



TRE
ALTAMIRA
A CLS Group Company

L'interférométrie satellite au rendez-vous des projets d'infrastructures sur Paris et l'Ile de France pour les 15 ans à venir

INFORMATION FROM SPACE

Colloque SFPT, 01 juin 2017

tre-altamira.com | © TRE ALTAMIRA 2016

- » Présentation de TRE ALTAMIRA Groupe CLS
- » La mesure des mouvements de surface
- » Exemples et cas d'étude
- » Discussions

Présentation TRE ALTAMIRA Groupe CLS

Une équipe leader en InSAR

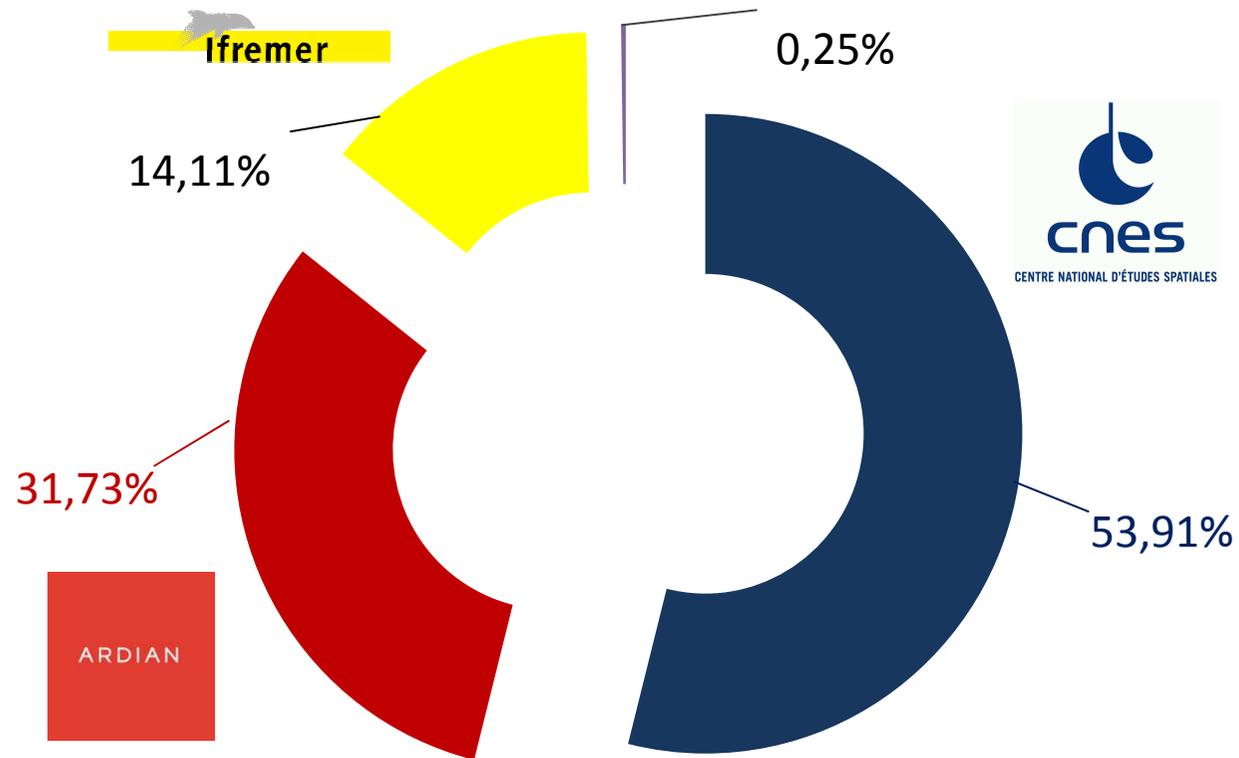
Equipe leader dans le domaine de l'InSAR pour la mesure du mouvement du sol:

- » Des bureaux à Milan, Vancouver et Barcelone
- » La plus grande équipe au niveau international : 75 personnes
- » Une chaîne de traitement SAR PSI brevetée : SqueeSAR™
- » Activité R&D



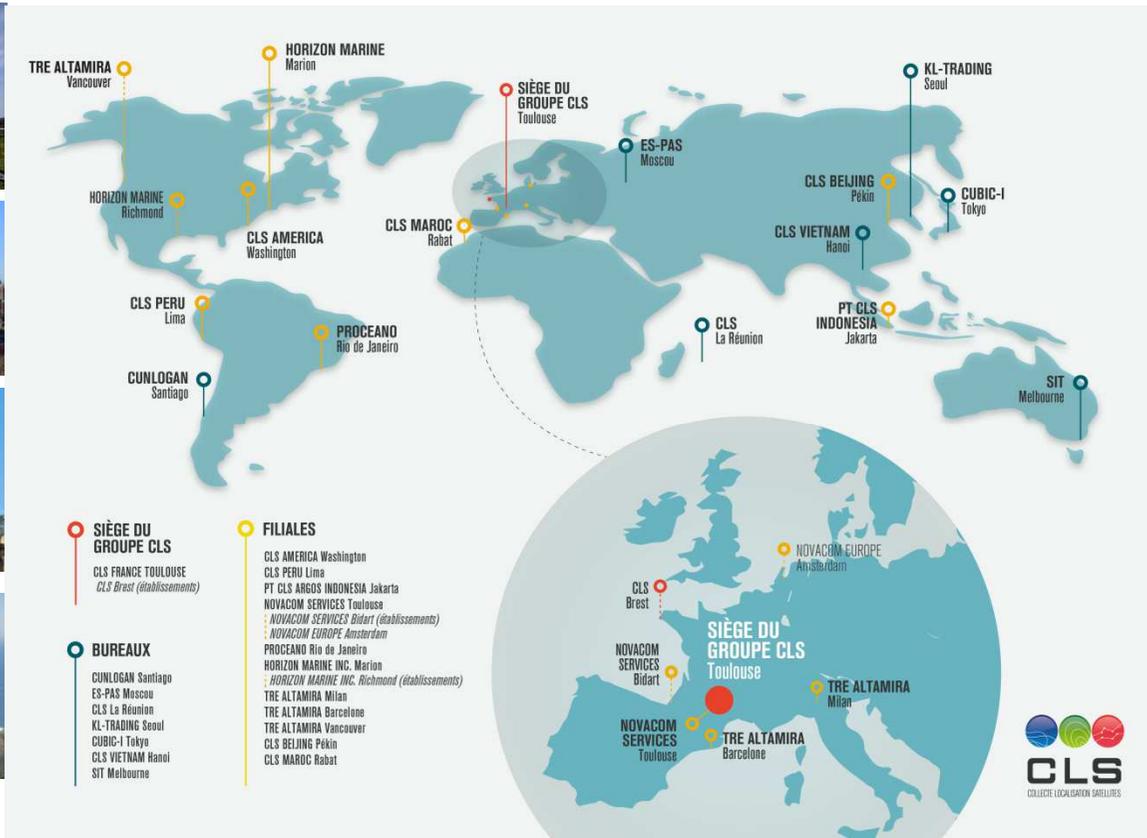
Présentation TRE ALTAMIRA Groupe CLS

Le Groupe CLS



» Les six principaux secteurs d'activités sont:





26 bureaux et filiales,
650 personnes monde,
113 M€ C.A. en 2016

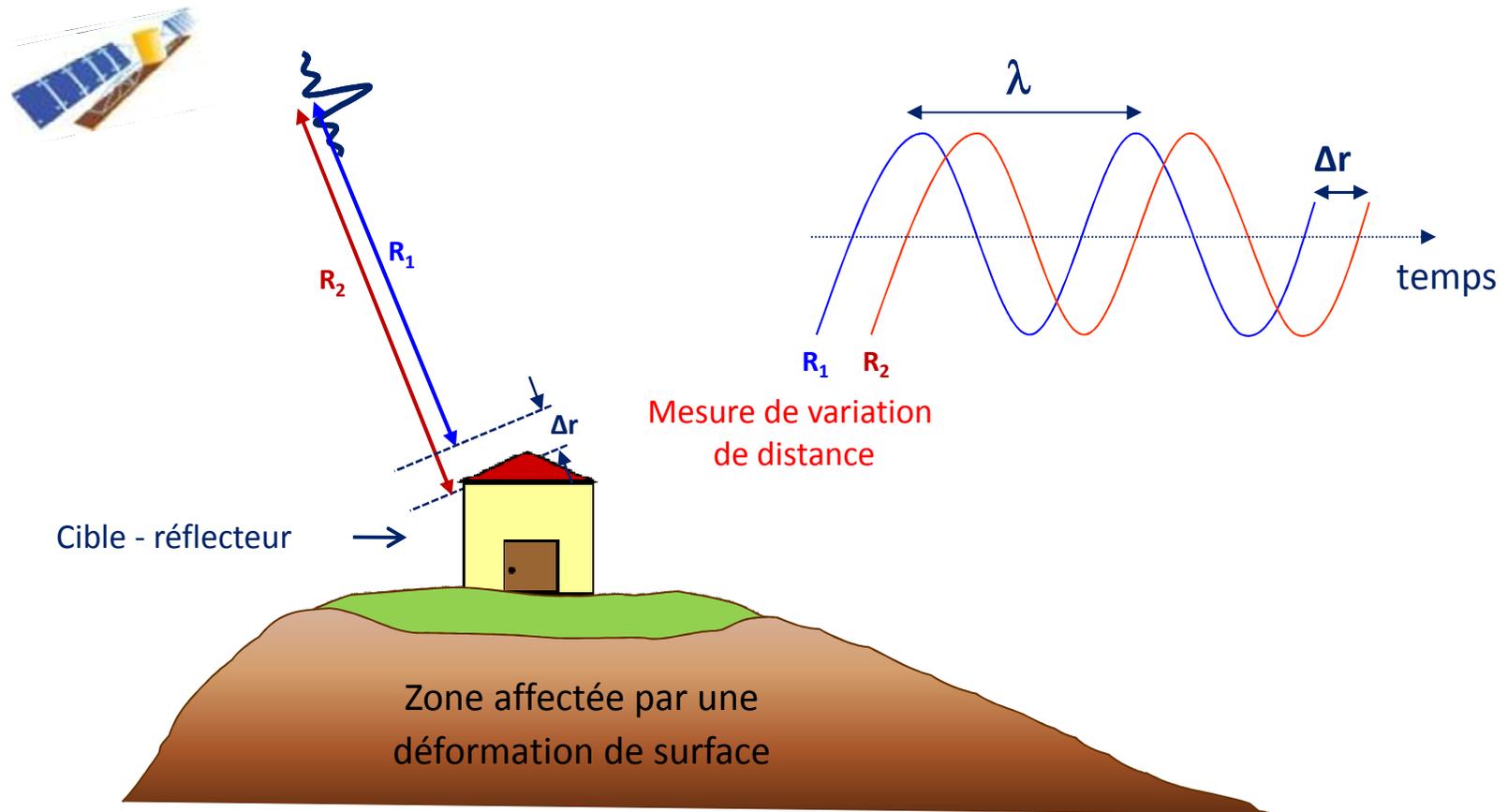


- » Présentation de TRE ALTAMIRA Groupe CLS
- » La mesure des mouvements de surface
- » Exemples et cas d'étude
- » Discussions

La mesure des mouvements de surface

Mesure de la variation de distance associée à la déformation

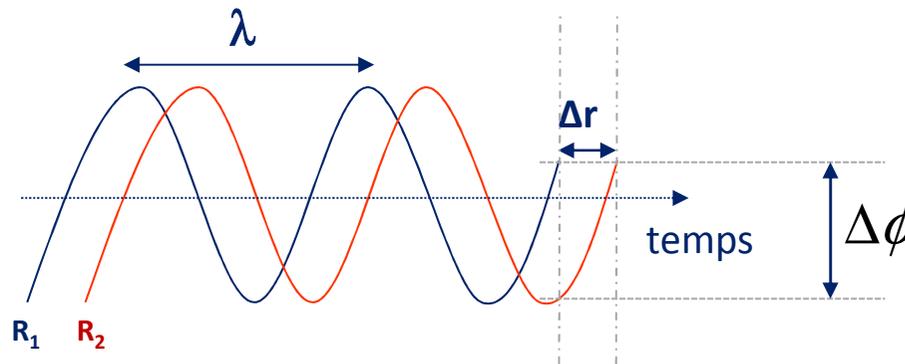
Mesure de la distance capteur-cible afin de détecter la possible variation de distance associée à la déformation du sol



Interférométrie (InSAR): comparaison entre images radar → variation de distance

La mesure des mouvements de surface

Sensibilité millimétrique



$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r$$

Longueurs d'onde:

Bande X = 3.10 cm

Bande C = 5.66 cm

Bande L = 24.0 cm

- » Les longueurs d'onde dans lesquelles les satellites opèrent sont de l'ordre de quelques cm.
- » Le système est sensible à des différences de phase plus petites qu'1 rad (et à des Δr de l'ordre d'une fraction de λ)

 **Sensibilité millimétrique**

La mesure des mouvements de surface

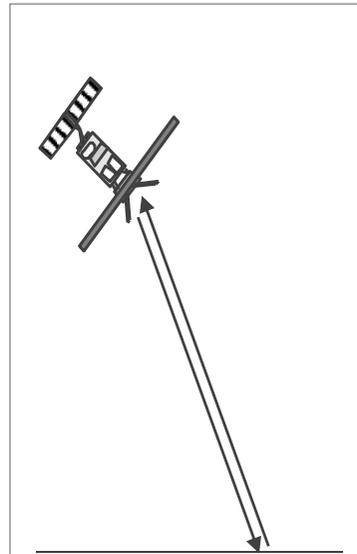
La technologie PSI et l'algorithme SqueeSAR™ (1/2)

Satellite Radar

Interférométrie =	Superposition d'ondes pour détecter leurs différences
Synthetic Aperture Radar =	Système Radar Haute Résolution

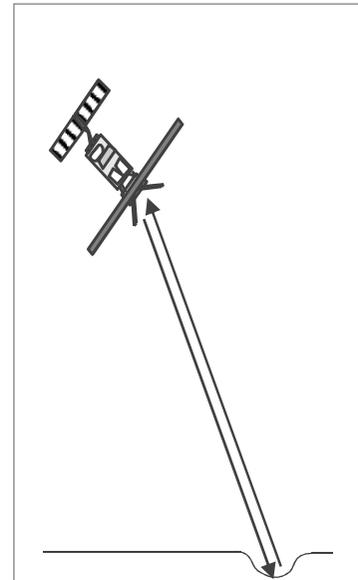


1^{ère} Observation 1^{ère} Mesure



Evaluation avec une précision millimétrique de la distance de référence entre le capteur et le sol

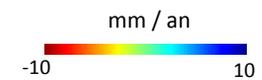
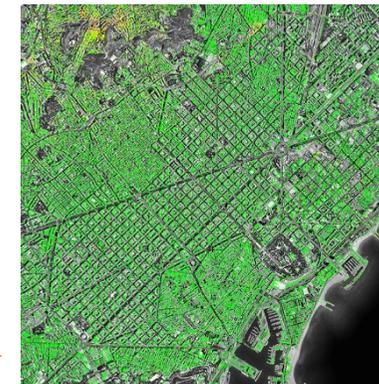
2^{ème} Observation 2^{ème} Mesure



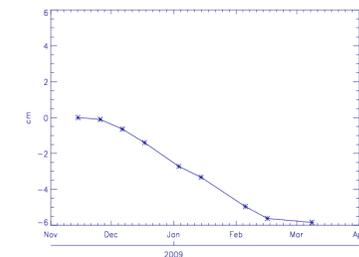
La détection du changement de la distance entre le sol et le capteur indique un mouvement

Résultats

Carte de mesure des mouvements de terrain



Séries temporelles pour chaque point de mesure

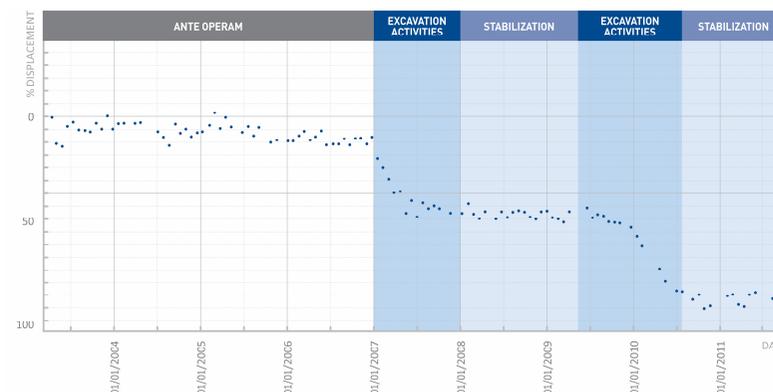
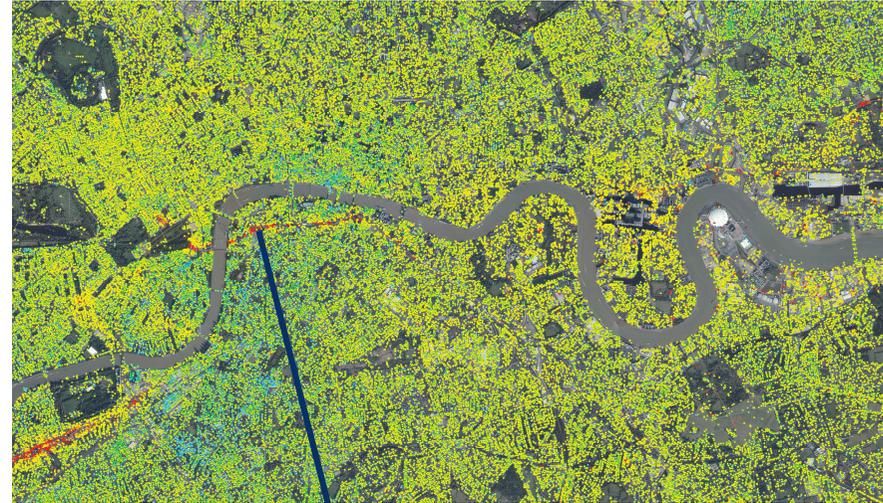


La mesure des mouvements de surface

La technologie PSI et l'algorithme SqueeSAR™ (2/2)

Une analyse SqueeSAR™ fournit les informations suivantes pour chaque point de mesure :

- » **Position** dans un système de coordonnées spécifique [m],
- » **Taux de déplacement moyen annuel** [mm/an],
- » **Séries temporelles de déplacement** qui montrent l'évolution du déplacement du point de mesure sur la période considérée [mm].



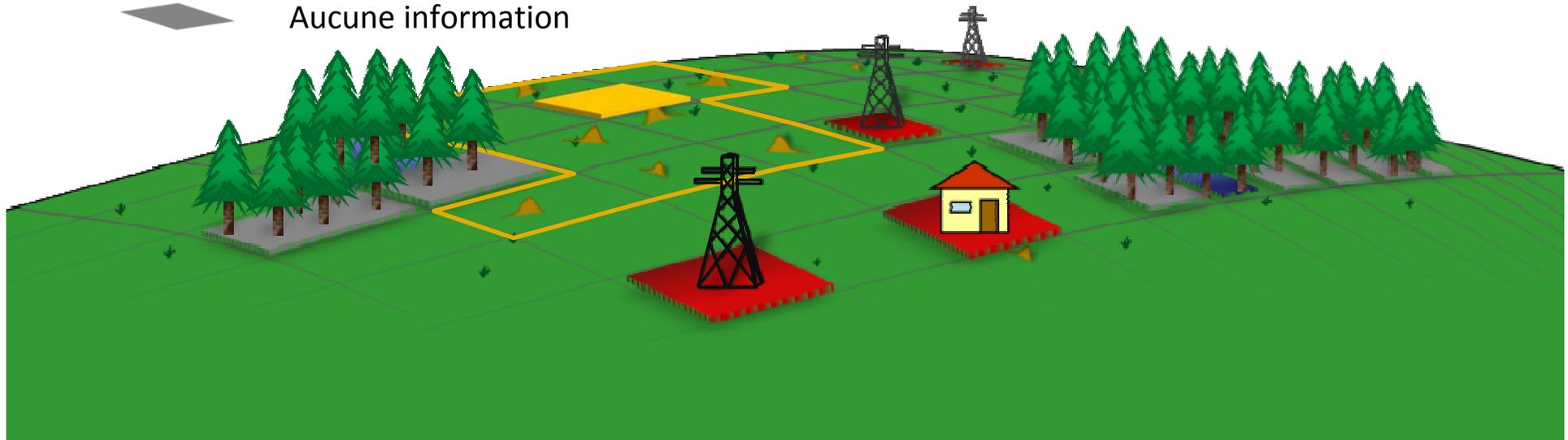
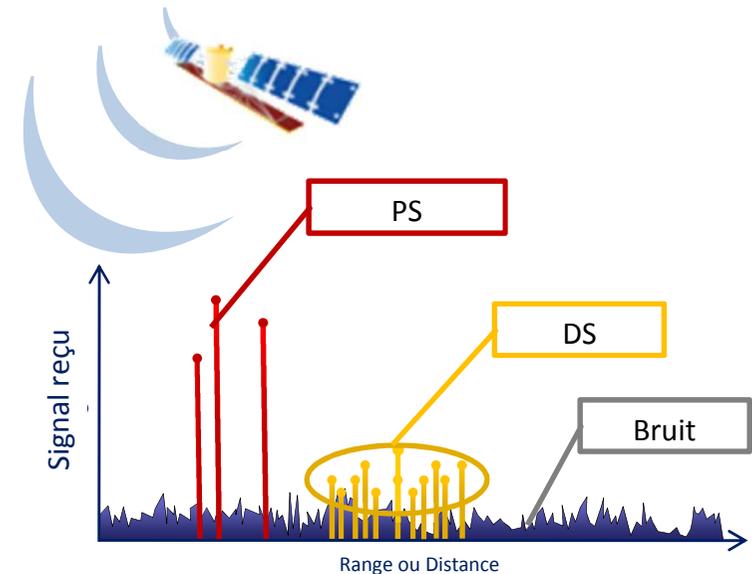
Série temporelle de déplacement

La mesure des mouvements de surface

Caractéristiques de l'algorithme SqueeSAR™

- » SqueeSAR™ est basé sur les méthodes d'interférométrie radar les plus avancées.
- » Deux types de réflecteurs sont en particulier considérés pour une densité optimale de points de mesure:

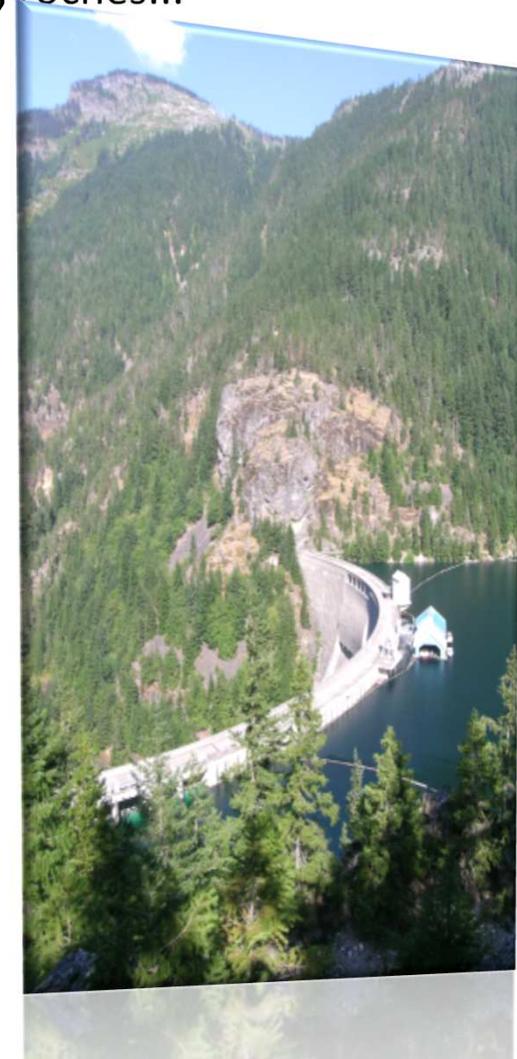
-  Cibles ponctuelles (Permanent Scatterers ou PS)
-  Cibles distribuées (Distributed Scatterer ou DS)
-  Aucune information



La mesure des mouvements de surface

Les points de mesure - Les cibles ponctuelles (ou PS) usuelles

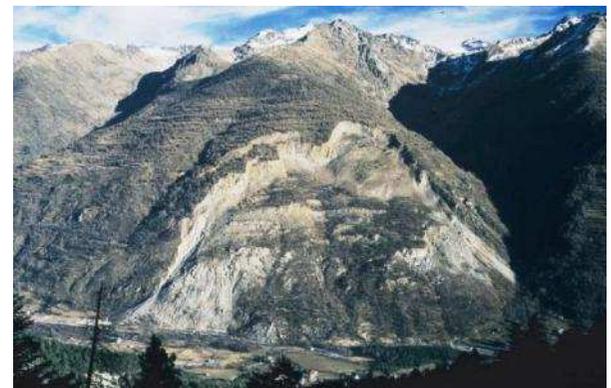
- » Ce sont des cibles radar qui ont une rétrodiffusion constante dans le temps: bâtiments, infrastructures, viaducs, antennes, roches...



La mesure des mouvements de surface

Les points de mesure - Les cibles distribuées (ou DS) usuelles

- » En l'absence de réflecteur dominant (PS), certains pixels peuvent être regroupés afin d'obtenir une réflexion suffisamment forte et stable dans le temps... Ils forment les DS ou cibles distribuées.



La mesure des mouvements de surface

Points de mesures naturels et réflecteurs artificiels

Réflecteurs naturels (PS et DS)



- PS et DS comme décrit précédemment
- Permettent de réaliser des études historiques

Coins Réflecteurs



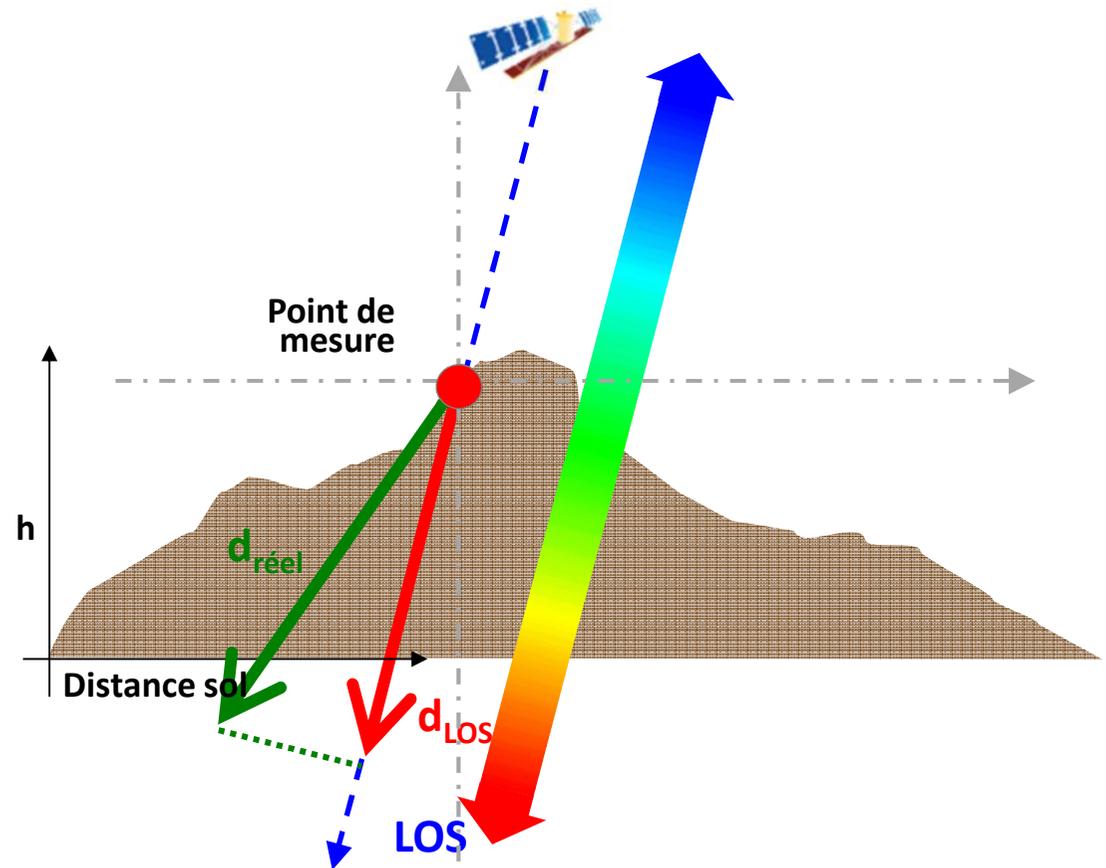
- Garantissent des points de mesure dans les contextes défavorables (présence de végétation)
- Permettent ainsi de densifier le réseau de mesures.

Certaines zones présentent des réflecteurs naturels.
Dans les zones sans réflecteurs naturels, des coins réflecteurs artificiels peuvent être déployés. 15

La mesure des mouvements de surface

Mesure dans la ligne de visée (1/2)

- » Les satellites radar mesurent les mouvements dans le plan image du radar, c'est-à-dire dans la direction de leur ligne de visée (*Line-of-Sight* en anglais ou *LOS*).
- » La *LOS* est la direction en laquelle le capteur regarde la surface de la Terre.

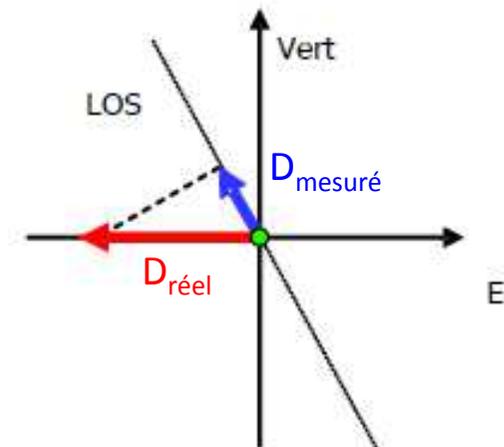
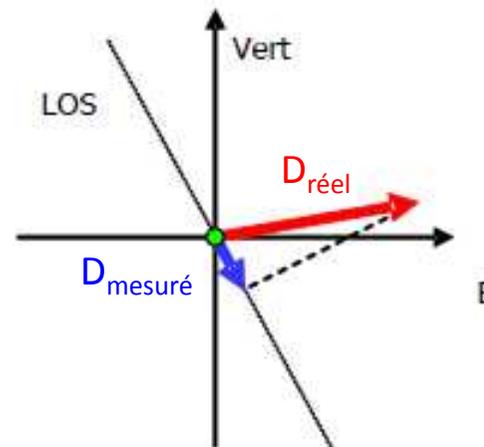
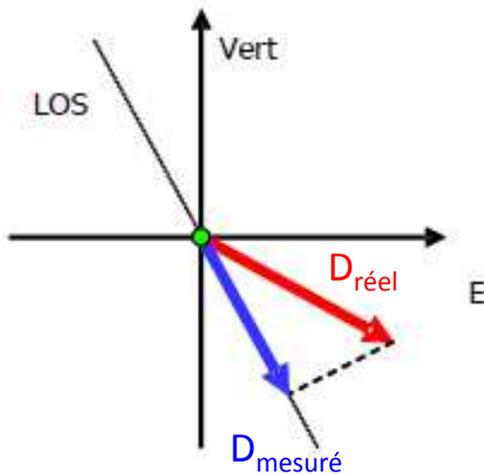


- Les points de mesure qui se déplacent en direction du radar sont représentés à partir d'une échelle de couleur variant du **cyan au bleu foncé**.
- Les points de mesure qui ne montrent aucun mouvement sont codés en **vert**.
- Les points de mesure qui s'éloignent du satellite sont représentés à partir d'une échelle de couleur variant du **jaune au rouge**.

La mesure des mouvements de surface

Mesure dans la ligne de visée (2/2)

- » Les satellites radar peuvent uniquement mesurer les mouvements dans la direction de leur ligne de visée
 - Si la direction du mouvement est proche à l'angle de la ligne de visée alors le mouvement réel et le mouvement mesuré seront très semblables.
 - Le mouvement LOS peut être différent du mouvement réel spécialement dans les cas où le terrain est affecté par un déplacement qui n'est pas vertical.



La mesure des mouvements de surface

Le point de référence REF

- » L'InSAR est un instrument → les mesures de mouvement sont **relatives à une référence**.
- » Les mesures SqueeSAR™ sont faites en référence à un point de mesure (REF) qui est supposé stable.
- » Ce point est sélectionné durant le traitement à partir de ses caractéristiques (bonne rétrodiffusion, bons paramètres de qualité....).

La mesure des mouvements de surface

Écart-type de la mesure de déplacement

- » La précision de la mesure est mesurée à partir de la valeur d'écart-type.
- » Elle dépend :
 - De la **position du point de mesure** par rapport au point de référence
 - De la composition du **jeu de données** traité
 - Du **type du point de mesure**
 - De la **qualité de l'estimation du bruit atmosphérique**

Ecart-type	
Vitesse moyenne de déplacement	$\pm 2-3$ mm/an
Mesure individuelle de déplacement	± 5 mm

Valeurs théoriques pour un jeu de données de plus de 40 images acquis sur une période minimale de 2 ans

La mesure des mouvements de surface

Précision de la géolocalisation

Localisation du point de mesure	Position Nord	Position Est	Hauteur ellipsoïdale
Satellites bande X	± 1 m	± 4 m	± 1.5 m
Satellites bande C	± 7 m	± 2 m	± 1.5 m

- » Présentation de TRE ALTAMIRA Groupe CLS
- » La mesure des mouvements de surface
- » **Exemples et cas d'étude**
- » Discussions

Applications dans le domaine des infrastructures

Les phases de construction: de la planification à la maintenance

Planification



- **Avant construction:** Etat des lieux dans les zones de futures constructions

Construction



- **Durant la construction:** Mesure d'impact du chantier sur les zones adjacentes
- **Phase post-construction:**
 - Mesure du tassement des nouvelles infrastructures
 - Expertise en cas de litige

Maintenance



- **Contrôle des déformations**
- **Suivi des glissements de terrain**

La technologie InSAR s'inscrit dans toutes les phases des projets de construction, elle permet d'analyser la dynamique des mouvements des zones concernées.

Pour les projets qui nécessitent une information à l'échelle du bâti, les missions satellites de Haute Résolution opérant en bande X sont les plus pertinentes, à cela 3 raisons principales :

- » **La résolution spatiale**
- » **La sensibilité au mouvement**
- » **La haute fréquence temporelle**

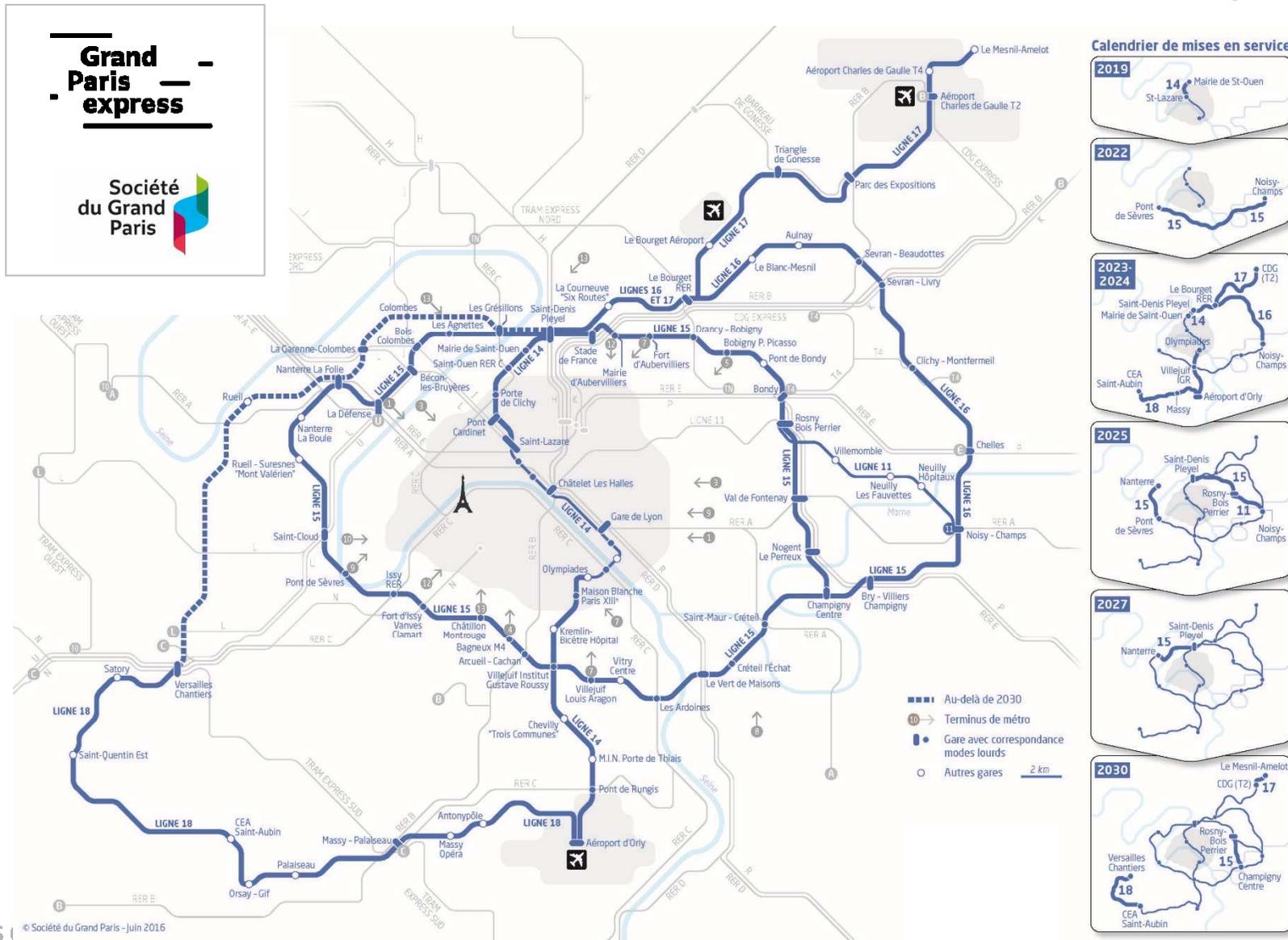
- » Les changements de températures engendrent souvent une modification du volume de structures.
- » Les températures pouvant varier d'environ une vingtaine de degrés entre été et hiver, des déformations sont attendues sur certains ouvrages.... Ces effets sont plus visibles en bande X.
- » Dans un interférogramme, l'intensité du signal correspondant à la dilatation thermique dépend de la différence de température entre les deux dates d'acquisition considérées.



Construction d'un réseau de lignes de métro France

Projet InSAR Grand Paris Express

Réseau du Grand Paris Express

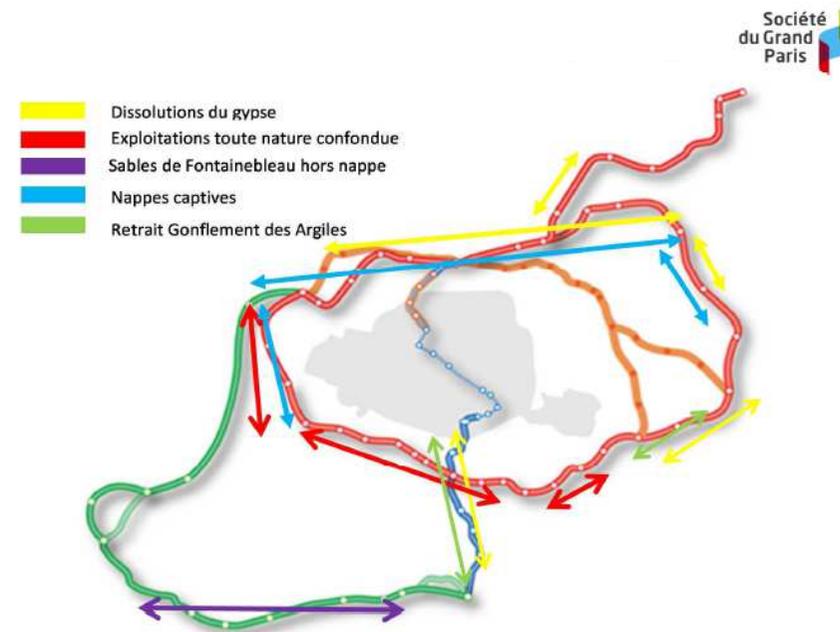


Stratégie proposée et solution technique

Risques géologiques et hydrogéologiques

Risques géologiques et hydrogéologiques majeurs sur le tracé du Grand Paris

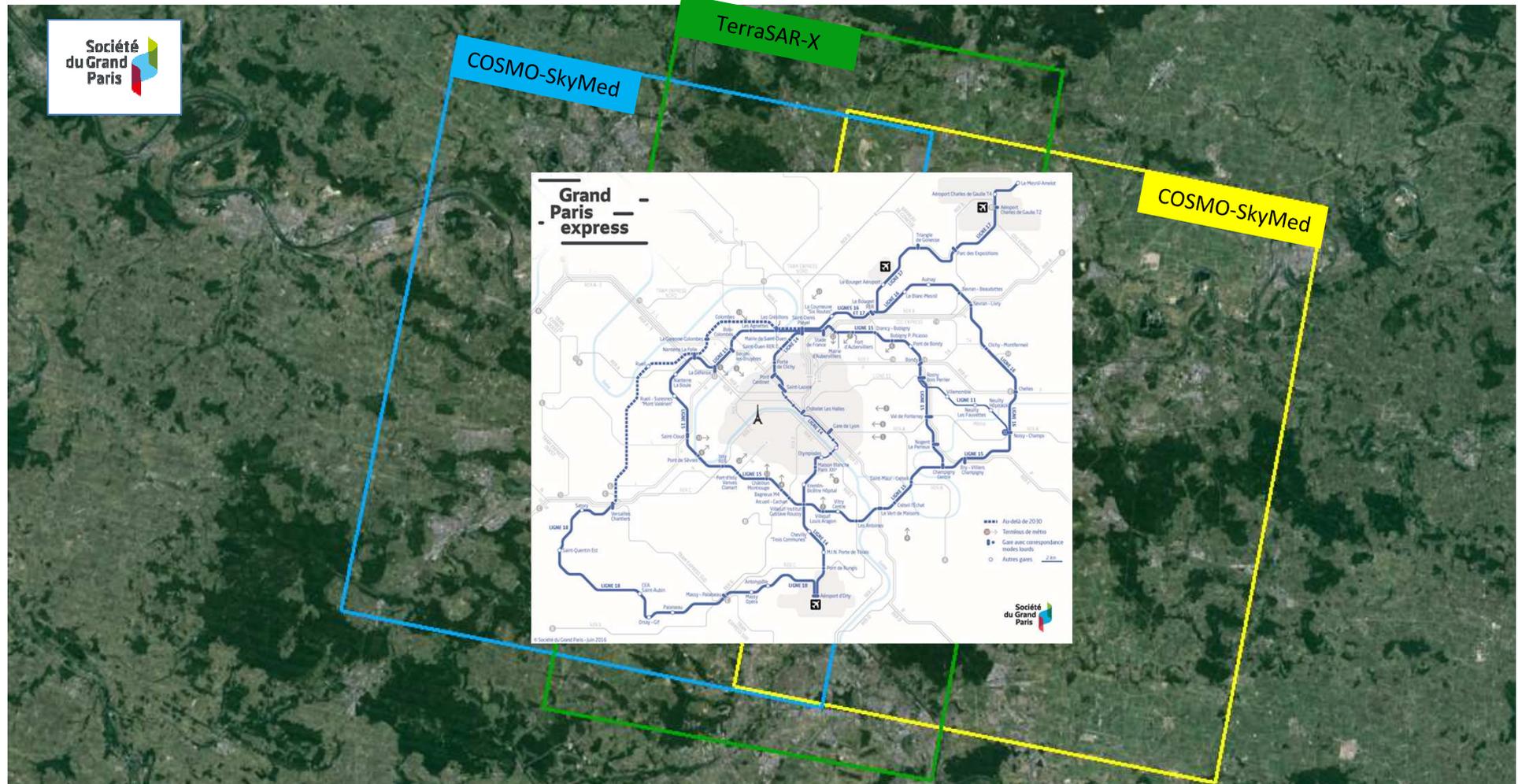
- » Risques Gonflement – Retrait des Argiles (Argiles Vertes et Argiles Plastiques),
- » Risques liés au creusement au tunnelier dans les Sables de Fontainebleau hors nappe,
- » Risques liés aux nappes captives,
- » Risques liés aux dissolutions de gypse,
- » Risques liés aux exploitations de matériaux (Sables de Fontainebleau, Gypse, Calcaire Grossier, Craie, Alluvions de la Marne et de la Seine, Argile à Meulière).



Recensement des contraintes liées à la géologie

Projet InSAR Grand Paris Express

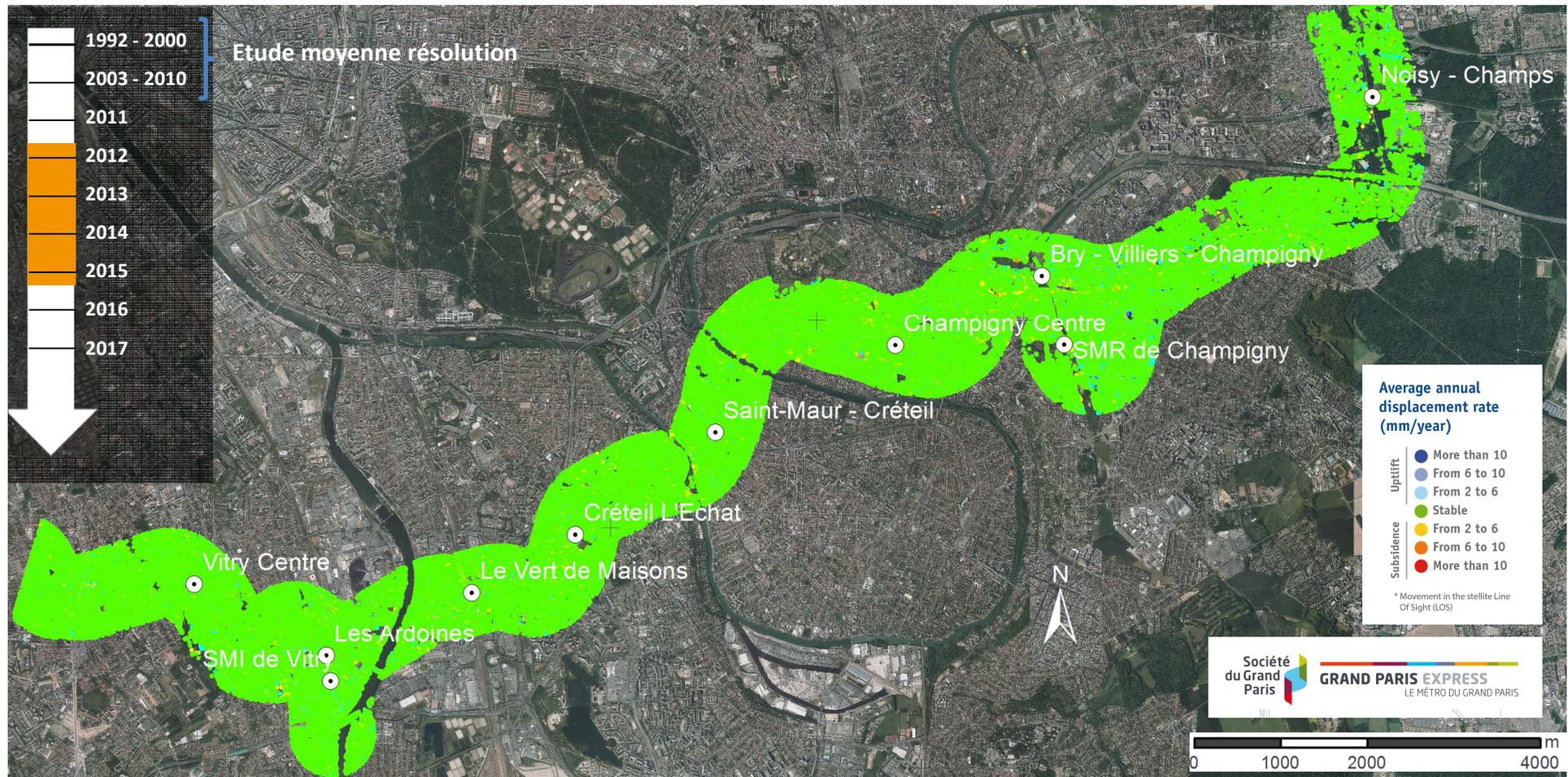
Etude historique Haute résolution des mouvements (2011-2015)



L'étude historique permet de disposer d'un état des lieux avant travaux sur la totalité du réseau du projet Grand Paris Express entre 2011 et 2015 à partir de données satellite Haute Résolution.

Projet InSAR Grand Paris Express

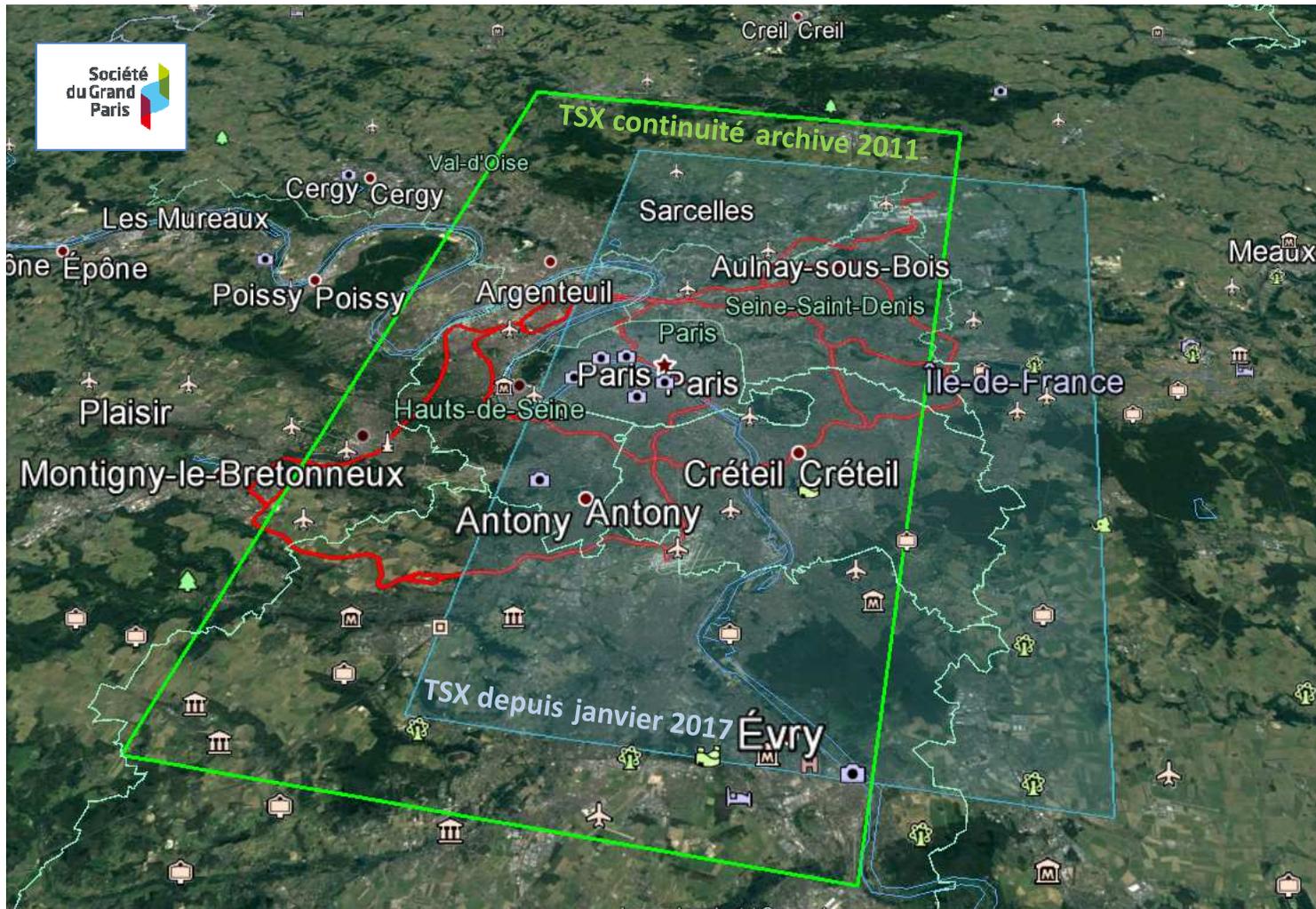
Etude historique par Tronçon sur 500m de part et d'autre du tracé



L'étude de ce tronçon réalisée à partir d'images satellite Haute Résolution montre la densité de points obtenue sans aucune installation in-situ. Chaque point de couleur correspond à un point de mesure.

Projet InSAR Grand Paris Express

Configuration volet surveillance phase travaux





Construction d'un réseau ferroviaire Royaume-Uni

Construction d'un réseau ferroviaire

Etude haute résolution

Objectifs du projet

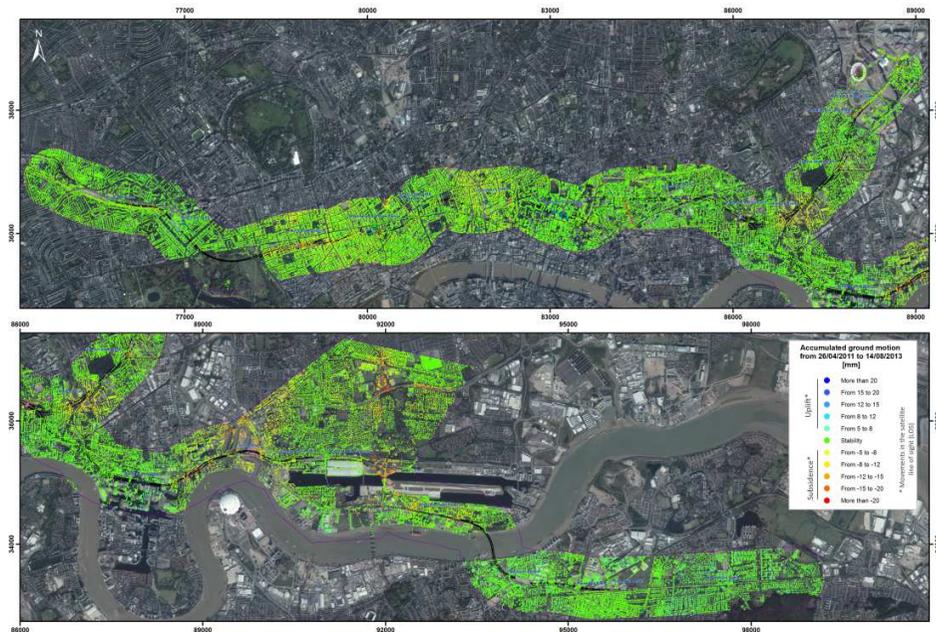
- Analyser les données historiques afin d'identifier les zones sujettes aux déformations avant la construction d'une ligne ferroviaire souterraine
- Analyser les effets des travaux de forage du tunnel

Analyse et résultats

Etude historique Cosmo-SkyMed

Période d'étude: avril 2011 – août 2013

- » Identification de mouvements le long du tracé.
- » Des phénomènes de subsidence dus aux travaux de forage du tunnel sont identifiés sur certaines gares.
- » Les zones de pompage et de réinjection d'eau présentent des tendances différentes (subsidence et élévation).
- » Les résultats ont été corrélés et validés avec les méthodes d'auscultation sur le terrain.

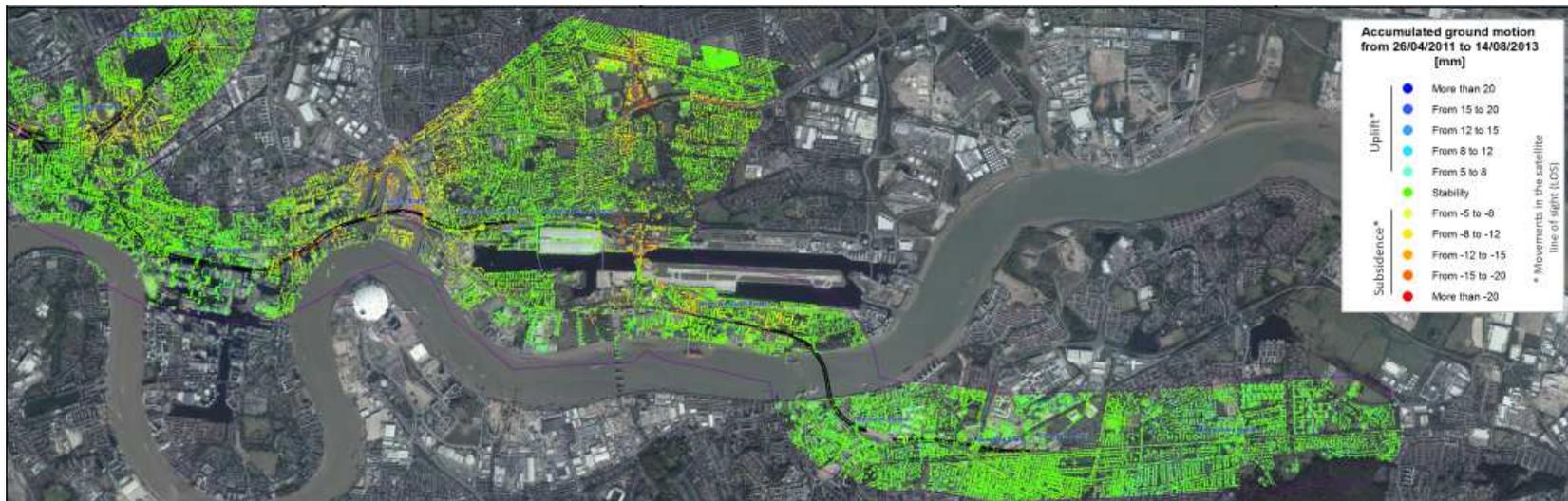


Historical ground movement study for London Crossrail
Accumulated ground motion from 26/04/2011 to 14/08/2013

Une nouvelle méthodologie a été développée afin d'améliorer les mesures de mouvements à tendance non-linéaire.

Construction d'un réseau ferroviaire

Résultats de l'étude



Construction d'un réseau ferroviaire

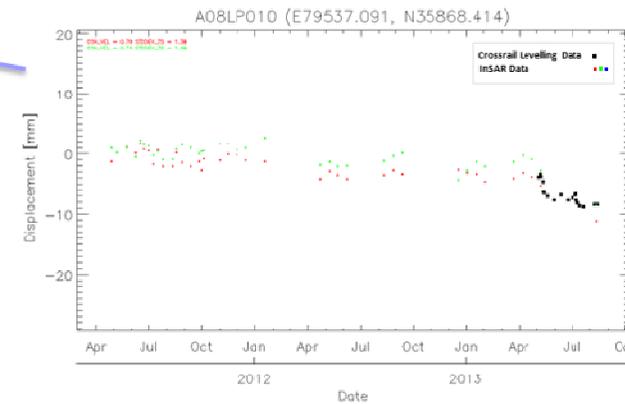
Résultats de l'étude



Accumulated ground motion from 28/04/2011 to 14/08/2013 [mm]

- More than 20
- From 15 to 20
- From 12 to 15
- From 8 to 12
- From 5 to 8
- Stability
- From -5 to -8
- From -8 to -12
- From -12 to -15
- From -15 to -20
- More than -20

* Movements in the satellite line of sight (LOS)



Séries temporelles corrélées avec les données terrain



Réseau aérien de la RATP France



Réseau aérien de la RATP

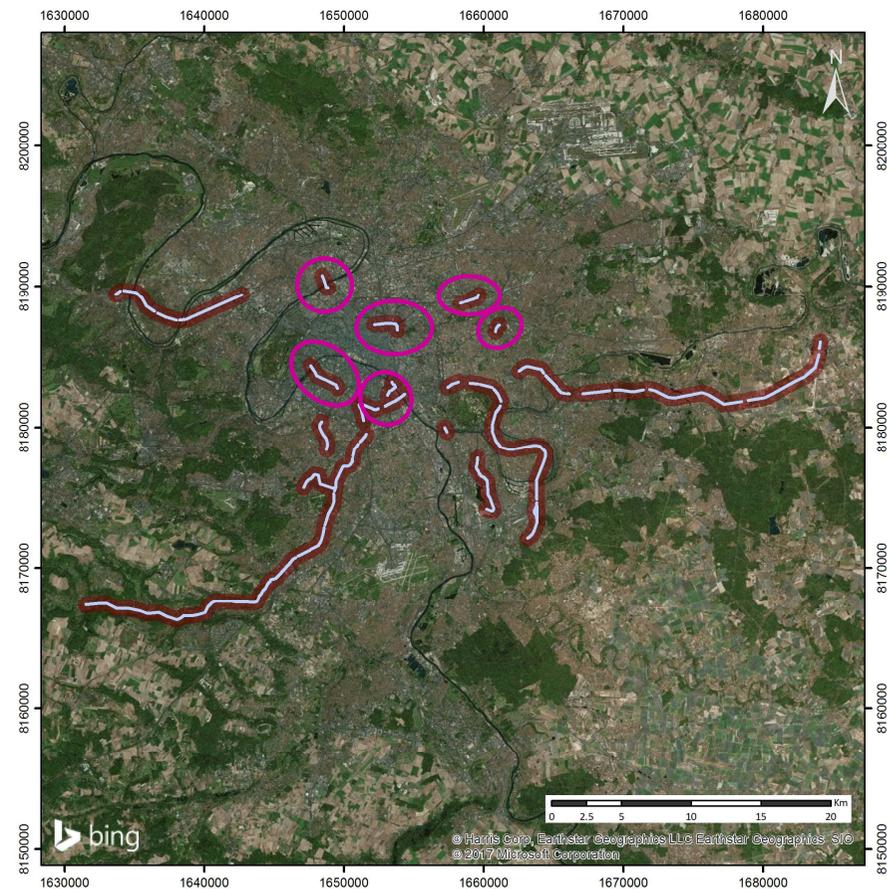
Contexte du projet

- » Le métro parisien a été principalement construit avant 1960, et est à 80% souterrain ; les plus anciens tunnels et viaduc du réseau sont centenaires.
- » Les performances de cette infrastructure historique sont chaque jour repoussées, au fur et à mesure que les fréquences de circulation et les performances des trains augmentent.
- » Dans le cadre de la surveillance réglementaire de son patrimoine, le département gestion de l'infrastructure de la RATP réalise une auscultation (mensuelle à quinquennale) des ouvrages aériens sensibles du réseau existant. Cette auscultation vise à détecter les éventuels mouvements d'affaissement ou de soulèvement, de nature à causer des désordres structurels sur ces ouvrages
- » Aujourd'hui, la plupart des méthodes de surveillance nécessitent que la main-d'œuvre soit déployée sur site, principalement la nuit, lorsque la circulation du train est arrêtée.
- » Après avoir conduit différentes études de faisabilité, la RATP envisage désormais le contrôle satellitaire comme complément des méthodes traditionnelles actuelles pour le suivi des déformations sur l'ensemble des lignes aériennes.

Réseau aérien de la RATP

La zone d'intérêt

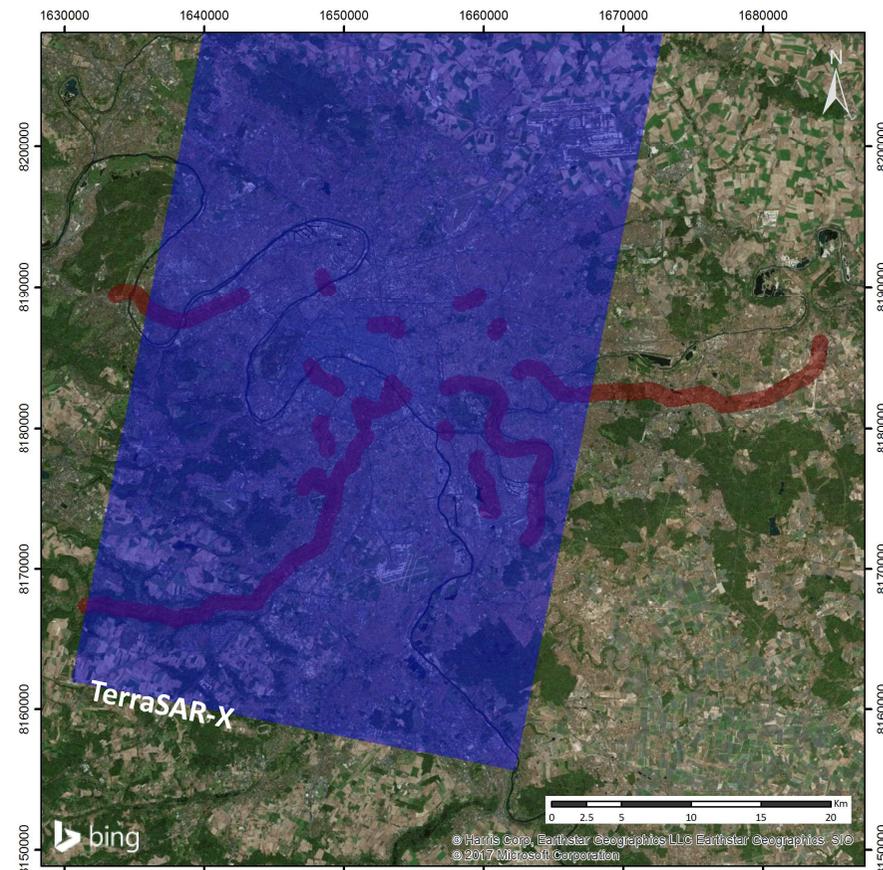
- » Le projet porte sur le réseau aérien de la RATP.
- » Une attention particulière a été portée aux ponts et viaducs du métro et du RER.
- » La zone d'intérêt totale s'étend sur environ 97 km, les ouvrages aériens représentent un linéaire total de 8 km pour le métro et de 7 km pour le RER.
- » La zone d'étude est définie par une zone tampon de 1 km centrée sur la trace du réseau.



Réseau aérien de la RATP

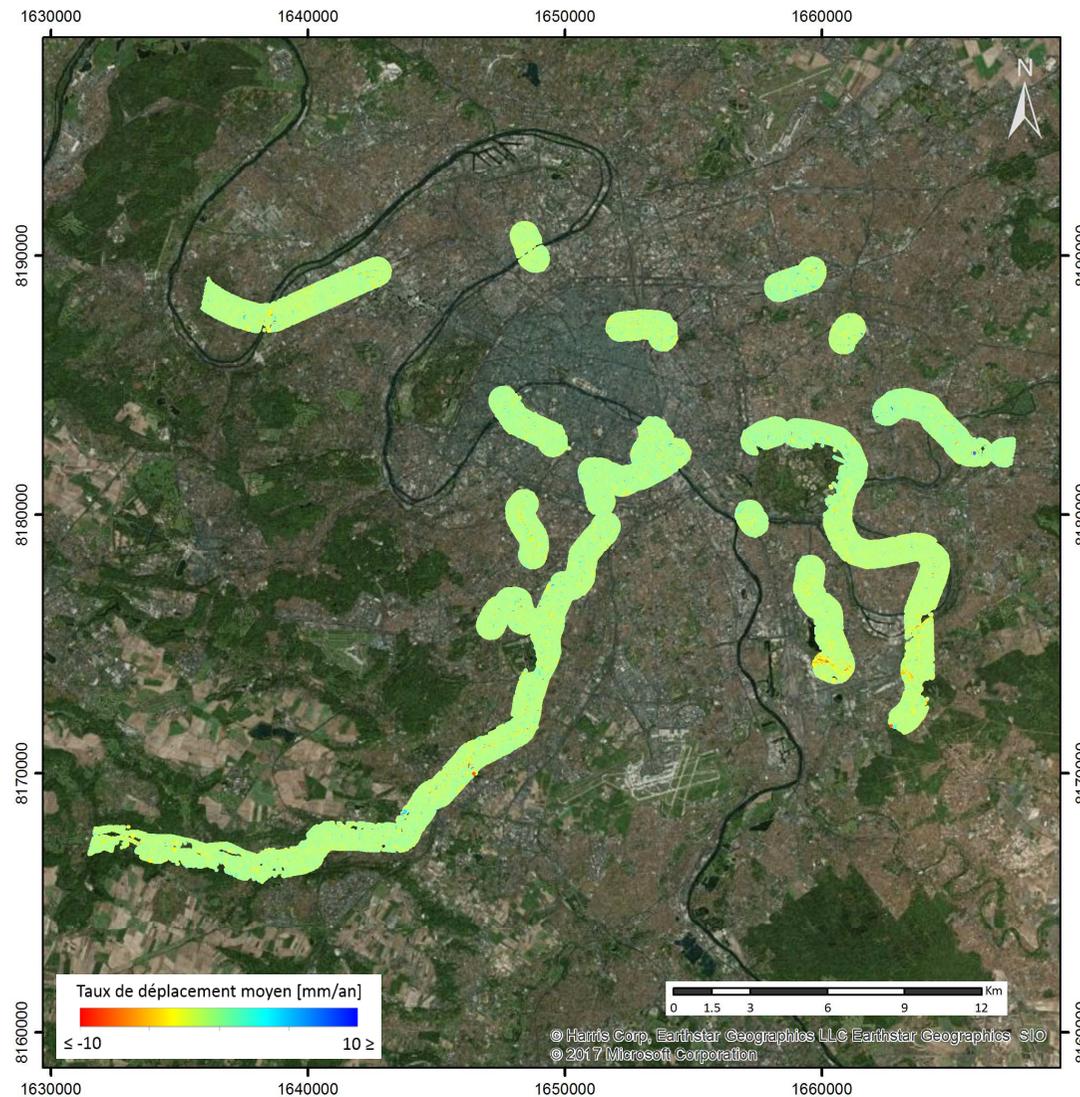
Couverture satellite Haute Résolution

- » Paris fait l'objet d'une couverture systématique dans le cadre du projet Grand Paris Express, l'archive de 102 images TerraSAR-X acquises sur 5 ans, entre le 23 juillet 2011 et le 23 décembre 2016 a été utilisée.
- » On note que la trace du satellite ne couvre pas la ligne de RER A à l'est et à l'ouest.
- » Le linéaire finalement considéré pour l'étude est de 77 km.



Réseau aérien de la RATP

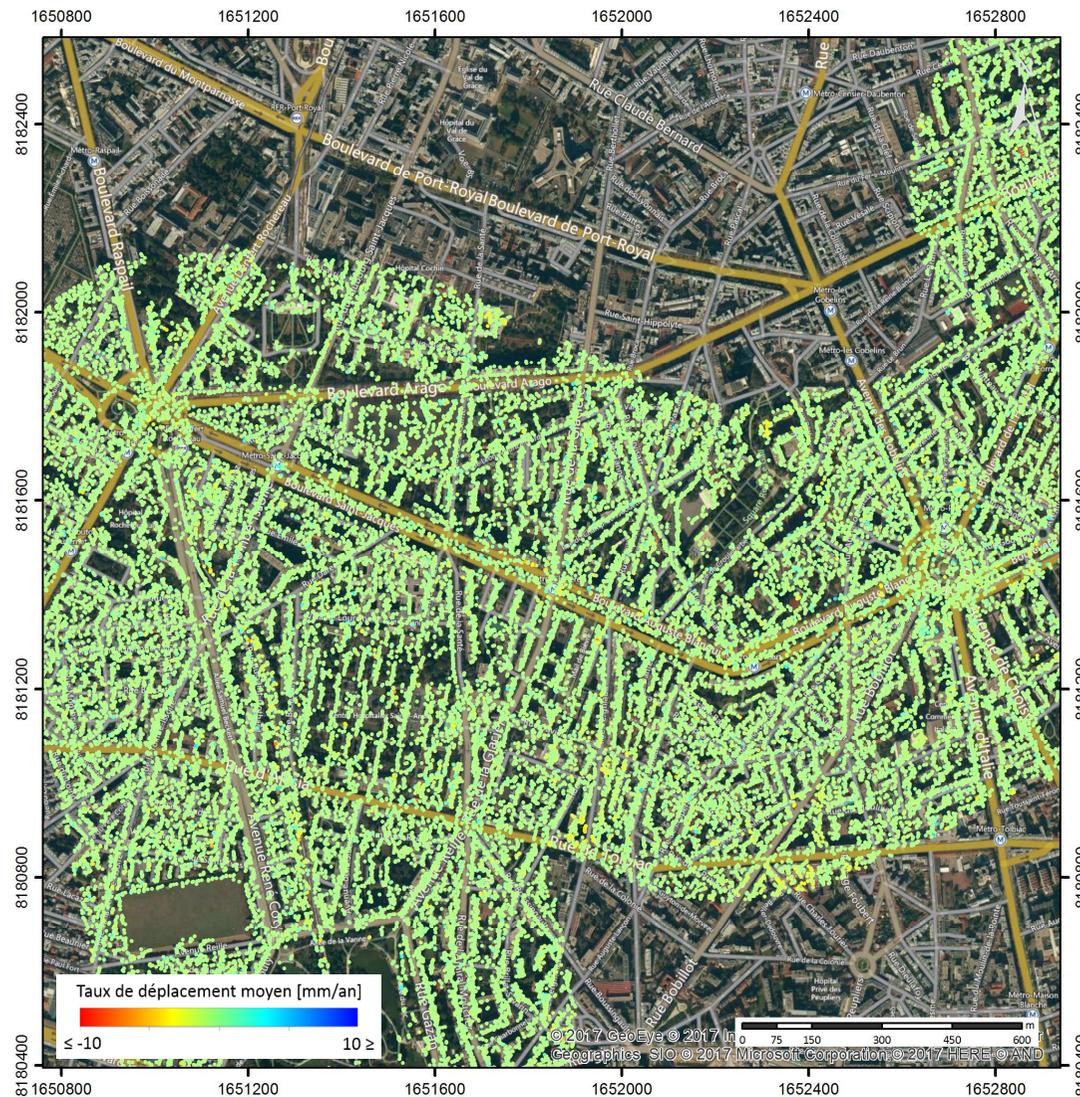
La carte de mouvement



- » Un total de 1.2 M de points de mesure a été détecté.
- » Les points de mesure sont en majorité distribués sur les zones de bâti, le long des rails et les infrastructures environnantes.

Réseau aérien de la RATP

Ouvrage aérien M6 entre Saint-Jacques et Corvisart

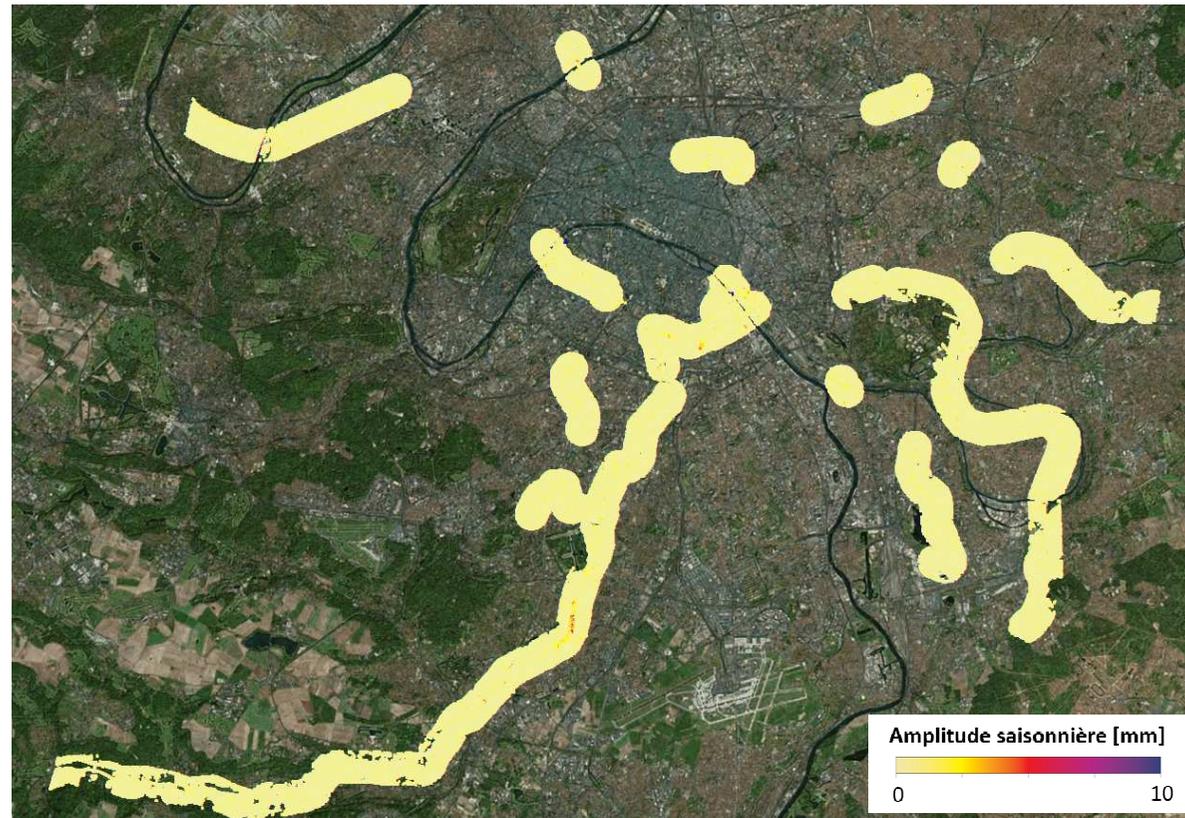


- » Un grand nombre de point de mesure a été détecté.
- » La zone est globalement stable.

Le comportement saisonnier

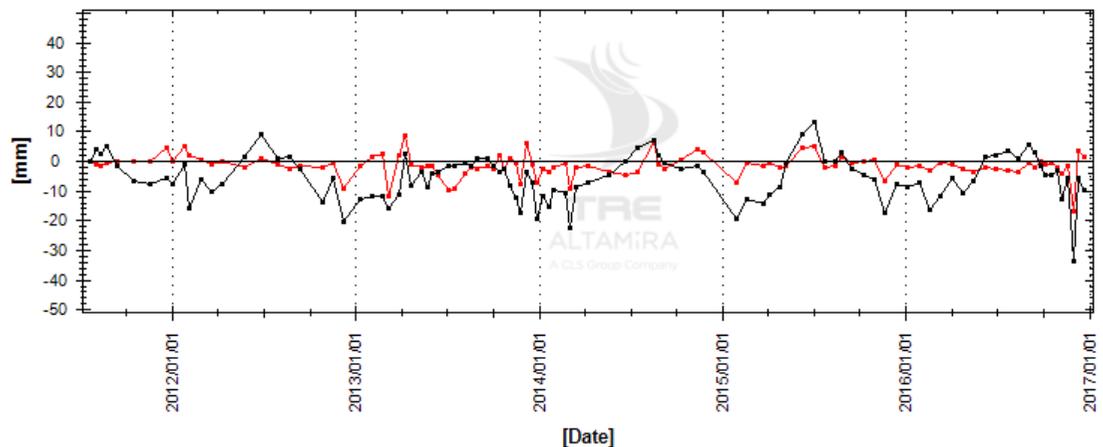
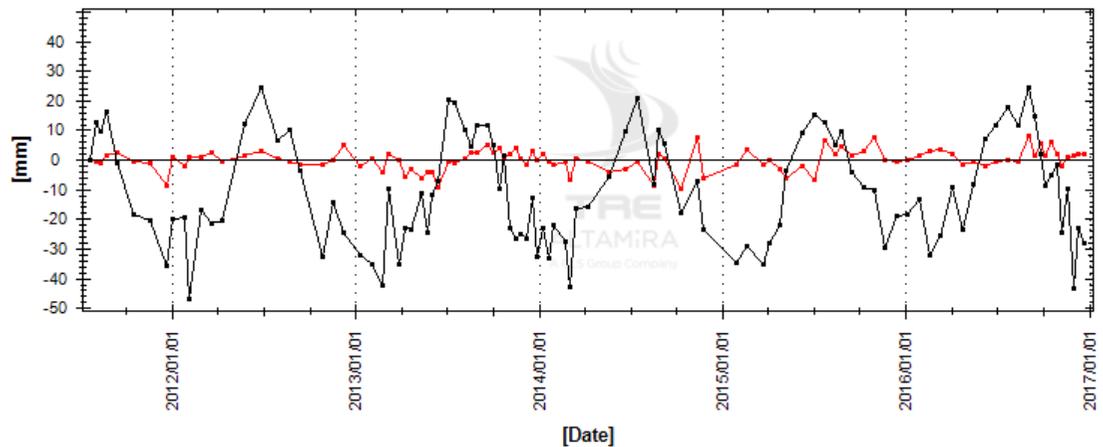
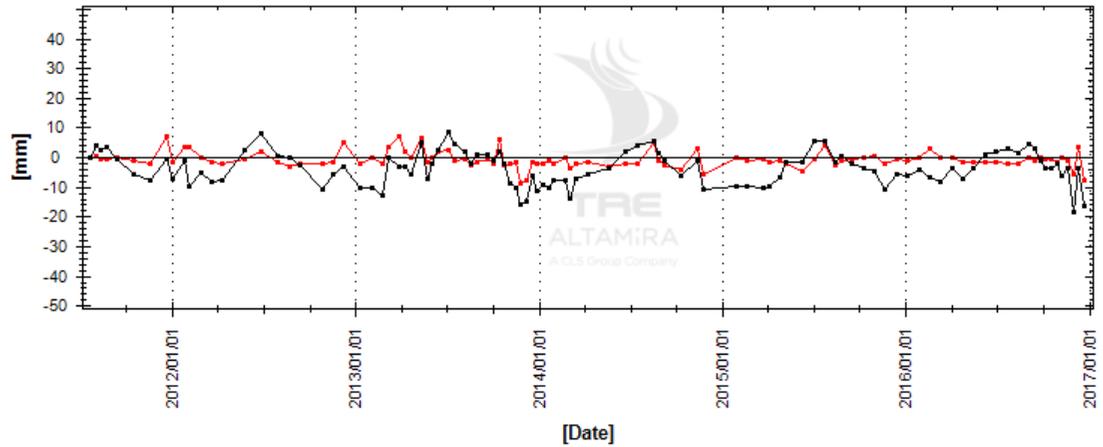
Impact de la dilatation thermique

- » La composante due à la dilatation thermique est aussi évaluée.
- » Des effets thermiques importants sont observés sur certains ouvrages d'art.





Amplitude saisonnière [mm]
 0 10



- » Présentation de TRE ALTAMIRA Groupe CLS
- » La mesure des mouvements de surface
- » Exemples et cas d'étude
- » Discussions

Etudes historiques des
mouvements du sol

- Les données d'archive permettent de réaliser des études rétrospectives des mouvements du sol à partir de 1992
-

Couverture grande échelle

- Etudes de zones complètes d'exploitation
-

Grande densité de points de
mesure

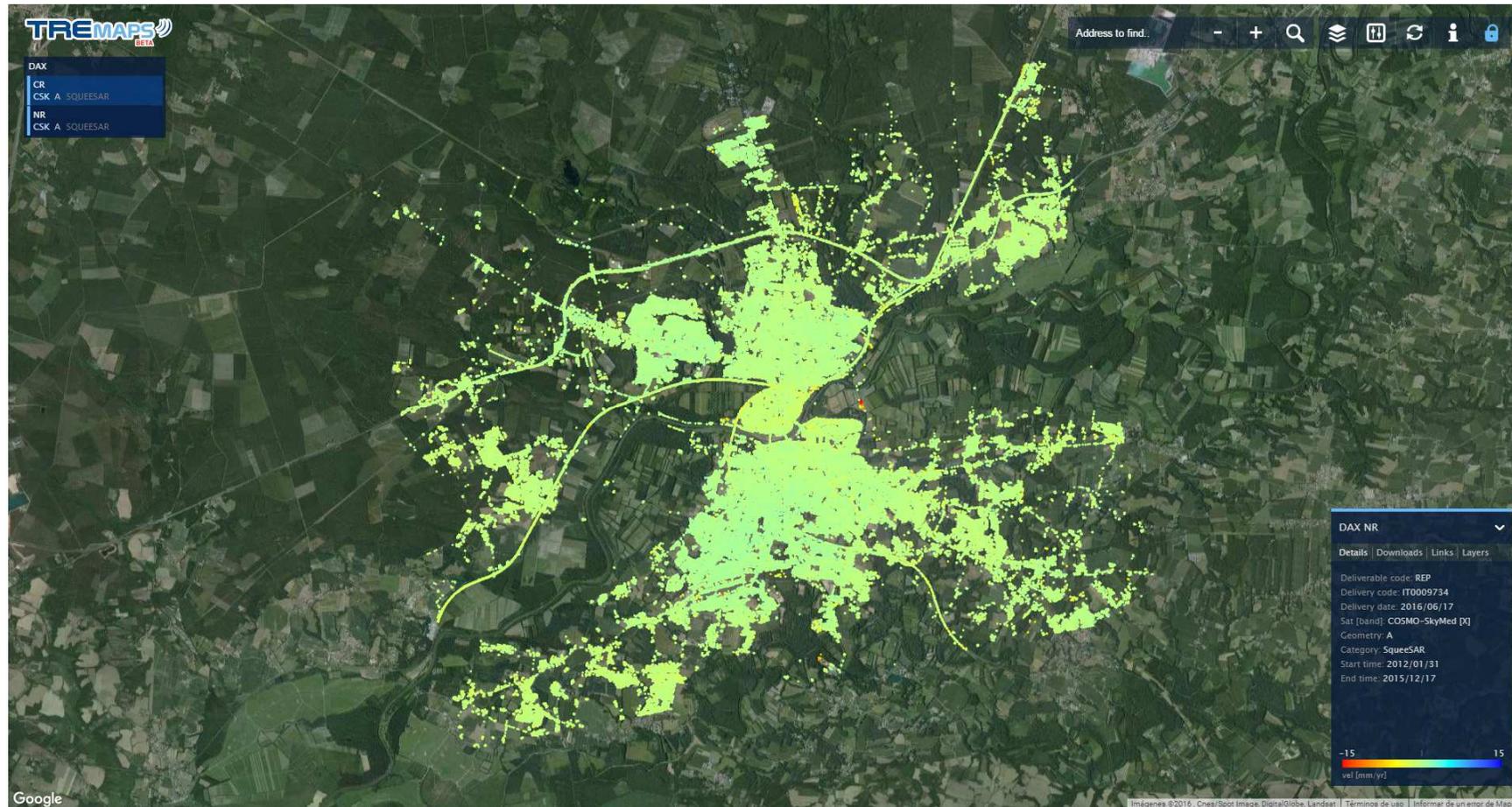
- Le bâti, les sols nus, les infrastructures... sont des réflecteurs naturels du signal radar et constituent autant de points de mesure
-

Grande précision des mesures

- Précision de la mesure de déplacement moyen annuel = 2-3 mm/an en Haute Résolution
-

Actualisation régulière des
mesures

- Fréquence de revisite tous les 8j bande X si nécessaire pour actualisation mensuelle
-





TRE
ALTAMIRA
A CLS Group Company



TRE

Ripa di Porta Ticinese, 79
20143 Milano Italy

Tel: +39 02 4343 121
Fax: +39 02 4343 1230



TRE CANADA

Suite #410 475 W. Georgia Street
Vancouver BC V6B 4M9 Canada

Tel: +1 604 331 2512
Fax: +1 604 331 2513



ALTAMIRA

C/ Corsega, 381-387
E-08037 Barcelona Spain

Tel.: +34 93 183 57 50
Fax: +34 93 183 57 59