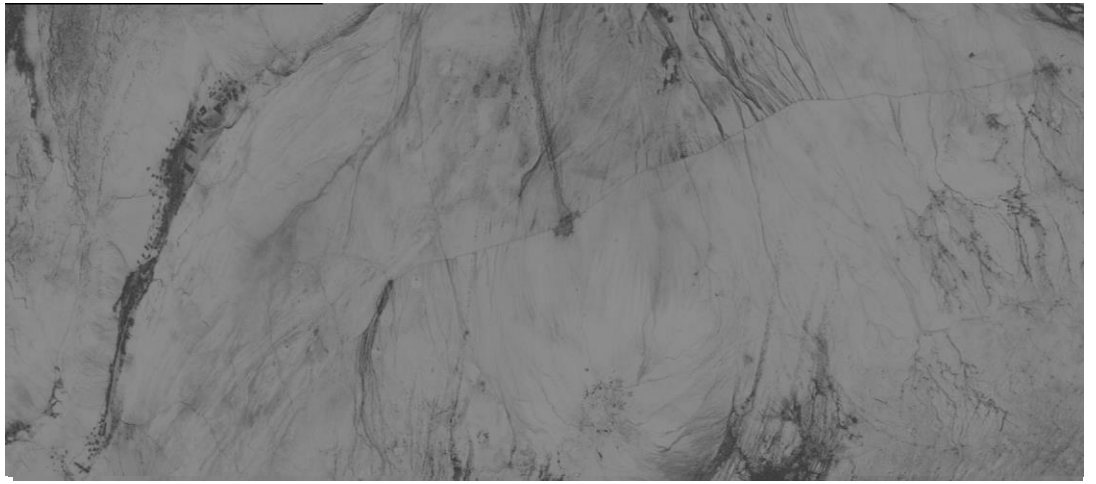
- Reko Diq : **Future exploitation minière** située au Baloutchistan.
- Le gisement représente **l'une des plus grandes réserves de cuivre et d'or au monde** avec une durée d'exploitation d'au moins 40 ans.
- **2 études InSAR distinctes** : Suivi de stabilité pour le design d'une nouvelle ligne & suivi des ouvrages sur environ 1000km de voies existantes (De Rohri à la frontière Iranienne)
- **Période et emprise de l'étude** : Traitement d'images radar Sentinel-1 couvrant la période de septembre 2021 à septembre 2023
- **Méthodologie d'acquisition** : Utilisation combinée d'images radar ascendantes et descendantes afin d'estimer les déplacements horizontaux et verticaux



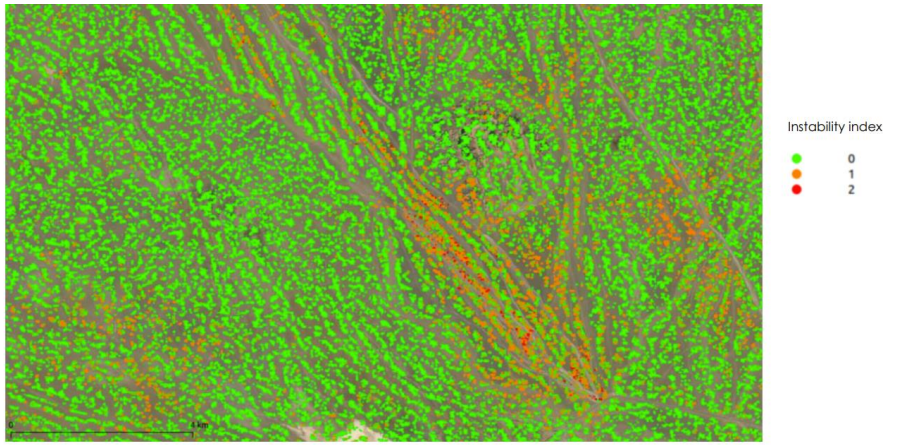
Application – Ouvrages ferroviaires

Pakistan – Projet Reko Diq

- **Cadre de l'étude** : Étude InSAR réalisée sur le corridor ferroviaire à partir d'images radar Sentinel-1 acquises entre septembre 2021 et septembre 2023.
- **Zone analysée** : Analyse d'une surface d'environ 860 km², portant sur trois tracés ferroviaires potentiels, chacun d'une longueur d'environ 50 km.
- **Résultats globaux** : La zone étudiée présente une stabilité globale satisfaisante, avec des déplacements du sol inférieurs à 5 mm dans la majorité des secteurs.



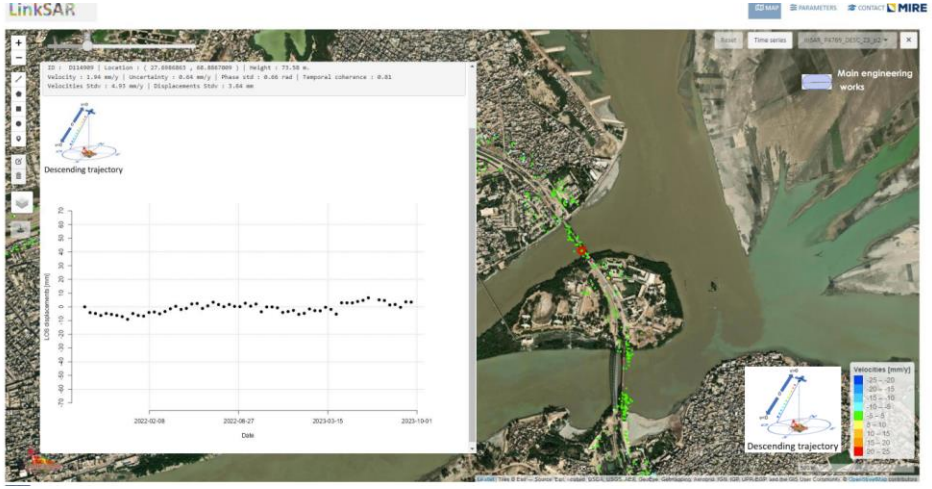
Cohérence



Application – Ouvrages ferroviaires

Pakistan – Projet Reko Diq

- **Périmètre analysé** : Analyse de plus de 950 km de voies, ciblant une bande de 200 m centrée sur l'axe de la voie ferrée, afin d'évaluer précisément la stabilité du sol au droit de l'infrastructure
- **Méthodologie InSAR** : Utilisation combinée d'images radar ascendantes et descendantes afin d'estimer les déplacements horizontaux et verticaux
- **Résultats clés** : des instabilités localisées à proximité des voies ont été détectées par l'analyse InSAR, ce qui a permis de recommander une surveillance régulière localisée des secteurs instables
- **Intérêt de l'InSAR** : meilleure gestion du risque sur les infrastructures et réduction du cout de l'auscultation en ciblant les zones instables



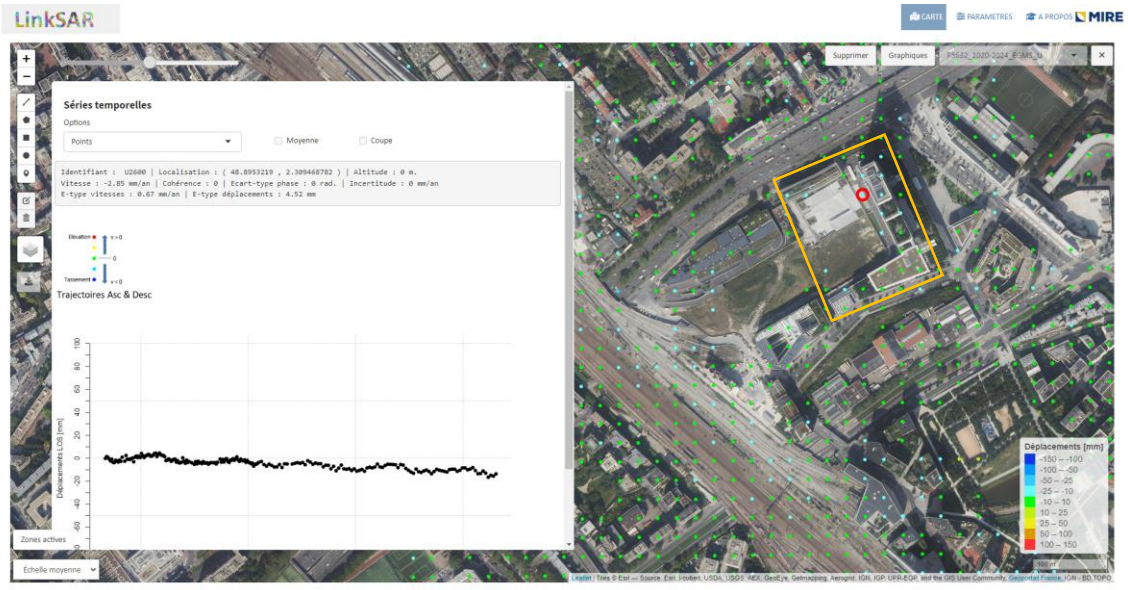
Application – Post-traitement des données EGMS

- **Objectif** : obtenir une analyse historique InSAR en urgence
- **Méthode** : utilisation des données EGMS LOS (Level 2B) et interpolation des données Est/Ouest et verticaux à partir d'une grille mieux résolue (25m)

$$\begin{pmatrix} d_{\mathrm{LOS}}^{\mathrm{asc}} \\ d_{\mathrm{LOS}}^{\mathrm{desc}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos(\alpha_{\mathrm{asc}}) & \sin(\theta_{\mathrm{asc}}) & \cos(\theta_{\mathrm{asc}}) \\ -\cos(\alpha_{\mathrm{desc}}) & \sin(\theta_{\mathrm{desc}}) & \cos(\theta_{\mathrm{desc}}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_E \\ d_U \end{pmatrix}$$

θ : angle d'incidence & α : angle d'azimut du satellite

- **Résultat** : analyse de la stabilité à l'échelle d'un ouvrage ou d'un bâtiment possible
- **Limites** : manque d'indicateurs de qualité (cohérence temporelle uniquement, pas d'informations sur les résidus, etc.)



Conclusion

Potentiel d'utilisation de l'InSAR pour un usage opérationnel

- Outil tout temps d'une grande précision - mesures 1D – Interprétation déplacement horizontal & vertical possible
- Cartographie des aléas et suivi de l'évolution des vitesses de déformations – phénomènes +/- lents
- Le choix des données (longueur d'onde, résolution, période d'acquisition) et des méthodes doit être adapté au contexte
- Un suivi de la qualité des traitements et des résultats est nécessaire

Les futures données SAR en libre accès

NISAR (NASA-ISRO Synthetic Aperture Radar)

Lancement : Juillet 2025

Longueurs d'onde : Bande L (~24 cm) et bande S (~9.3 cm)

Résolution : 3x7 m (L), 24x7 m (S)

Disponibilité : Janvier 2026 - échantillons d'images non calibrées

Juillet 2026 – Disponibilité progressive des données calibrées - A confirmer

ROSE-L – Complément à Sentinel-1

Lancement : 2028-2029

Longueurs d'onde : Bande L (~23 cm)

Résolution : ~5 à 10m

Sentinel-1 next-generation

Lancement : Courant 2033

Longueurs d'onde : Bande C (~5,6 cm)

Résolution : ~5 x 5m (contre ~5 x 20m actuellement)

CONTACTEZ-NOUS !

MIRE
ZONE INDUSTRIELLE RUE EUGENE FREYSSINET 77500
CHELLES
T : +33 (0)1 41 91 50 60

www.mire-sas.com

NGE

Rejoignez-nous sur les réseaux sociaux