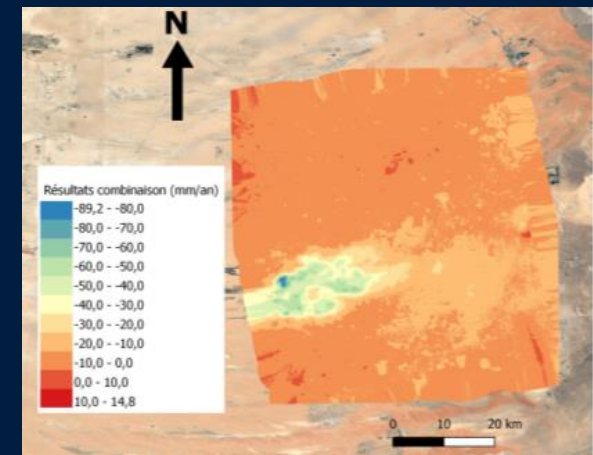
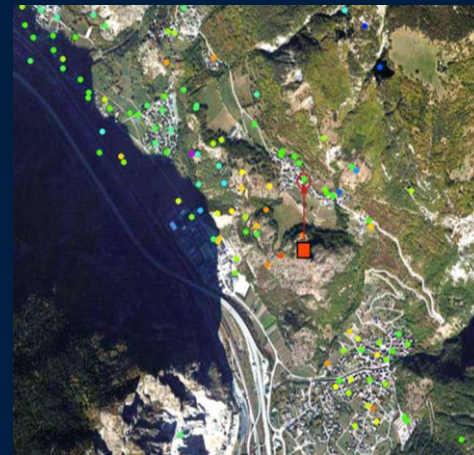
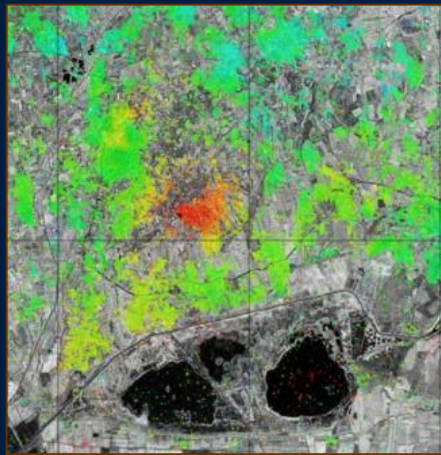




Apport de la mesure InSAR Multi-Temporelle à des projets de suivis géologiques, géotechniques et génie civil

Etudes de cas (Pays-Bas, France, Allemagne...)



Plan

- Introduction
- La technologie InSAR : méthodes, limitations et améliorations
- Apport de l'InSAR aux projets de suivis géologiques et géotechniques
 - Suivi de déformation d'une autoroute
 - Extraction et gestion de gisements salifères
 - Suivi de déformation de digues
- Apport de l'InSAR en géodésie





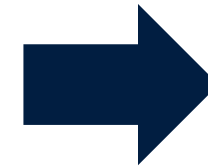
1

Introduction



Phénomènes physiques mesurables par InSAR

Phénomène physique	Mécanisme à l'oeuvre
Karstification	Dissolution des carbonates
Expansion/Retraction des argiles	Changement du volume du sol
Glissements de terrain	Gravité terrestre, terrains instables
Subsidence tectonique	Enfoncement de la lithosphère
Subsidence thermique	Refroidissement de l'asthénosphère
Glaciation/déglaciation	Fonte du pergélisol
Extraction de minerais	Retrait de matière en profondeur
Pompage d'eau	Retrait de fluide en profondeur
Hydrocarbon extraction	Retrait de fluide en profondeur
Volcanisme	Effondrement des coulées de lave



Géotechnique
Génie Civil
Géologie

Déformations du sol problématiques

- Impact de la déformation du sol d'origine naturelle sur les infrastructures
 - Glissements de terrain en zone de montagnes (Kazakhstan, Italie)
 - Érosion côtière : effondrement des falaises (France)
 - Sols instables ou non stabilisés : digues, jetées, barrages, plateformes, bâtiments... (Pays-Bas, Allemagne, France, Etats-Unis..)
 - Fonte du pergélisol (Russie, Canada)
- Impact des activités humaines sur les infrastructures situées au-dessus ou à proximité
 - Exploitation de mines souterraines et après mine (France, Allemagne, Pays-Bas)
 - Subsidence d'île artificielle (Chine)
 - Exploitation de réservoirs d'hydrocarbures (Oman, Kazakhstan, Australie)
 - Agriculture intensive : pompage d'eau (Émirats Arabes Unis)
 - Mise en place de réseaux (pipelines...), à proximité de digues (états Unis)
 - Construction de tunnels urbains (transports, assainissement...) à proximité de bâtiments (Pays-Bas, Émirats Arabes Unis)
 - Étude de site de géothermie (France)



Solutions d'auscultations disponibles

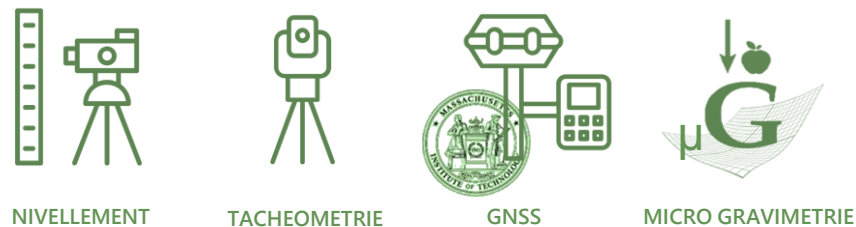
➤ La technologie InSAR est très performante mais pas dans tous types de contextes

Mesures denses, à distance

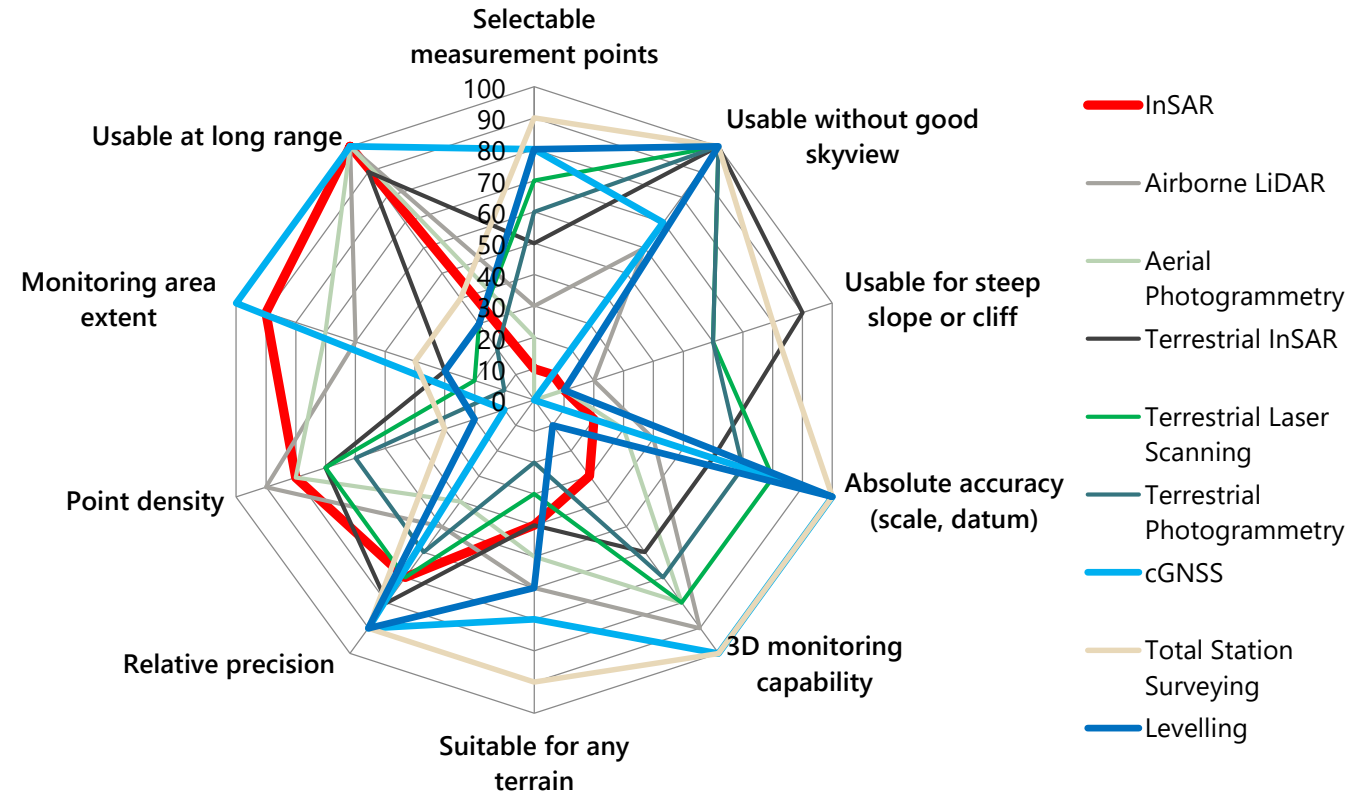


APERÇU DE LA DÉFORMATION - EXTENSION SPATIALE
SURVEILLANCE DE SURFACE

Mesures ponctuelles sur site



MESURES PONCTUELLES - HAUTE PRÉCISION 3D
(souvent associées à une instrumentation géotechnique)



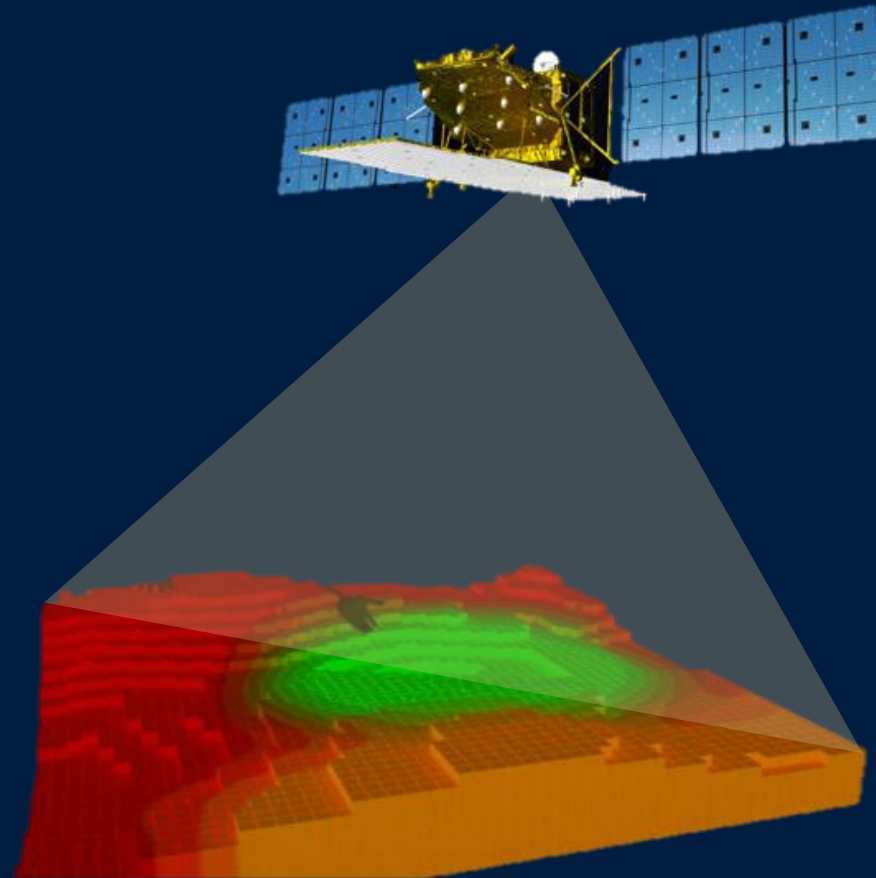
FORCES, FAIBLESSES ET LIMITES (CAS PARTICULIER)



2

Technologie InSAR

Méthodes, limitations et améliorations



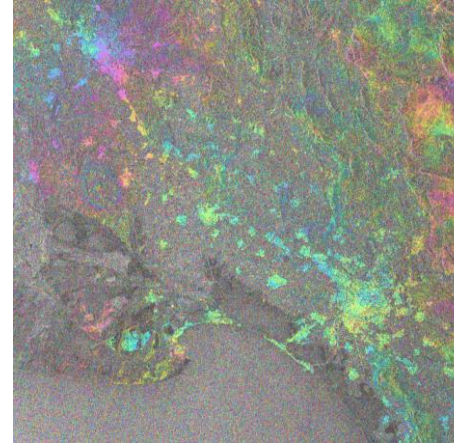
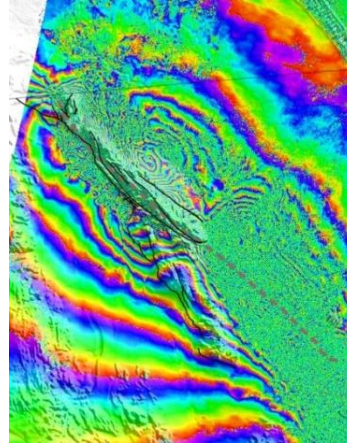
De l'acquisition à la mesure de déformation

■ InSAR Différentiel (D-InSAR, DifSAR)

- Mesures de surface à court terme et sur une grande surface

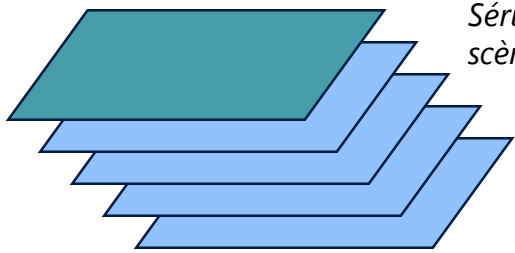


Deux scènes seulement

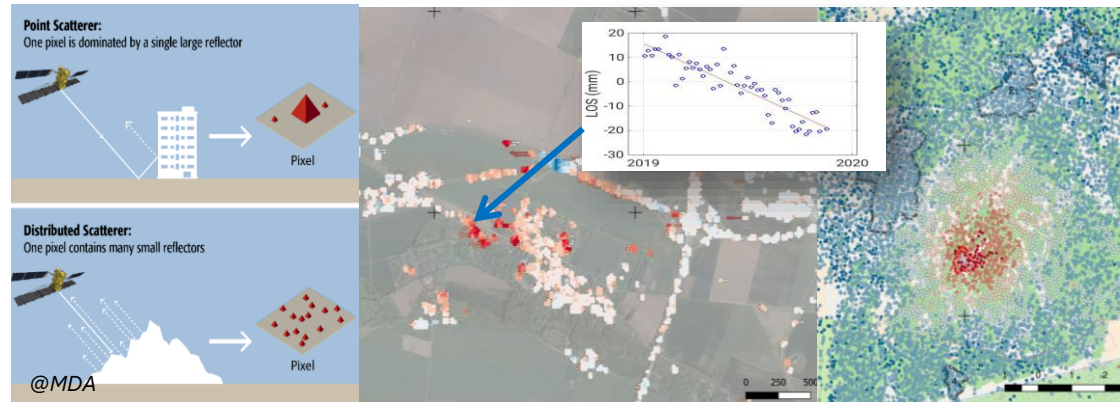


■ InSAR Multi-Temporel (PSI, SBAS...)

- Mesures historiques de cibles ponctuelles et/ou distribuées spatialement, avec séries chronologiques

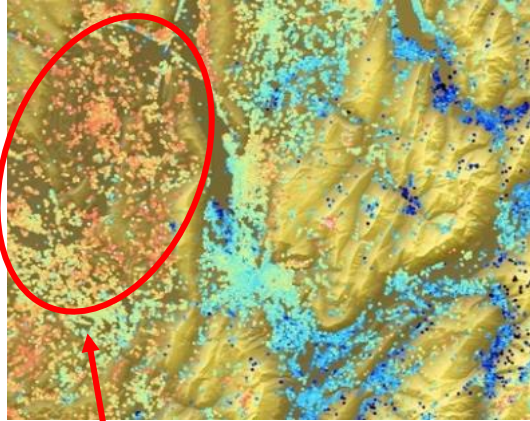
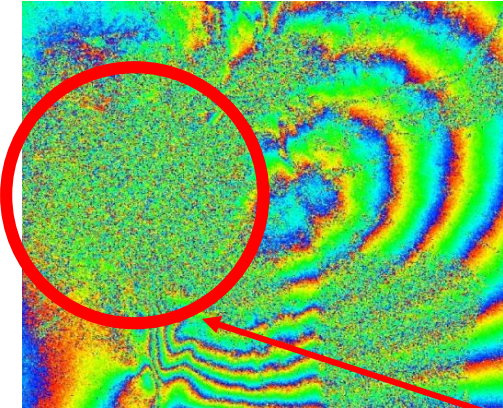


Série de scènes

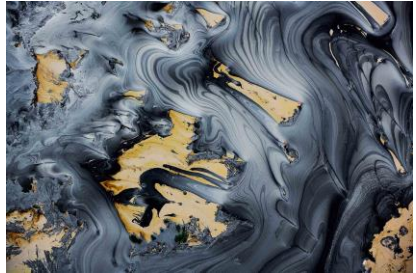
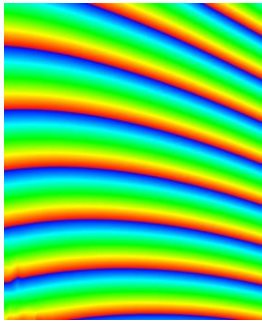
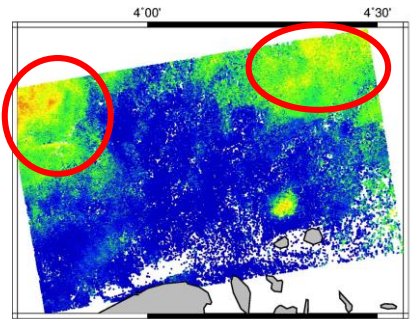
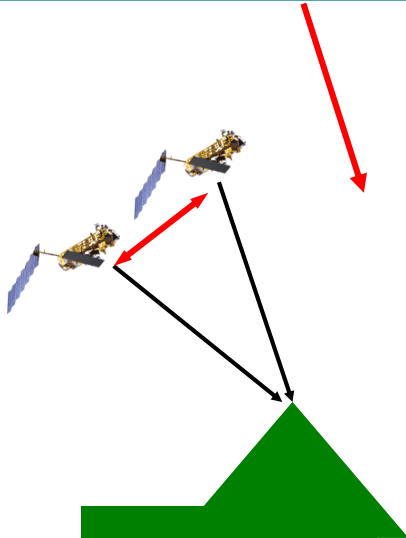


	TECHNOLOGY:	Differential	Persistent Scatterer
PLATFORM:	Terrestrial/Field		
	Satellite	●	●
SURVEY FREQUENCY:	Data from archive	●	●
	Real time/Continuous		
	Weekly	●	○
	Monthly	●	●
	Yearly	○	●
SURVEY COVERAGE:	Local	●	●
	Regional	●	●
	National	●	●
ACCURACY:	centimetric	●	
	millimetric		●
	sub-millimetric		
MOTION MAGNITUDE:	metres	●	○
	centimetres	●	●
	millimetres	○	●
	sub-millimetre		
APPLICATIONS:	Buildings & Infrastructure:		
	Buildings	●	●
	Road	○	●
	Rail	○	●
	Pipelines	○	●
	Dams	○	●
	Embankments	○	●
	Dikes/Levees	○	●
	Ground hazards:		
	Ground Stability	●	●
	Slope Stability	○	○
	Mining	○	○
	Fault strain	●	●
Earthquake	●	●	
Volcanic deformation	●	●	
KEY:		●	Yes/Element of service
		○	Possibility

Limitations de l'InSAR

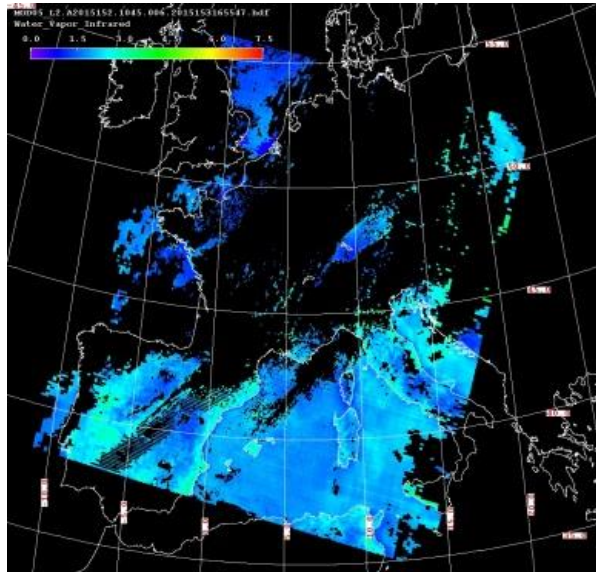


Phase Interférométrique = Topographie + Bruit + Atmosphère + Déformation + Orbite

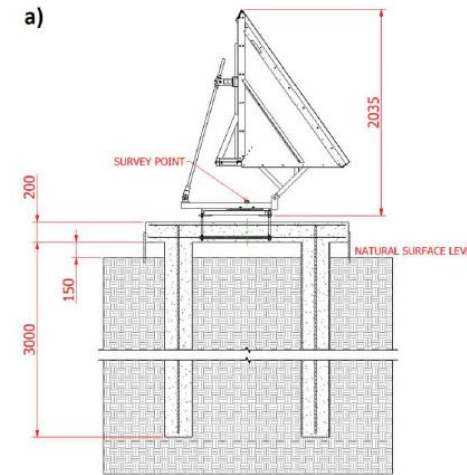


Améliorations de l'InSAR

- Réseau de coins réflecteurs artificiels
 - Points géodésiques mesurés par InSAR et GNSS ou nivellement
 - Mesure locale de la déformation 3D



MODIS Vapeur D'eau Précipitable (NASA)



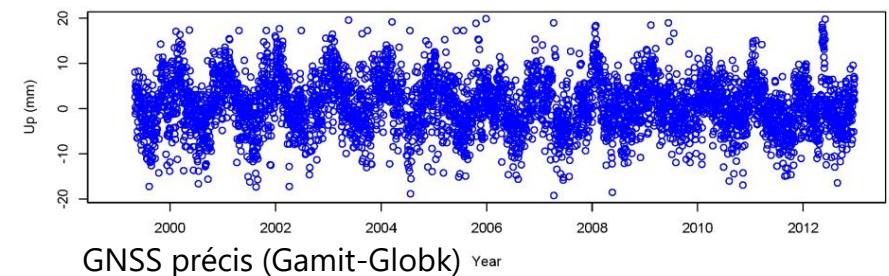
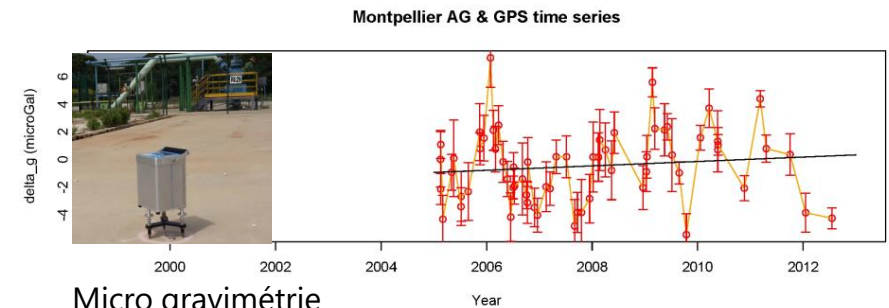
Correction des biais atmosphériques (*)

- Les effets troposphériques (pression, température et **humidité relative**) peuvent introduire un **bias** dans les interférogrammes InSAR jusqu'à 15–20 cm
- Spectromètres embarqués sur satellites : MERIS, MODIS
- Modèles météo : ERA-I, WRF, GACOS

(*) D.P.S. Bekaert et al., 2015, "Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques", Remote Sensing of Environment 170, 40-47

Améliorations de l'InSAR : avec des données auxiliaires

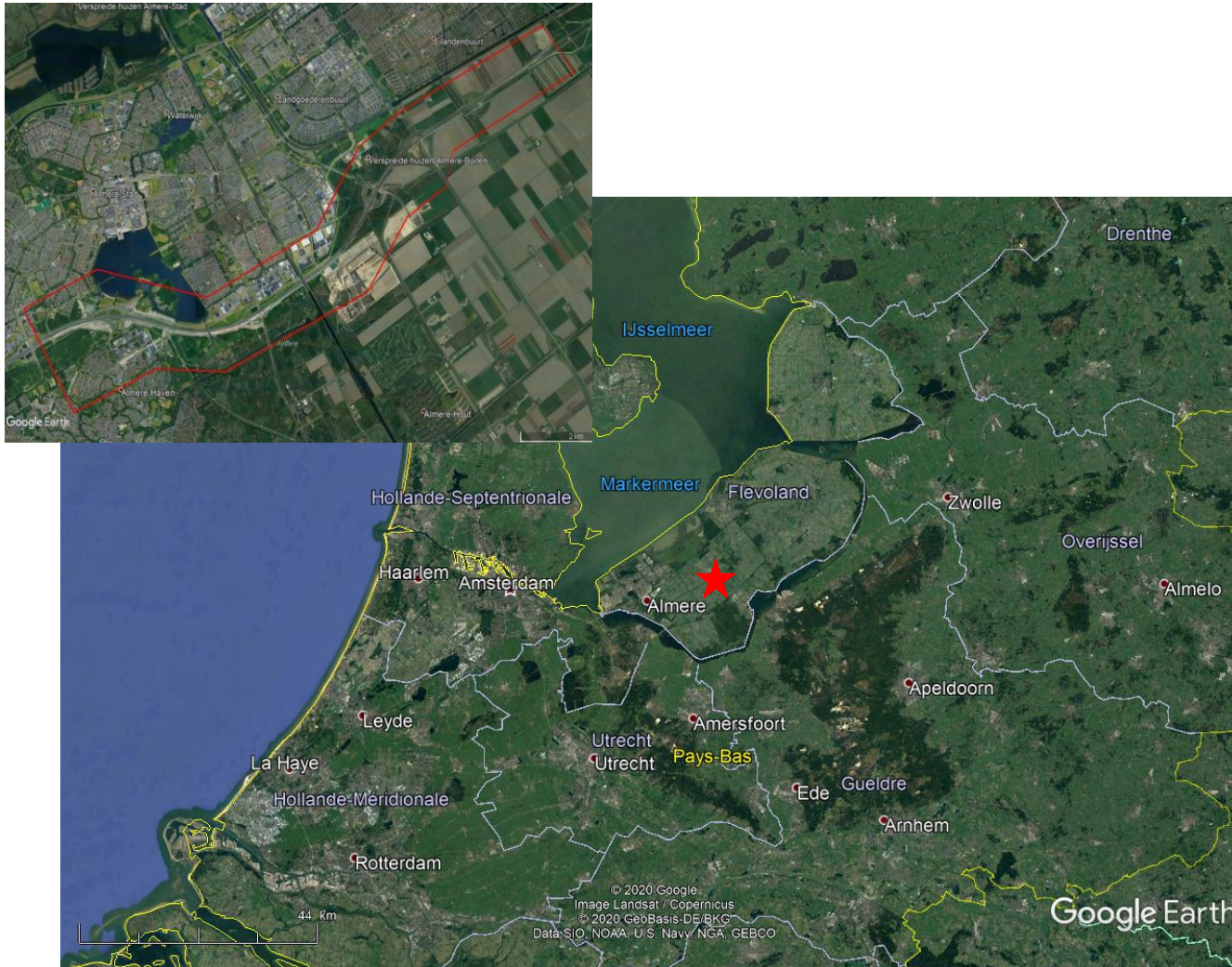
- L'InSAR Multi-temporelle peut être combinée avec:
 - GNSS géodésique
 - Nivellement
 - Inclinométrie
 - Micro-gravimétrie et capteurs d'environnement (piézométrie etc.)
- Chacune de ces technologies permet de compenser les faiblesses de l'une avec les forces de l'autre, pour:
 - Correction des incohérences temporelles et spatiales
 - Intégration mathématique rigoureuse
 - Interpolation en grille
 - Estimation réaliste des incertitudes de mesure (la faiblesse de toutes ces technologies)
 - Analyse spectrale de la déformation, pour **détection des valeurs erronées** et possible corrections ou exclusions
 - Corrections des discontinuités temporelles



Apport de l'InSAR aux projets de suivis géologiques et géotechniques

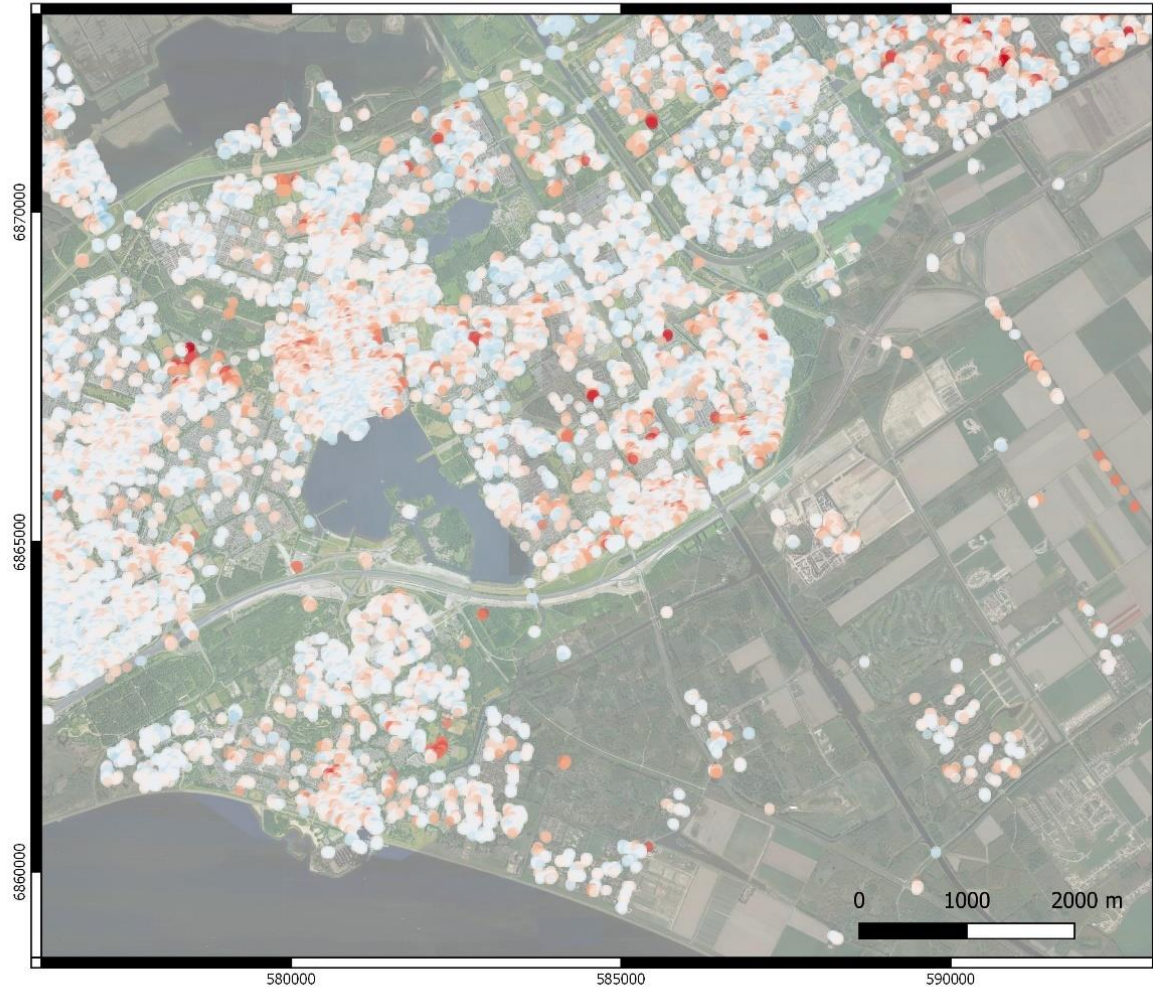


Stabilité d'infrastructures routières – Pays-Bas



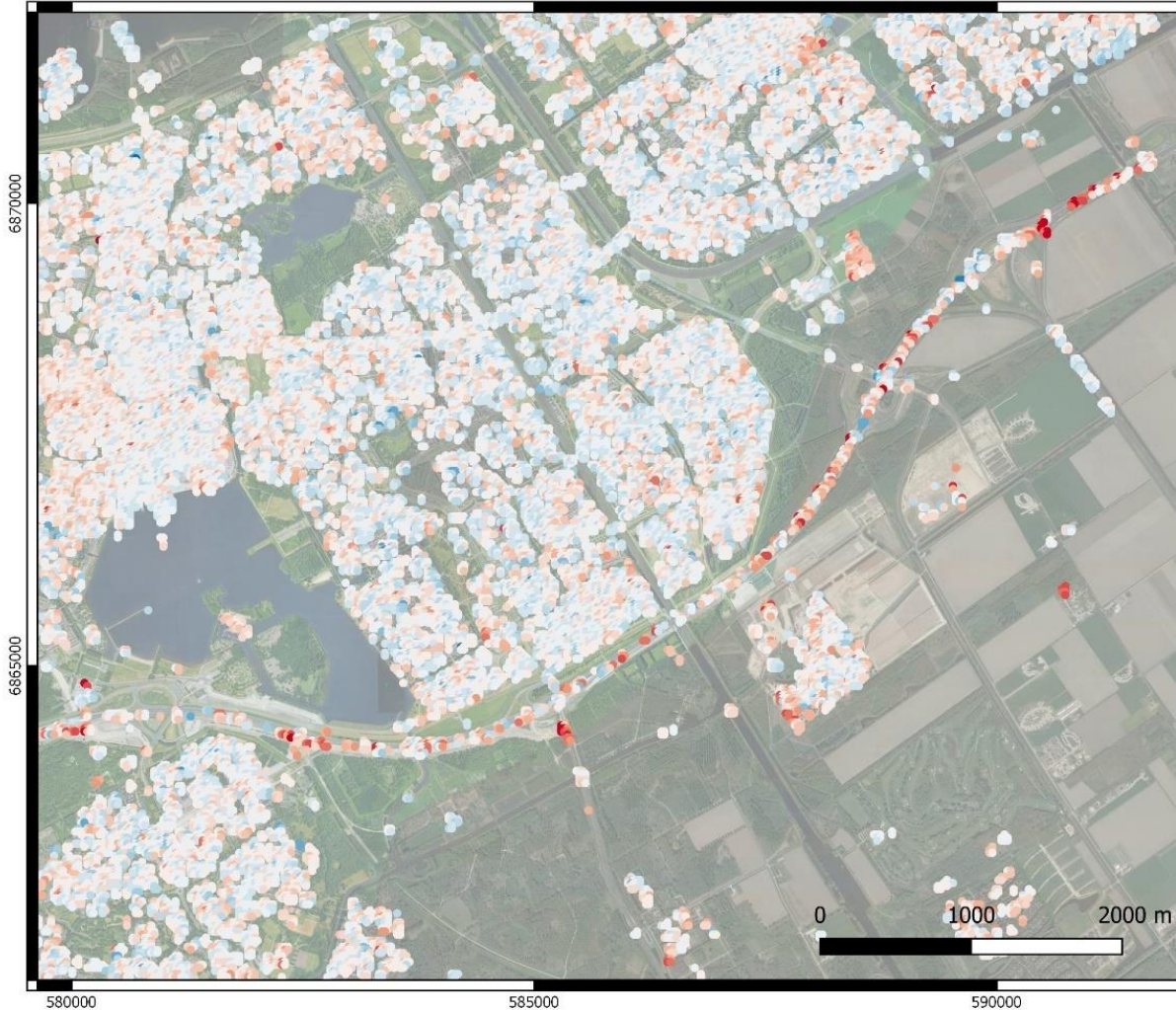
- **Problématique :**
 - Subsidence déjà mesurée localement sur plaques de tassements
 - Besoin d'une densification spatiale des mesures pour un coût maîtrisé
- **Solution technique retenue :**
 - InSAR Multi-Temporel, 341 Images Sentinel-1a/b, double geometries :
 - ✓ Asc. : 208 images
 - ✓ Desc. : 133 images
 - Fréquence maximale d'acquisition : 1 image / 6 jours
 - Période de mesures : 01/2016 à 11/2019

Stabilité d'infrastructures routières – Pays-Bas



- **Paramètres de traitement** « classiques » fonctionnent en milieu urbain: quelques instabilités détectées
- **Pas de points de mesures sur l'autoroute :**
 - ✓ Trop de changements se sont produits : terrassement, surélévation de la route, création d'échangeurs, renouvellement du bitume, travaux ...)
 - ✓ Perte de signal au fil du temps conduisant à l'impossibilité de mesurer le déplacement du sol, perte de cohérence
- **Augmentation de la densité de mesures** par traitement en sous-périodes chronologiques et paramètres associés sur (1) 2019 et (2) 2017-2018

Stabilité d'infrastructures routières – Pays-Bas



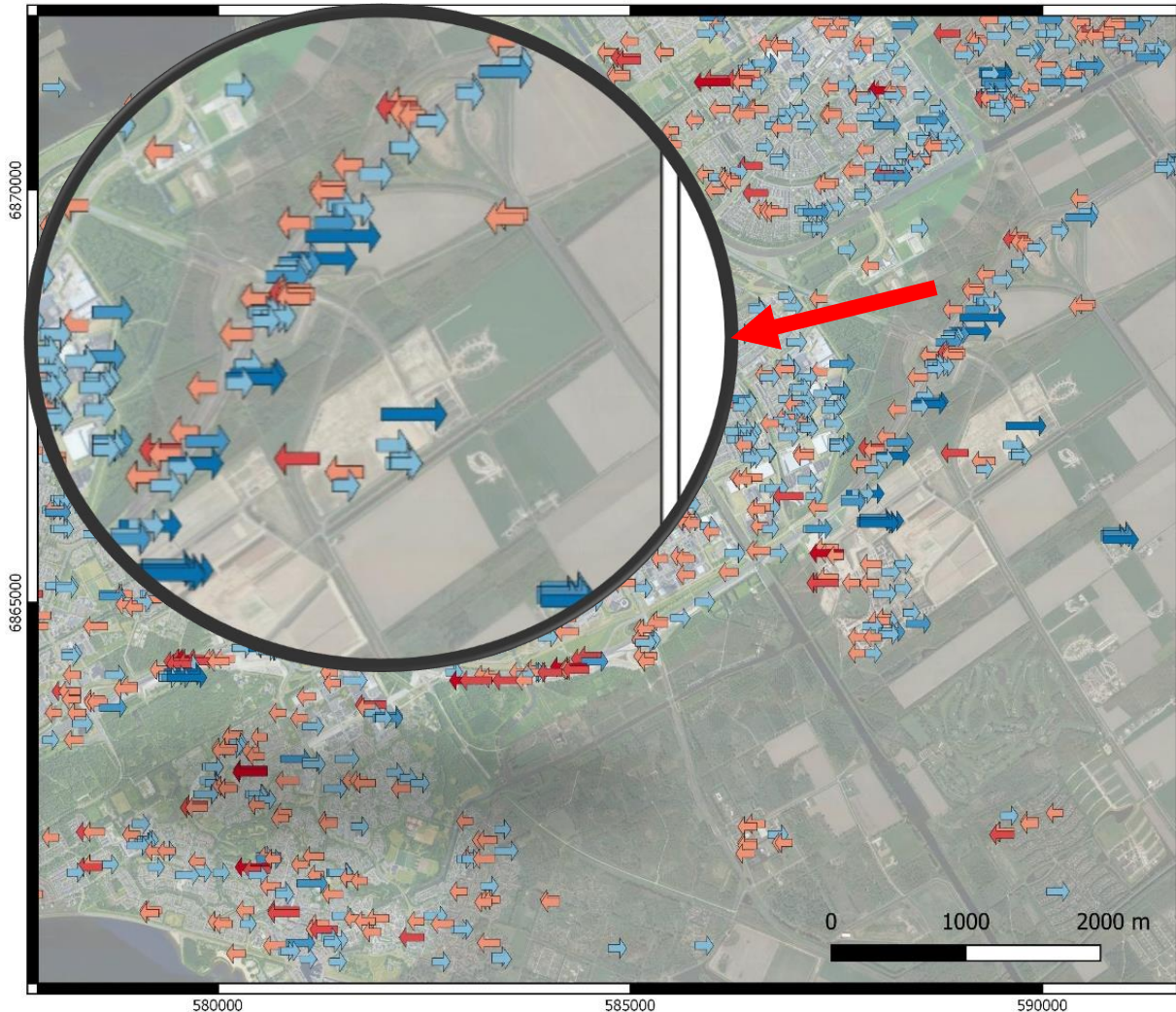
Up Vel. [mm/yr]

- -39 - -14
- -14 - -12
- -12 - -11
- -11 - -9
- -9 - -7
- -7 - -5
- -5 - -4
- -4 - -2
- -2 - 0
- 0 - 2
- 2 - 4
- 4 - 5
- 5 - 7
- 7 - 9
- 9 - 11
- 11 - 12
- 12 - 14
- 14 - 16

Sous-période 2019

- **Densification réussie** sur l'extension de l'autoroute avec un choix intelligent de séries chronologiques
- **Affaissements mesurés** atteignant **1,5 cm/an** au nord-est
- **Apport d'éléments essentiels pour l'étude géotechnique**
 - ✓ Affine les modèles de compaction des talus
 - ✓ Apporte une **densité de mesure** impossible avec les plaques de tassement seules

Stabilité d'infrastructures routières – Pays-Bas



Sous-période 2019

- **Corrélation** Subsidence/écartement du talus via mesure de la composante Est-Ouest
- Partie centrale de l'AOI, une tendance claire de basculement vers l'ouest est mesurée, jusqu'à 3 cm/an
- **Apport d'éléments essentiels pour l'étude géotechnique**
 - ✓ **Affine les modèles de compaction** des talus par l'apport nouveau de la composante horizontale Est/Ouest

Stabilité de retenues de déchets miniers - Allemagne



▪ **Problématique**

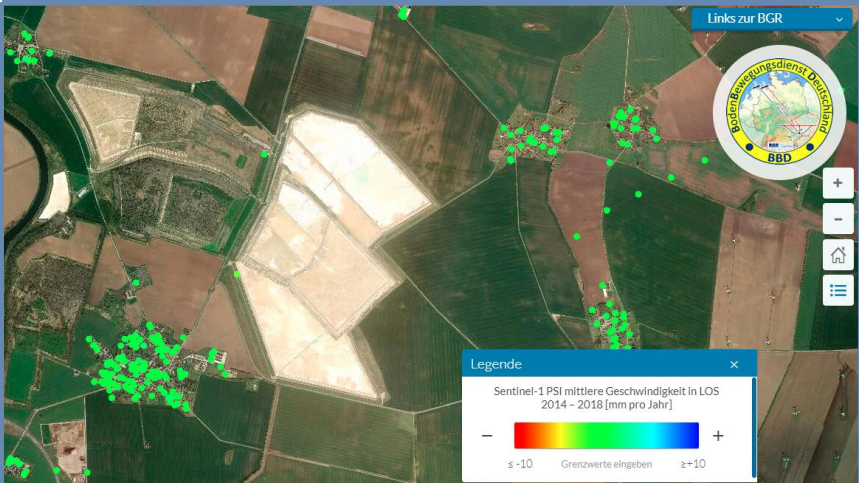
- Mesure de la stabilité de digues de retenues de résidus miniers (CaCO_3)
- Mesures nécessaires pour améliorer les modèles géotechniques de stabilité des digues de résidus

▪ **Solution technique retenue**

- InSAR Multi-Temporel, 257 Images Sentinel-1a/b, double geometries :
 - ✓ Asc. : 170 images
 - ✓ Desc. : 87 images
- Fréquence maximale d'acquisition : 1 image / 6 jours
- Chaîne de traitement automatisée dans la solution Cloud AWS

Stabilité de retenues de déchets miniers - Allemagne

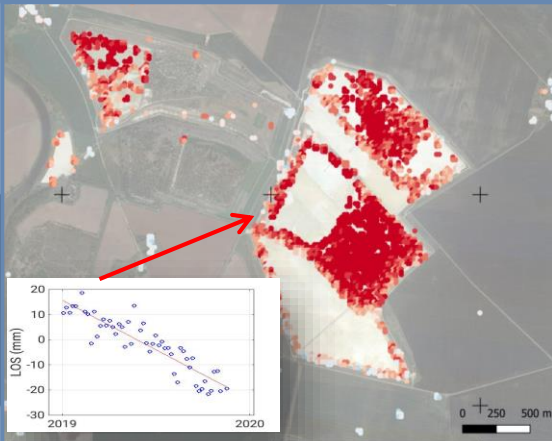
Calcul InSAR automatisé



Contexte et objectifs techniques

- Des inclinomètres et des mesures GPS existent
- Densification de la mesure nécessaire
- Déformation horizontale inconnue
- Amélioration du modèle géotechnique de stabilité

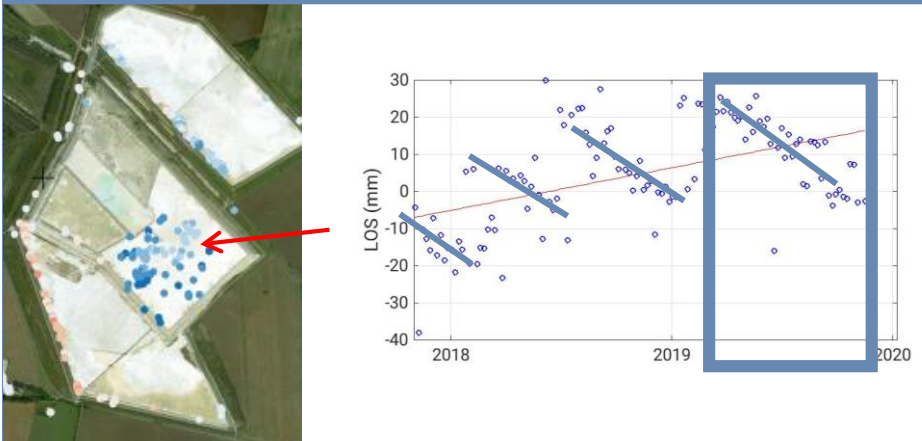
Calcul InSAR amélioré



Inclinaison et affaissement

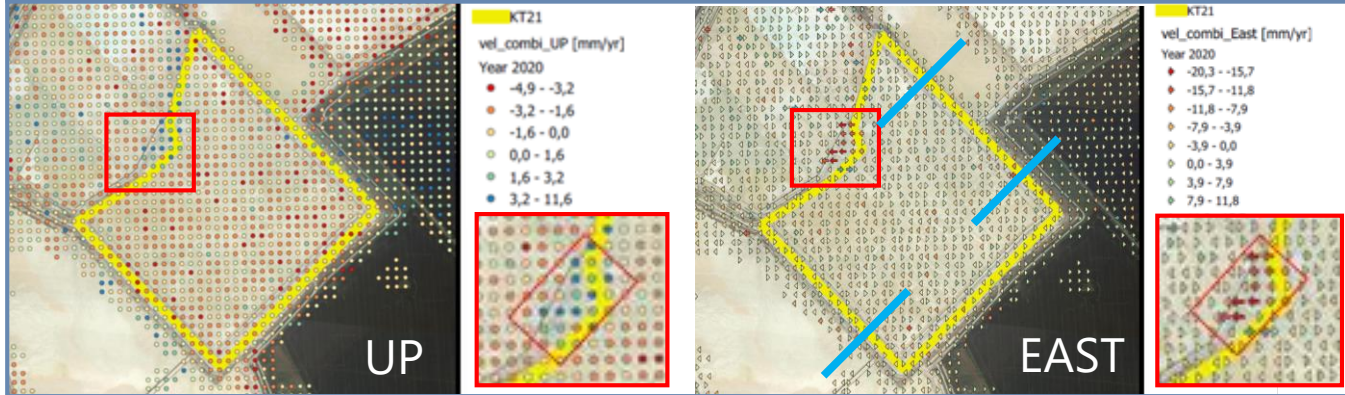


Variations saisonnières des dépôts de déchets

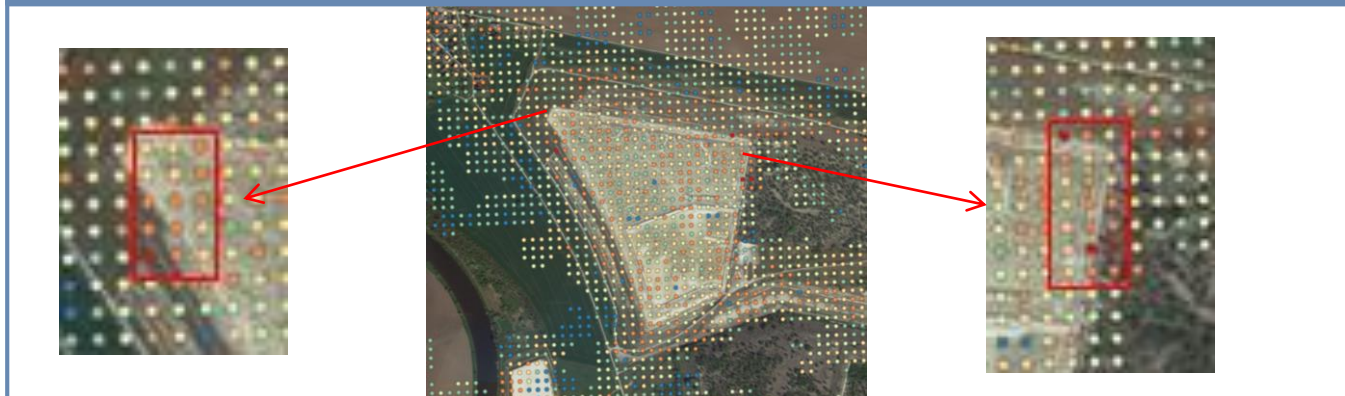


Stabilité de retenues de déchets miniers - Allemagne

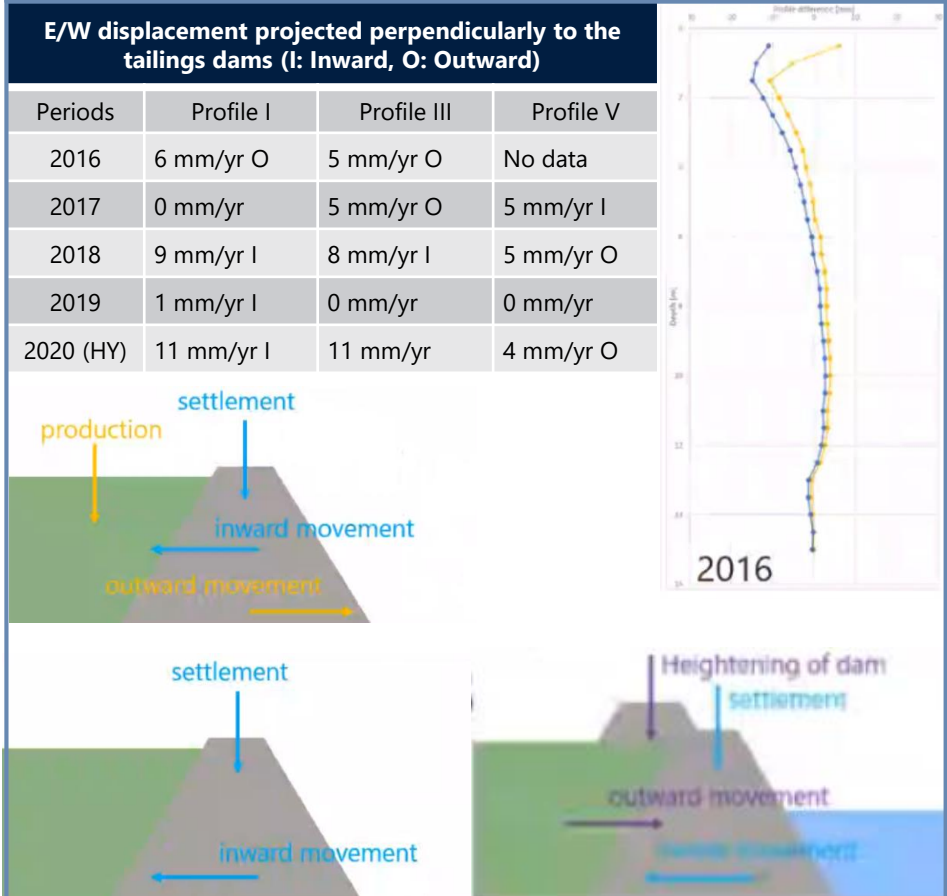
Déplacements horizontaux (EW) et verticaux, 2020



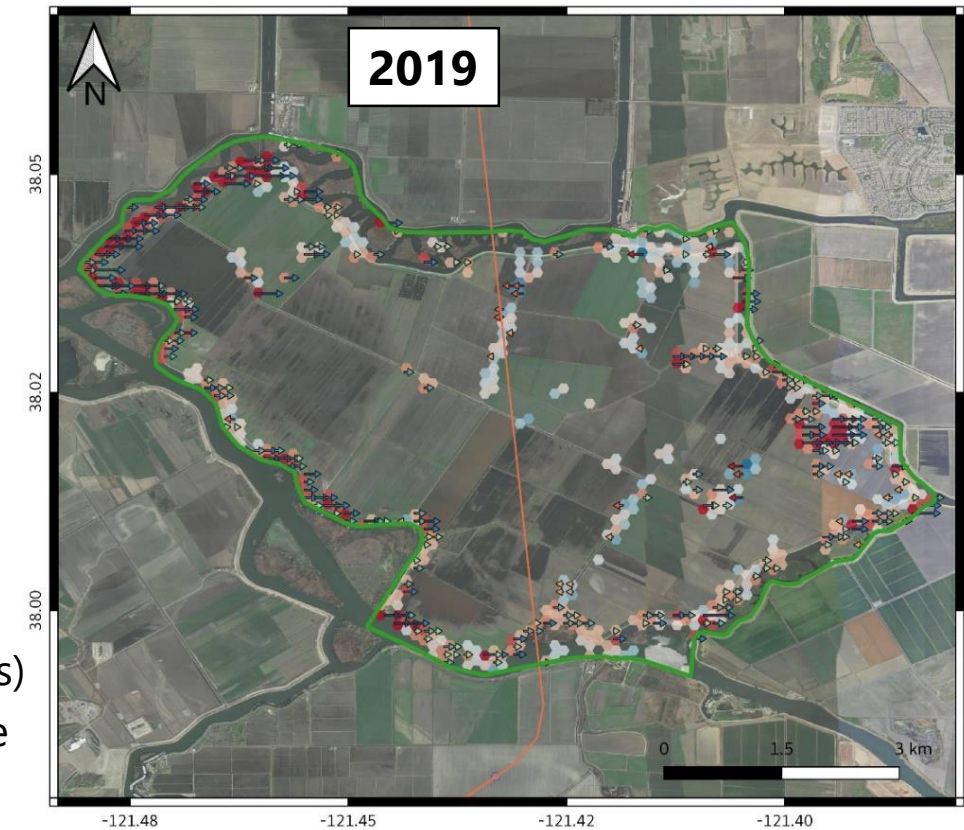
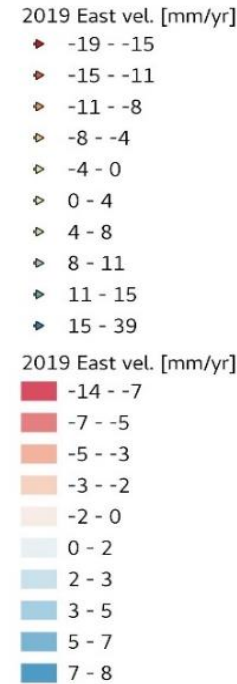
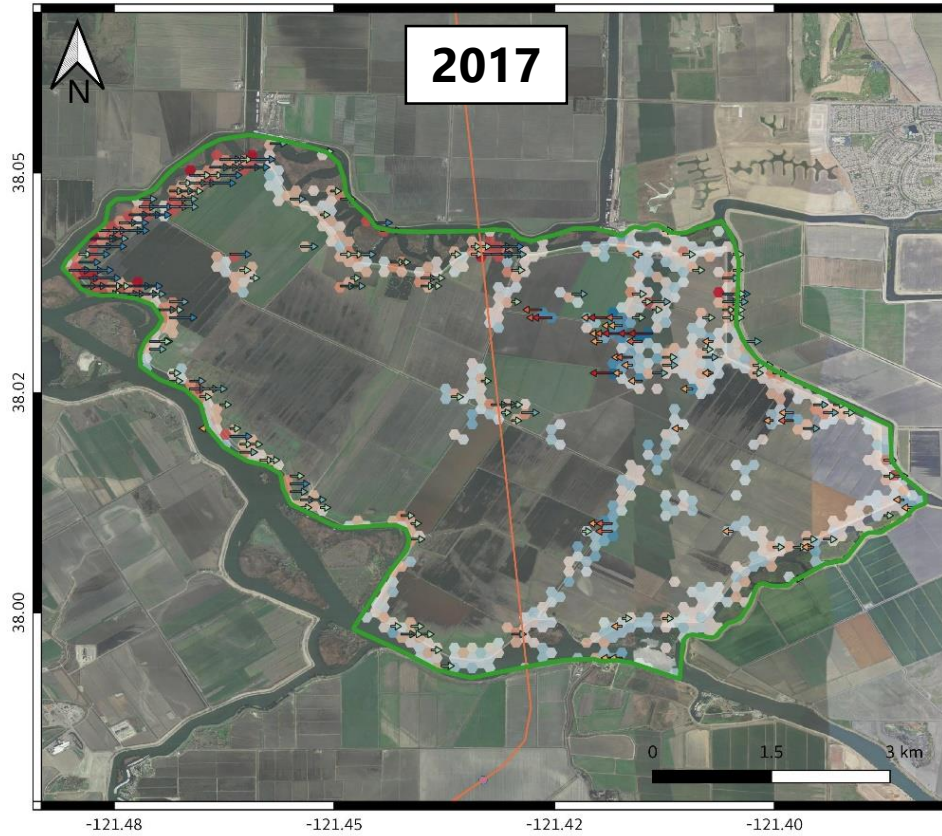
Déformation en période de non-production (Jan-Jun 2020)



Déplacements InSAR/inclinomètres E/W



Stabilité de digues – Californie - USA



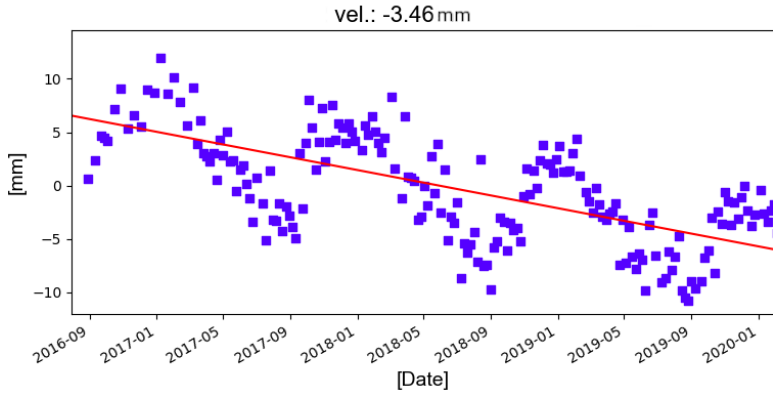
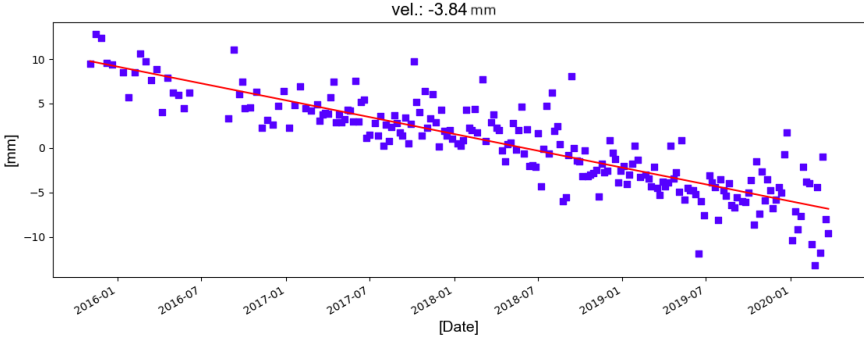
- Projet menaçant la stabilité des digues protégeant les îles du delta (agricoles)
- Auscultation de toute les digues et **localisation des sections** nécessitant une **investigation locale particulière** (géodésique et géotechnique)
 - Subsidence jusqu'à 34 mm/an sur certaines digues

Gestion de gisement salifère - France



- **Problématique**
 - **Déformation avérée** (fissures) sur maisons
 - **Données historiques de nivellement** disponibles (depuis 2014) : connaissance (spatiale) limitée de la déformation de la surface du sol
 - Tendance de déformation **non linéaire**
 - Structure **géologique** et **hydrogéologique complexe**
 - **L'ampleur** et **l'extension** de la zone d'affaissement sont **incertaines**
- **Solution technique retenue**
 - InSAR Multi-Temporel sur images Sentinel-1a/b, double geometries
 - **Combinaison** de mesures InSAR et nivellement

Gestion de gisement salifère - France



- Tendence de déformation non linéaire
- Déformation complexe en surface

Gestion de gisement salifère - France



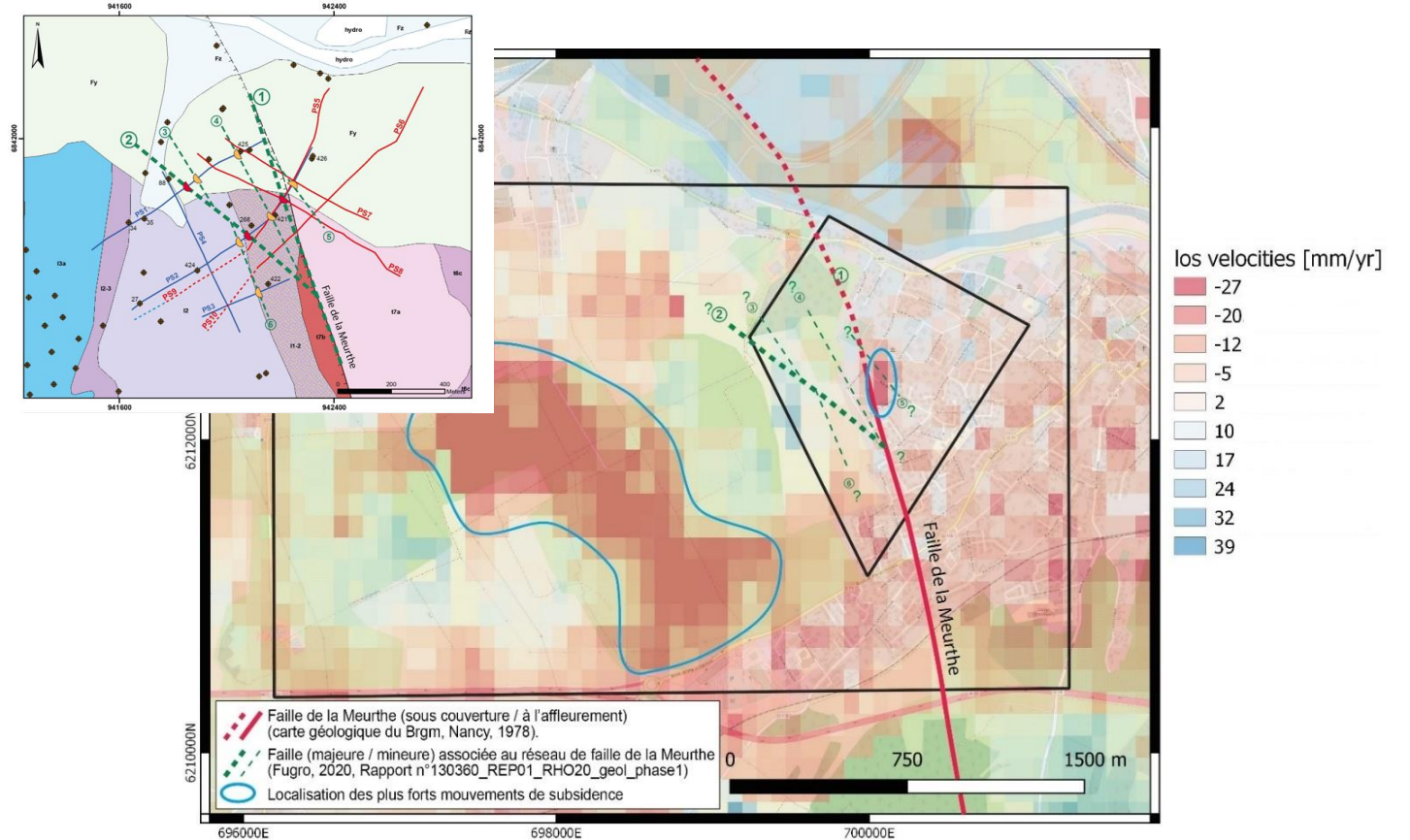
Combinaison
inSAR et nivellement
Vitesses verticales [mm/an]
Du 01/08/2018 au 01/06/2020

- -22 - -19
- -19 - -16
- -16 - -12
- -12 - -7
- -7 - -2
- -2 - 0
- 0 - 2
- 2 - 5
- 5 - 7
- 7 - 10
- 10 - 12
- 12 - 15



Combinaison
inSAR et nivellement
Vitesses est [mm/an]
Du 01/08/2018 au 01/06/2020

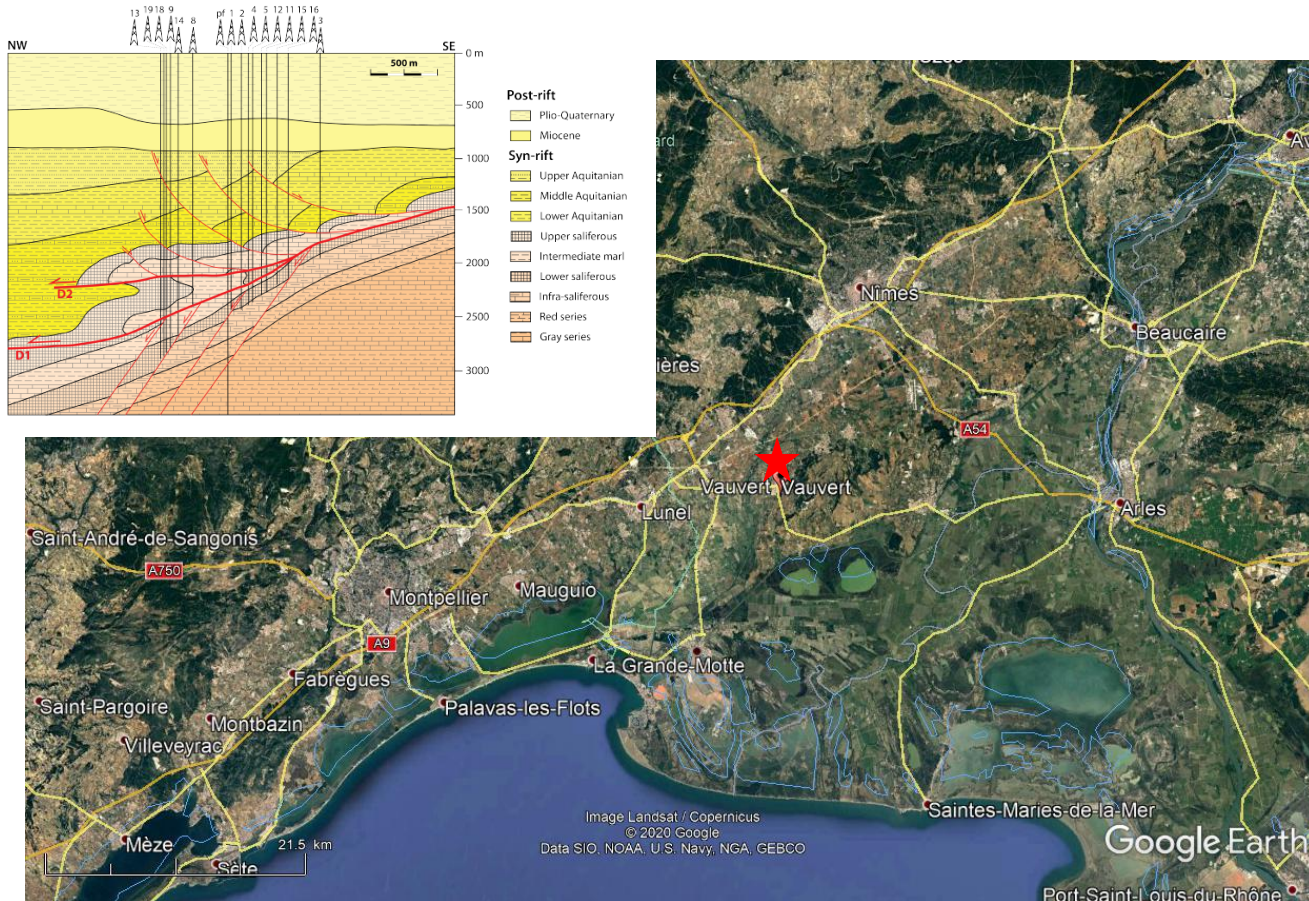
- ◆ -3 - -2
- ◆ -2 - -1
- ◆ -1 - 0
- ◆ 0 - 1
- ◆ 1 - 2
- ◆ 2 - 5



Gain : apport d'éléments pour les modèles géologiques et leur interprétation, par apport de données de surface (avant, sismique seule)

Perspective : modélisation de la dynamique du réservoir

Gestion de gisement salifère - France



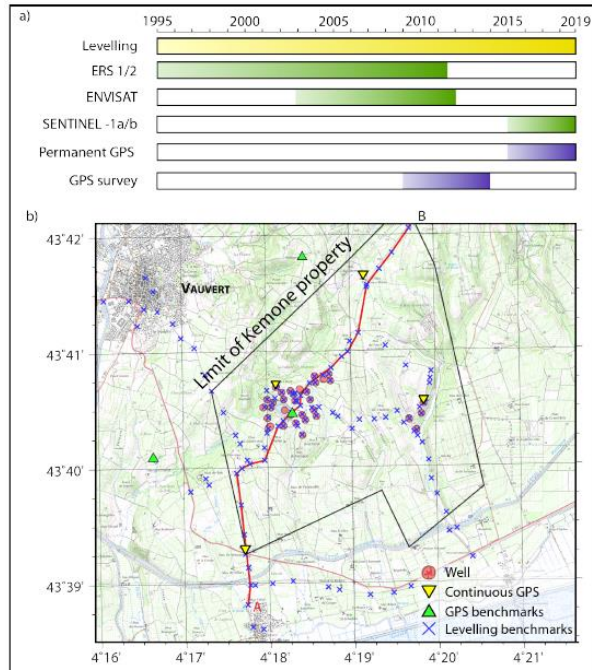
■ Contexte

- Données historiques (nivellement) : connaissance ponctuelle limitée de la déformation
- Connaissance partielle des données d'injection d'eau et d'extraction de saumure
- Zones de déformation maximales variables en fonction des puits d'extraction utilisés
- Ampleur et extension de la zone d'affaissement incertaines
- Site situé dans le bassin sédimentaire de Camargue, sujet à des affaissements/déformations naturels

Gestion de gisement salifère - France

■ Objectifs

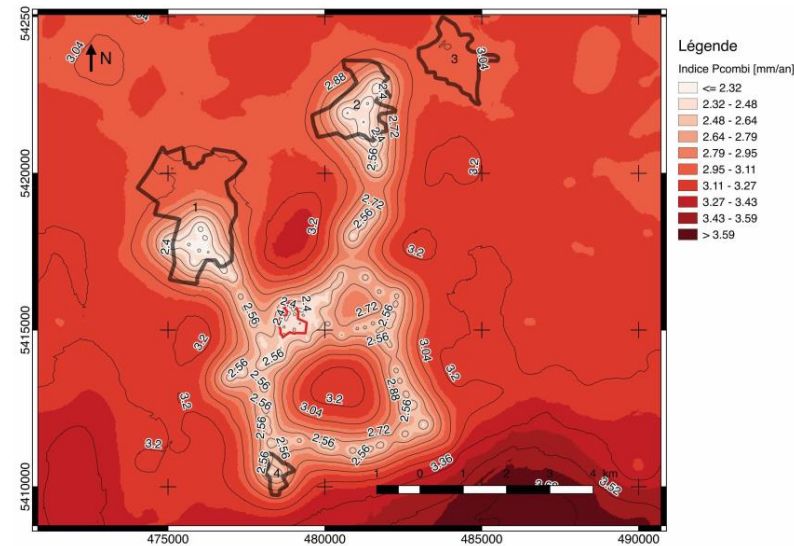
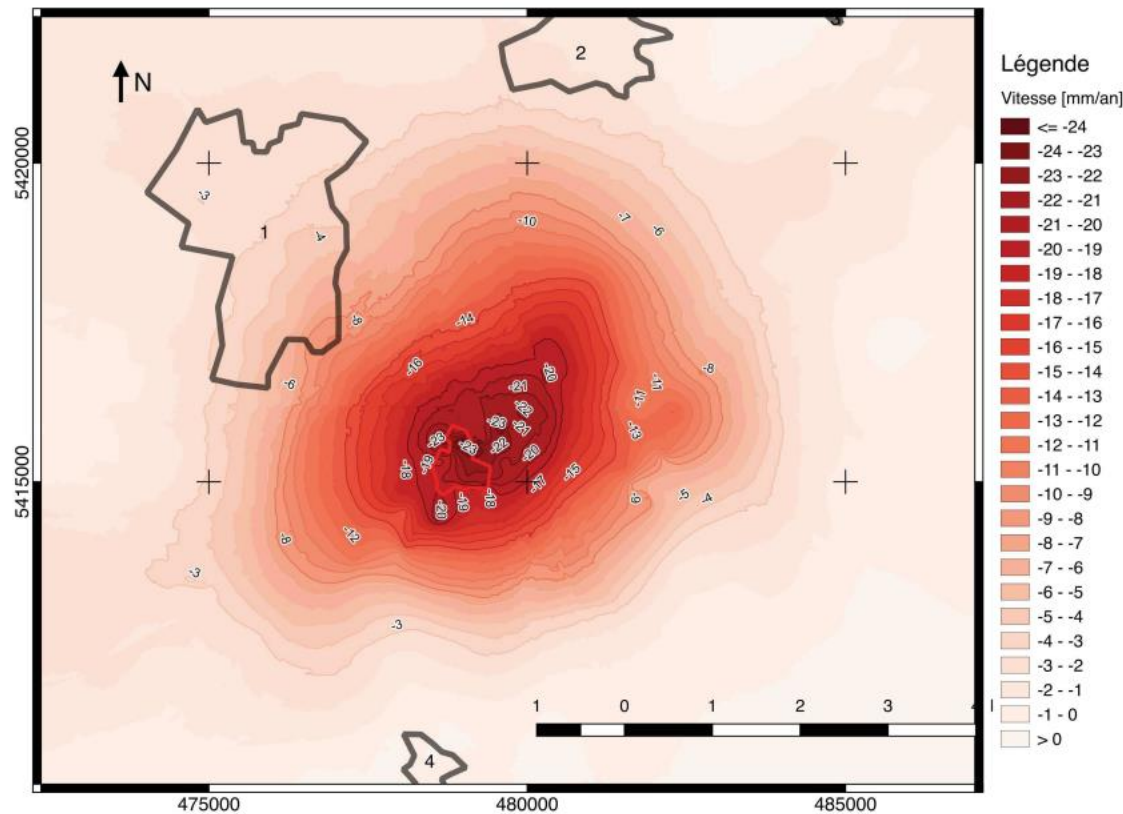
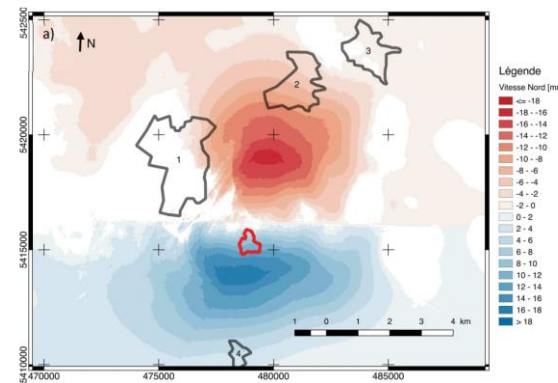
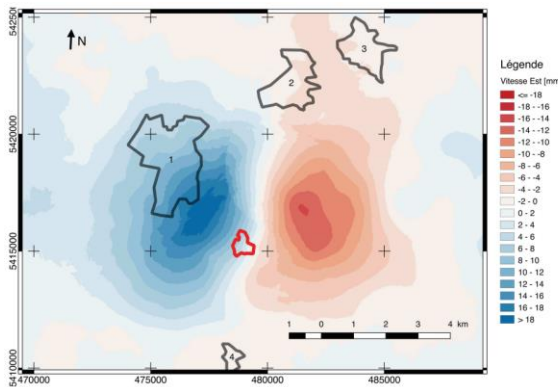
- Augmenter les résolutions spatiales et temporelles des mesures d'affaissement
- Fixer les incertitudes et caractériser l'évolution de l'affaissement en utilisant des corrélations croisées entre des techniques indépendantes, y compris InSAR, GNSS géodésique, nivellement, micro gravimétrie, et données environnementales (eau de pluie, piézométrie)
- Corréler toutes les variations spatiales et temporelles de la déformation de la surface du sol avec les changements des volumes de production et des zones d'extraction.



Gestion de gisement salifère - France

■ Résultats

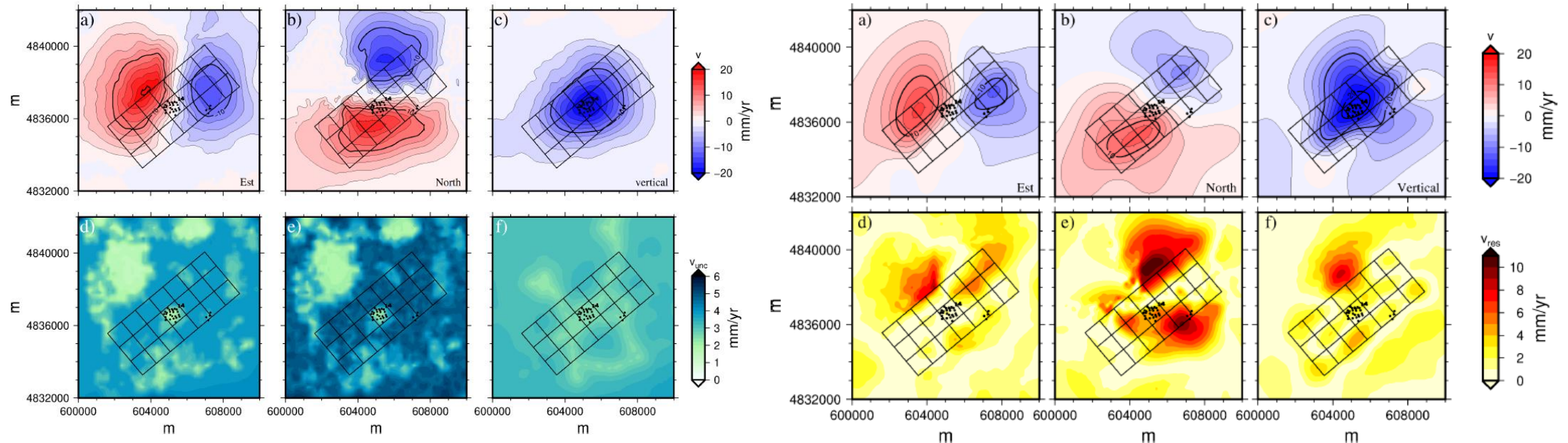
- Caractérisation précise de l'évolution du bol d'affaissement dans le temps et dans l'espace
- Amélioration d'une combinaison innovante et optimisée InSAR (SBAS + PSI) et de nivellement pour la surveillance de la subsidence



Gestion de gisement salifère - France

■ Résultats

- La contribution pour la modélisation (Moggi / Okada, plan de dislocation) est avérée, cf publication (Solid Earth)

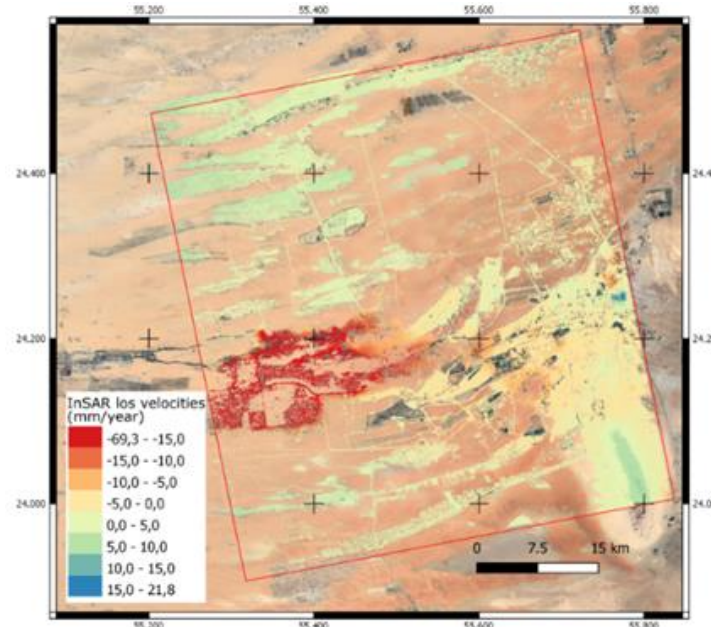


➤ <https://se.copernicus.org/articles/12/15/2021/>

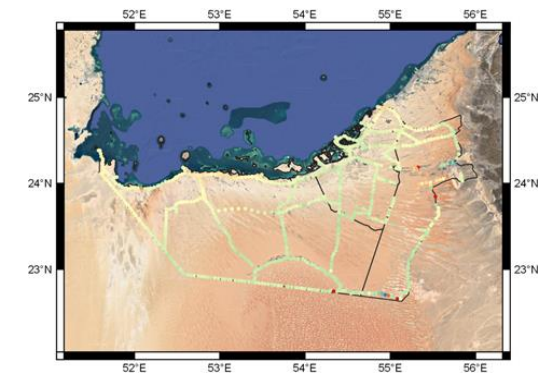
Apport de l'InSAR en géodésie – Moyen Orient

■ Région d'Al Ain, Emirats Arabes Unis

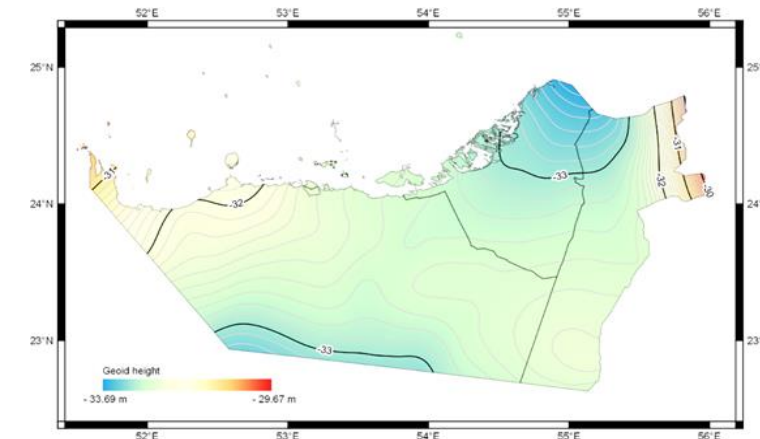
- Détermination du réseau géodésique de 1er ordre et du géoïde gravimétrique hybride
- CORS et repères de nivellement situés dans une région agricole : nombreuses plantations pompant dans la nappe phréatique
- Suspicion -non avérée- d'altitudes erronées des stations permanentes GNSS et repères de nivellement
- Recalcul des coordonnées des stations, Exclusion des repères de nivellement affectés lors de l'adaptation du géoïde gravimétrique (Collocation par moindres carrés sur les repères de nivellement)



Stations
Permanent
GNSS



Repères de
nivellement



Géoïde gravimétrique hybride



Thank you