



LES ATOUTS DE L'INSAR POUR LA SURVEILLANCE DES MOUVEMENTS DU SOL SUR LES ANCIENS BASSINS MINIERS

J. MOREL, D. RAUCOULES, M. FOUMELIS, G. ASLAN
BRGM



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



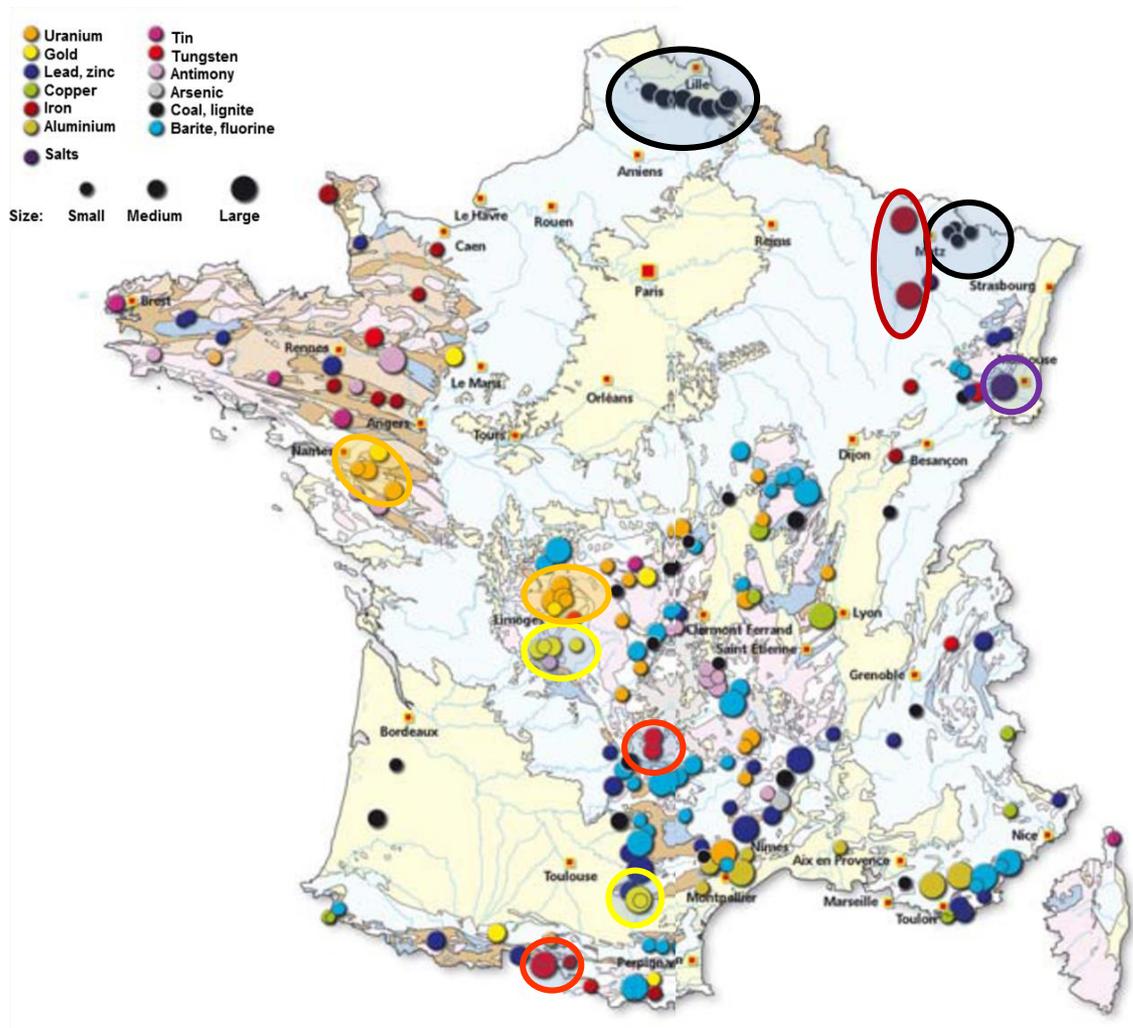
Géosciences pour une Terre durable

brgm

PLAN DE LA PRÉSENTATION

- Contexte minier et après-mine.
- Méthodologie d'analyse InSAR.
- Résultats:
 - Retro-analyse des mouvements du sol sur la période 1995-2018.
 - Comparaison avec les données de nivellement.
- Conclusions.
- Perspectives.

L'APRÈS-MINE EN FRANCE - HISTOIRE MINIÈRE



Plus de 800 sites miniers exploités sur 2 siècles

Géologie favorable

- Massifs cristallins « anciens »
- Massifs cristallins « jeunes »
- Vastes bassins sédimentaires primaires et secondaires

Principaux bassins miniers (dernière date de fermeture) :

Tungstène (1986)

Fer (1995)

Uranium (2001)

Potasse (2003)

Or (2004)

Charbon (2004)

L'APRÈS-MINE EN FRANCE - LES ACTEURS

- Fermeture des dernières mines au début des années 2000 (uranium, charbon, potasse, or, ...)
- Crise BFL fin des années 1990 → série des sinistres aux bâtis dans le bassin ferrifère de Lorraine (Auboué,...)

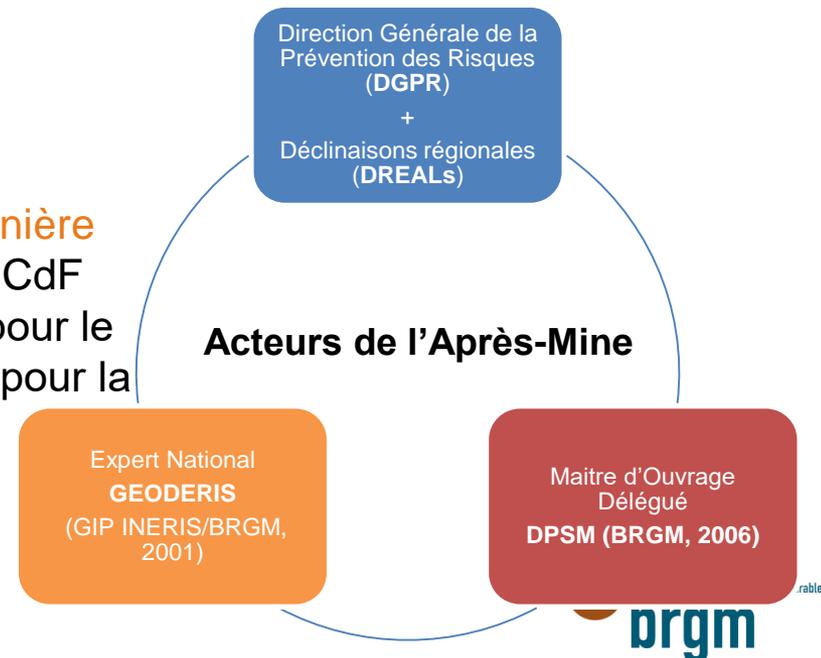


"Driver" pour l'Etat pour définir progressivement (1997-2006) le cadre Après-Mine de Gestion des risques associés

- Qualifier les aléas et les risques (→ Rôle d'"Expert")
- Surveiller les zones identifiées, "réparer" les dommages (→ Rôle de « Gestionnaire opérationnel »)

Nouvelle mission du BRGM définie dans le décret modificatif du BRGM (2006)

- Création du Département Prévention et Sécurité Minière (DPSM), avec des ressources humaines (~120) de CdF
- DPSM agit en tant que Maître d'Ouvrage Délégué pour le compte de l'Etat (DGPR) et en tant que prestataire pour la surveillance



L'APRÈS-MINE EN FRANCE - LE BRGM/DPSM

Géographie

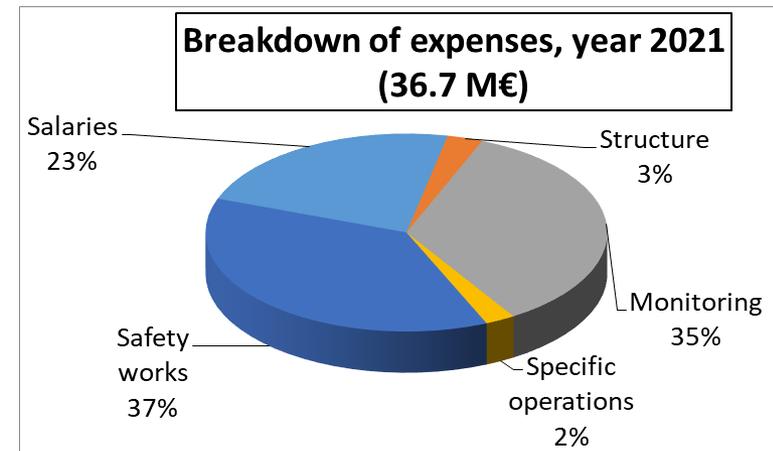
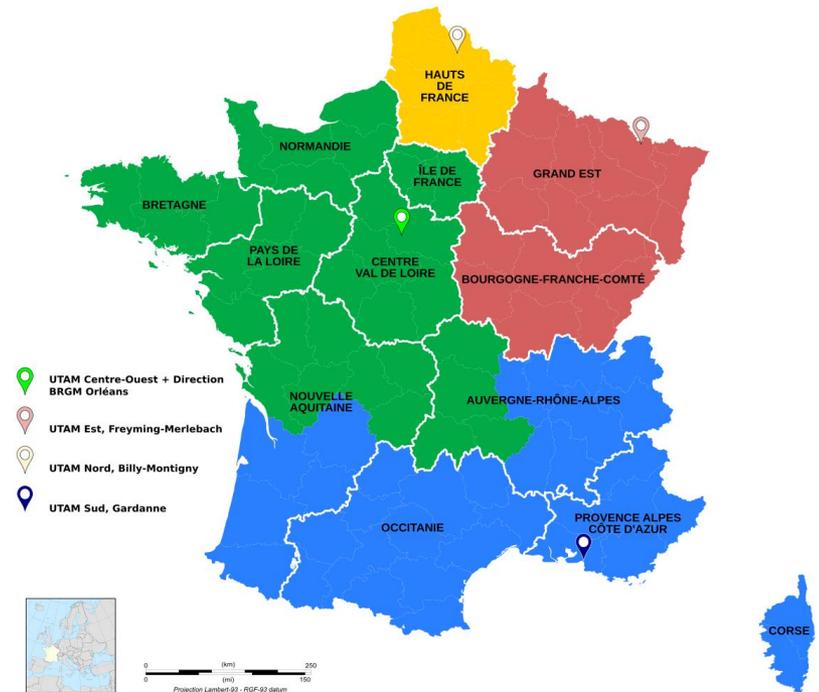
- 1 Direction nationale, y.c. la Cellule d'Appui Technique (DIR)
- 4 UTAM en région

Ressources Humaines

- Total de 92 agents
- Un total de 15 métiers, incluant fonctionnels et opérationnels (géologie, hydrogéologie, mine, géotechnique, génie civil, hydraulique, environnement, électrotechnique, SIG, data management, archives...)

Ressources financières et dépenses

- Un budget total voisin de 30 M€/an (moyenne), financé à 100% par l'Etat
- 3 postes de dépense principaux: Travaux de MES, Surveillance, Salaires



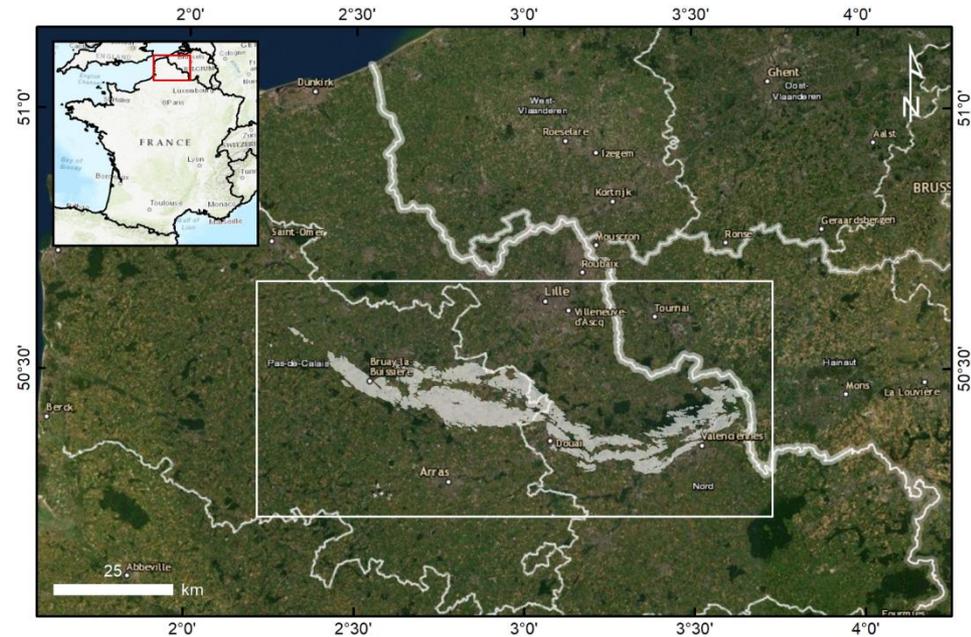
CONTEXTE - QUELQUES DONNÉES SUR LE BASSIN HOUILLER DU NORD-PAS DE CALAIS

43 concessions sur 4000 km², exploitation jusqu'à 1 km de profondeur.

Période d'exploitation entre 1750 et 1990, production totale 2400 Mt.

Jusqu'à 20 m d'affaissement pendant l'exploitation.

Début de l'ennoyage en 1990 suite à l'arrêt du pompage de la nappe; prévu pour durer plus d'1 siècle, d'Est en Ouest.



La remontée de la nappe peut potentiellement provoquer :

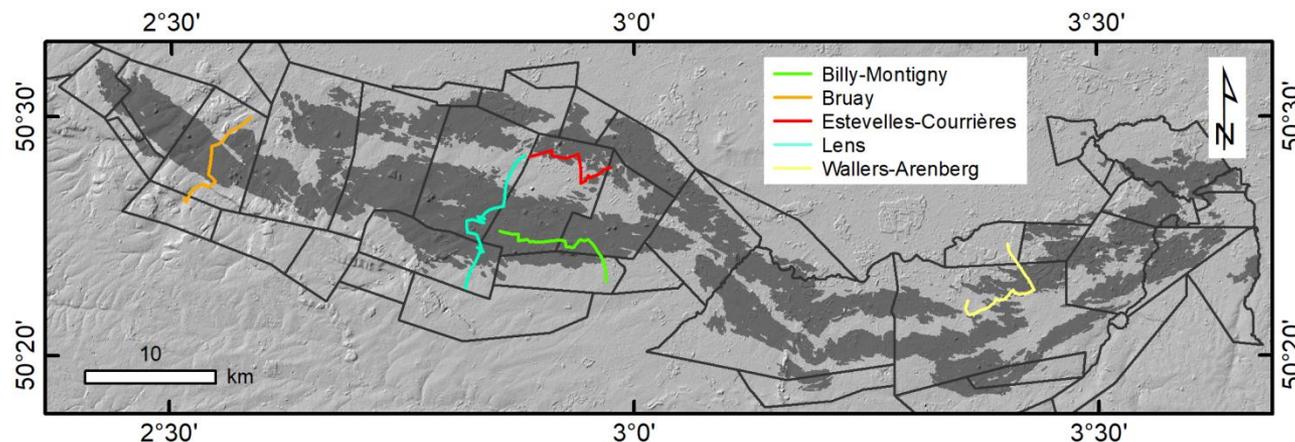
- De l'affaissement résiduel ;
- De la surrection.



Surveillance des mouvements de terrain.

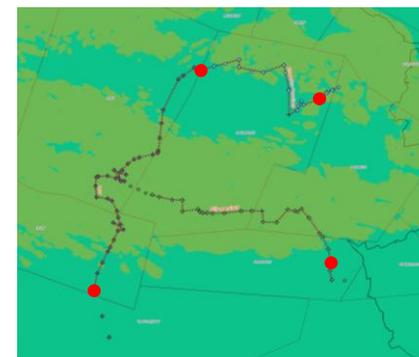
CONTEXTE - MÉTHODE CLASSIQUE DE SURVEILLANCE : LE NIVELLEMENT

5 lignes (réseaux) de nivellement, de plusieurs kms. Mesures de haute précision (quelques mms), annuelles.



Inconvénients :

- Mesures localisées, ne couvrant pas l'ensemble du bassin minier;
- Certains points références dans l'emprise des travaux souterrains: stabilité potentiellement discutable ;
- Rapport qualité/prix pas optimisé.



Utilisation de la technologie InSAR:

- Rétro-analyse des mouvements du sol à l'échelle du bassin minier entre 1995 et 2018, pour identifier de potentiels mouvements non couverts par le nivellement ;
- Comparaison des mesures InSAR et de nivellement pour évaluer la pertinence de l'utilisation de l'InSAR pour la surveillance après-mine.

MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE INSAR

Traitement d'images SAR (Radar à Synthèse d'Ouverture) de satellites d'Observation de la Terre:

- ERS (1995-2000): 246 images;
- Envisat (2002-2010): 141 images;
- Sentinel 1 (2015-2018): 164 images; 1 seule fauchée

3 fauchées

Mesure du déplacement du sol entre différentes dates, après diverses corrections (orbitale, atmosphérique, etc.).

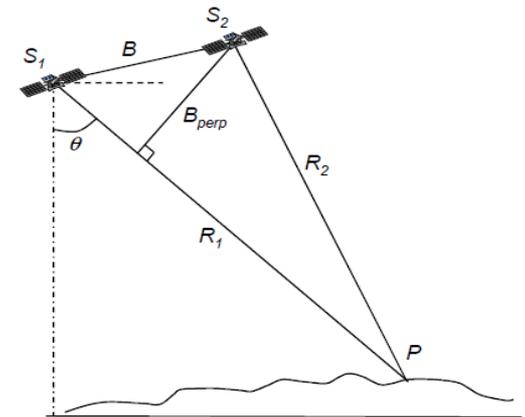
Nécessite des réflecteurs suffisamment stables dans le temps : plus efficace en zones urbanisées.

➡ s'applique bien au bassin houiller NPC.

Compte tenu de la faible valeur du mouvement attendu supposé peu variable dans le temps: production de cartes de vitesses moyennes par stacking d'interférogrammes.

Précision : quelques mms ➡ équivalent nivellement.

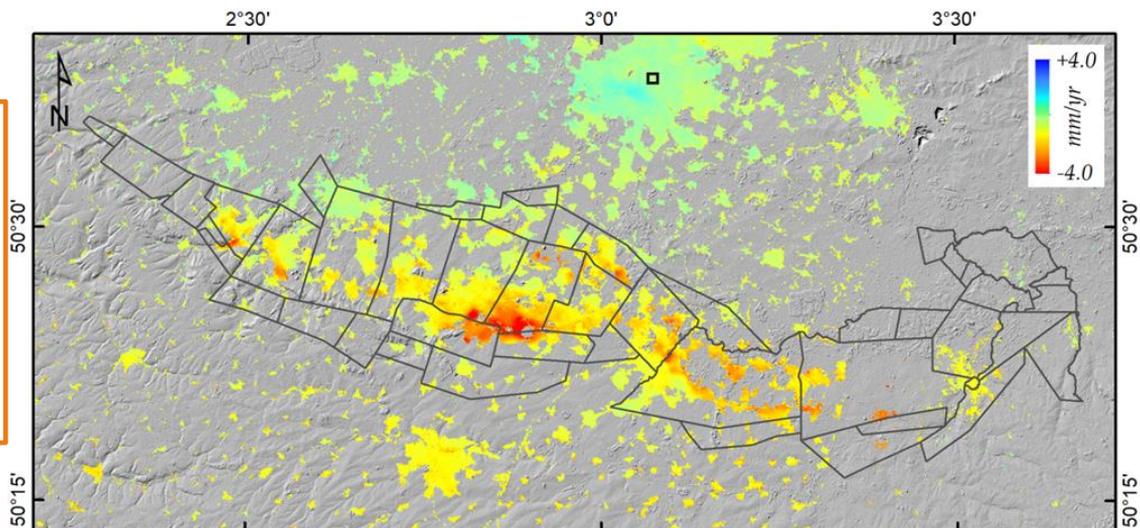
Résolution 60 m.



RÉSULTATS - RÉTRO-ANALYSE 1995-2018

Déplacement en mm/an sur la période considérée, référencés / point stable dans la ville de Lille.

ERS (1995-2000)

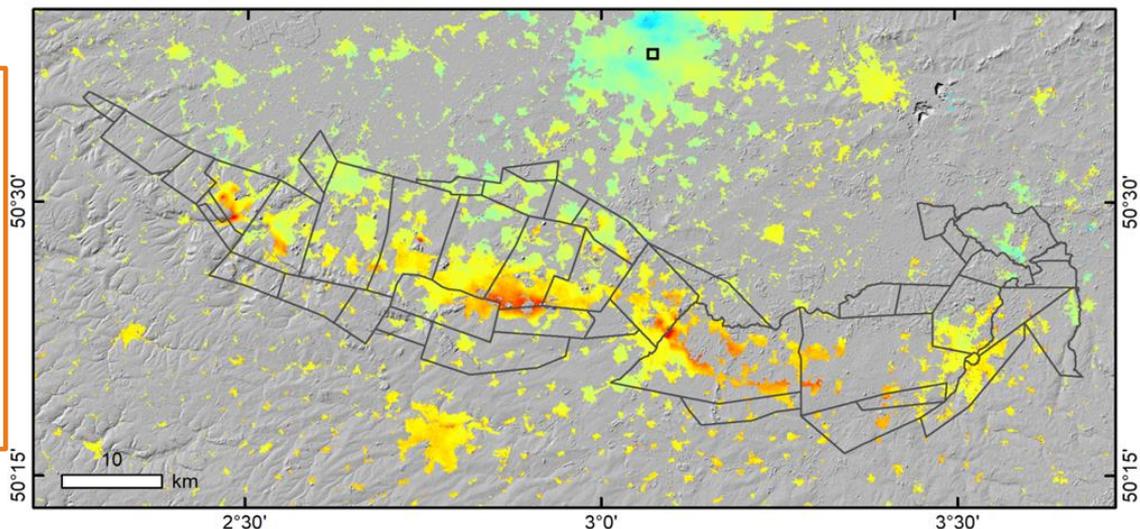


Affaissement 4 mm/an dans la région centrale du bassin pendant la période ERS (1995-2000).

Quelques années après la fin de l'exploitation (1990) :

➡ peut-être attribué à de l'affaissement résiduel.

Envisat (2002-2010)



Toujours de l'affaissement 2 mm/an dans la même région pendant la période Envisat (2002-2010). Légère accélération en certains endroits.

➡ impact de facteurs non-miniers :

- Activités anthropiques ?
- Phénomènes naturels ?

RÉSULTATS - RÉTRO-ANALYSE 1995-2018

Sentinel 1 (2015-2018)

Affaissement toujours observé sur la plus grande partie de la région, jusqu'à 5 mm/an par endroit.

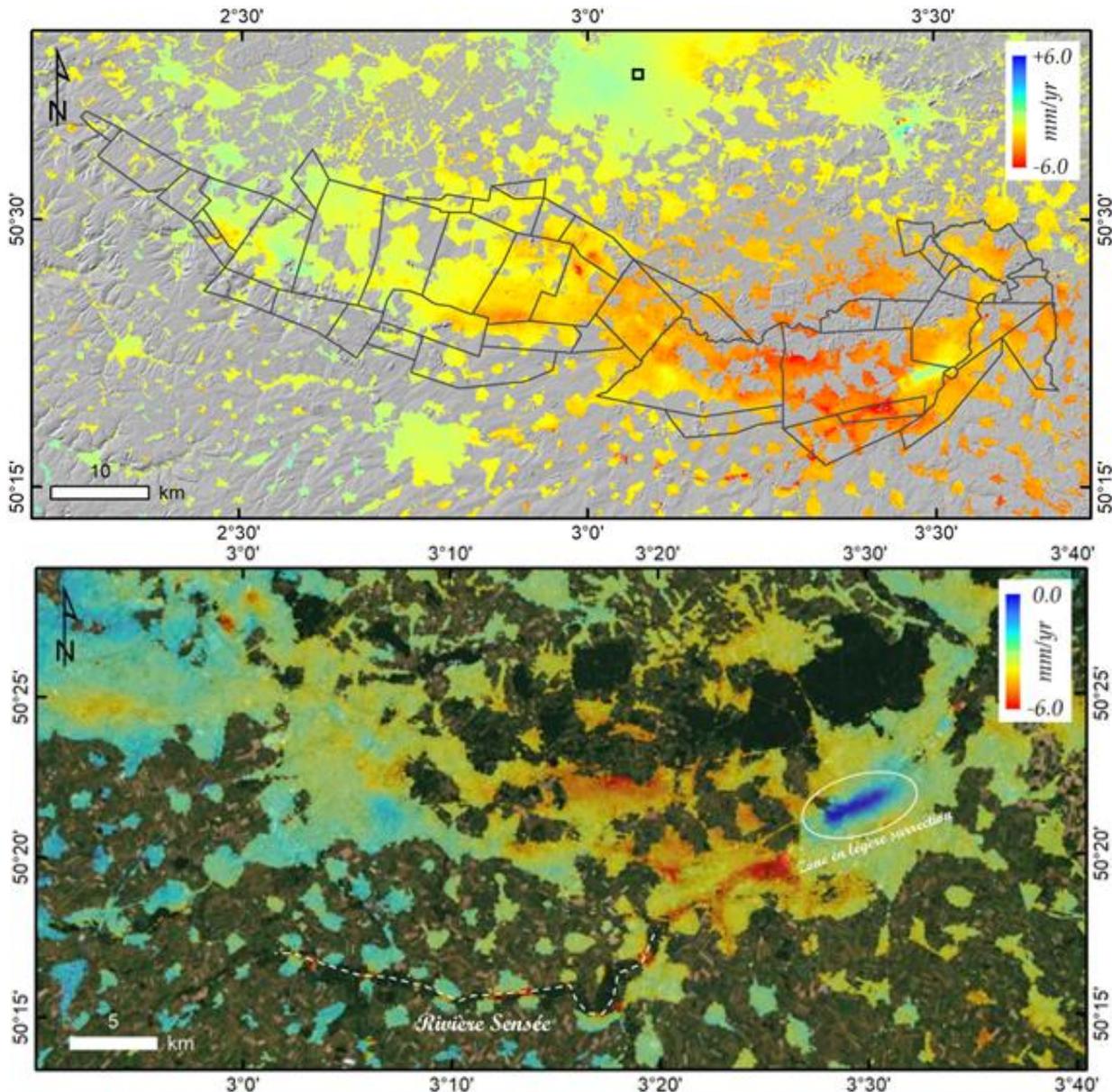
S'étend bien au-delà du bassin minier.

Affaissement ou tassement associé à des lits de rivières.

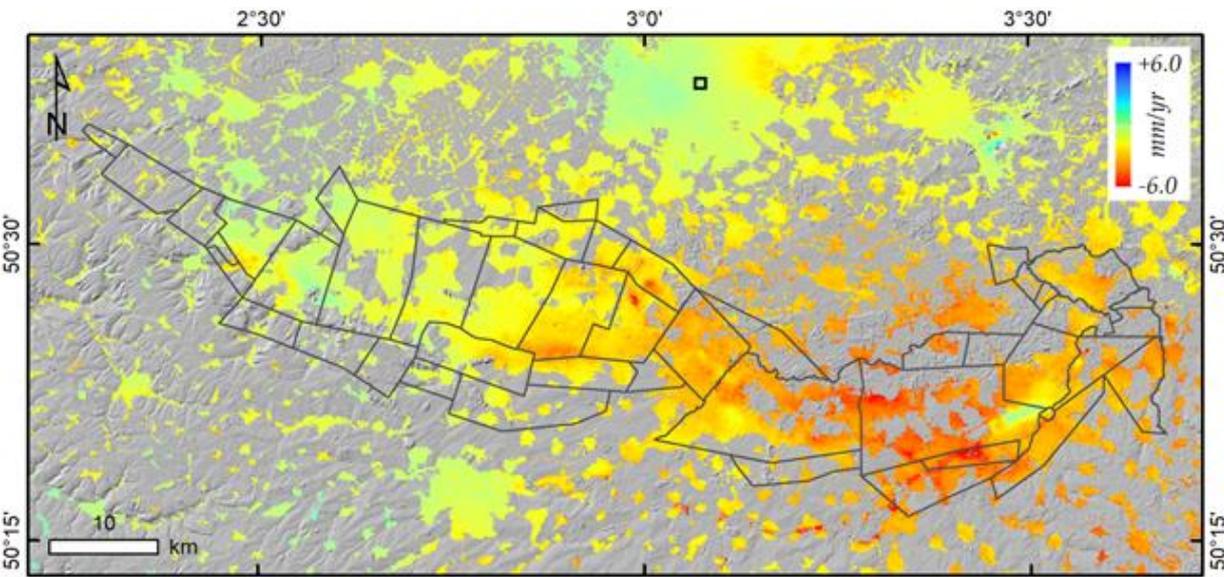
Légère surrection localisée près de Valenciennes.

➔ impact de facteurs non-miniers :

- Activités anthropiques ?
- Phénomènes naturels ?



RÉSULTATS - IMPACT DE FACTEURS NON-MINIERS : PHÉNOMÈNES NATURELS



Géologie locale caractérisée par une frontière sols calcaires/argileux.

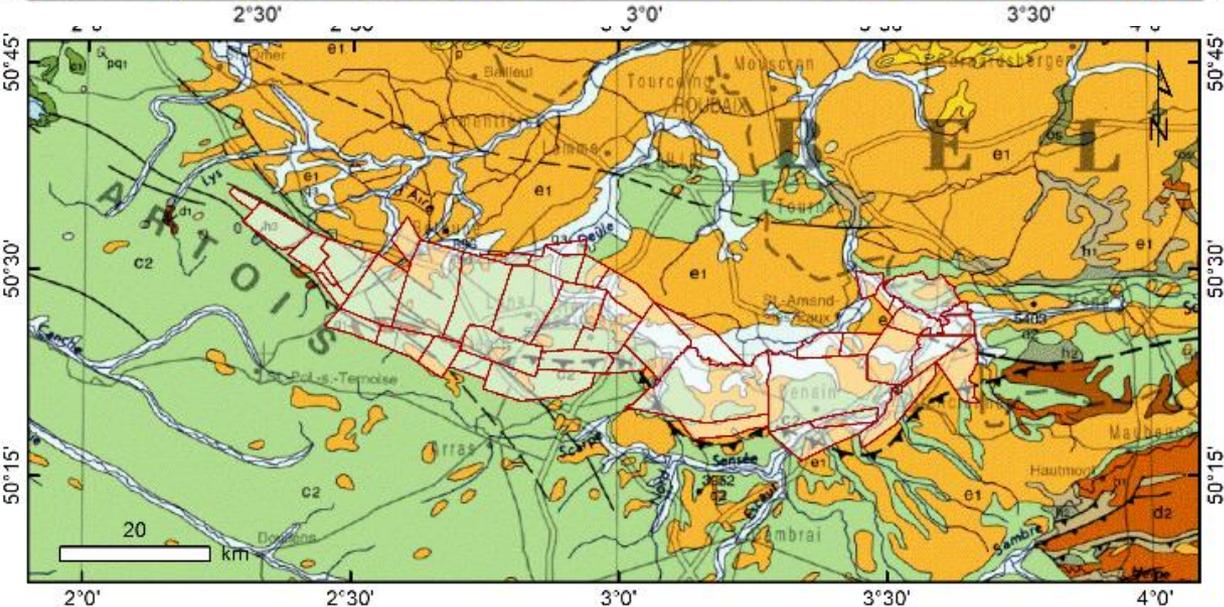
Affaissement ou tassement principalement observé côté argileux.

➡ influence des conditions météorologiques - effets saisonniers.

➡ nécessité de traitements de données complémentaires (mise en évidence de phénomènes cycliques).

Les zones alluvionnaires ont également un impact (lits de rivières).

Tectonique/rebond post glaciaire estimé à 1 cm/an.



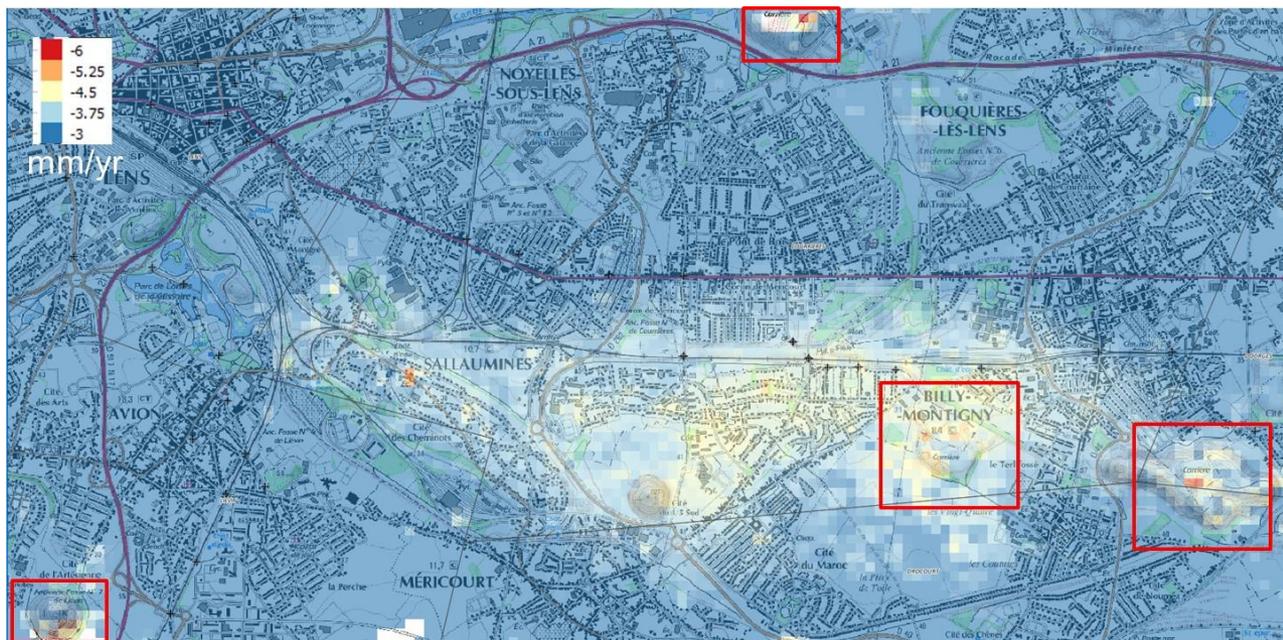
RÉSULTATS - IMPACT DE FACTEURS NON-MINIERS : ACTIVITÉS ANTHROPIQUES

Région centrale du bassin minier.

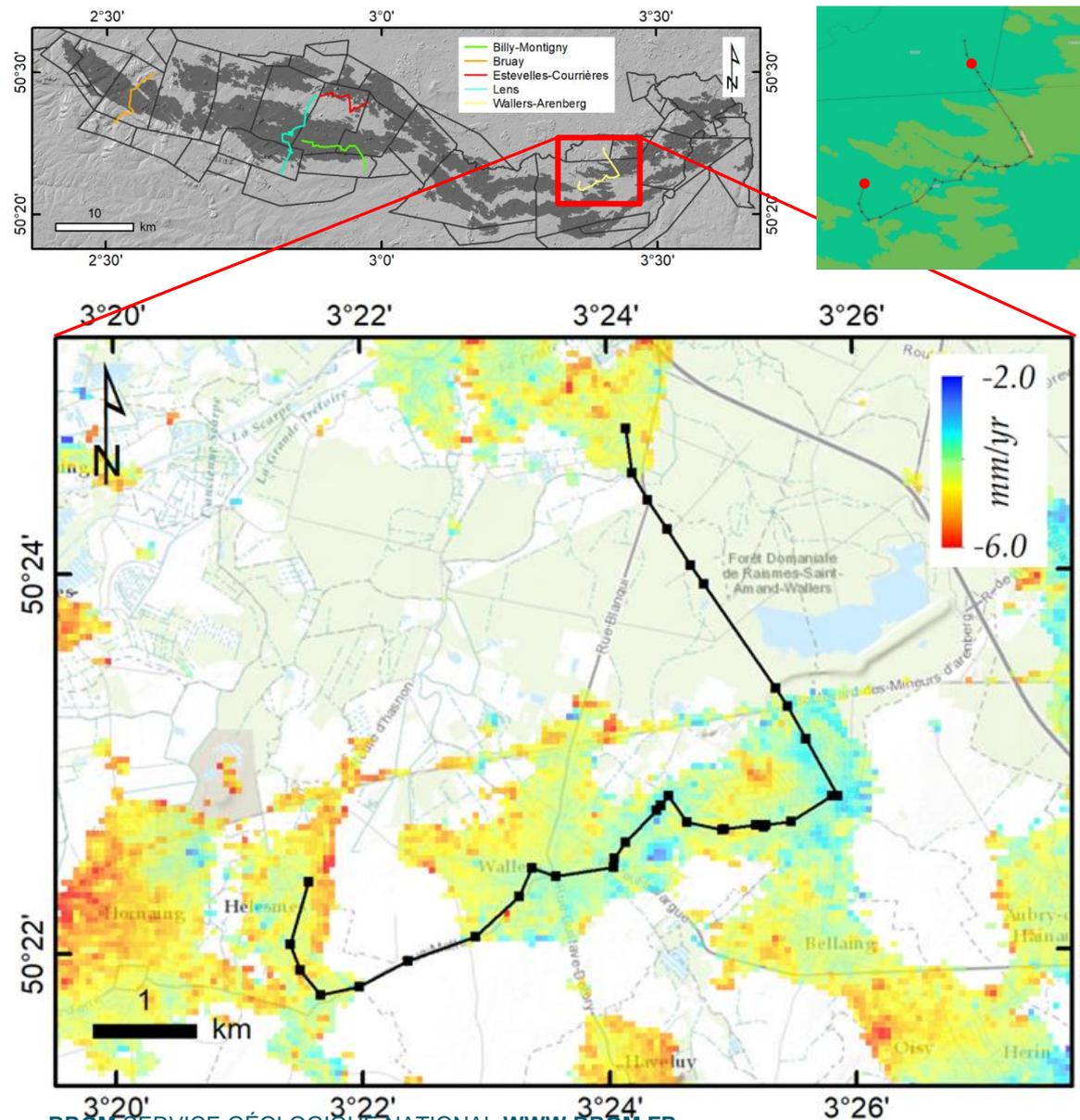
Plus grandes vitesses d'affaissement principalement observées sur des carrières, souvent associées à d'anciens terrils.

Autres activités anthropiques pouvant avoir un impact:

- Pompage de nappe ;
- Anciennes carrières souterraines oubliées.



RÉSULTATS - COMPARAISON AVEC LE NIVELLEMENT



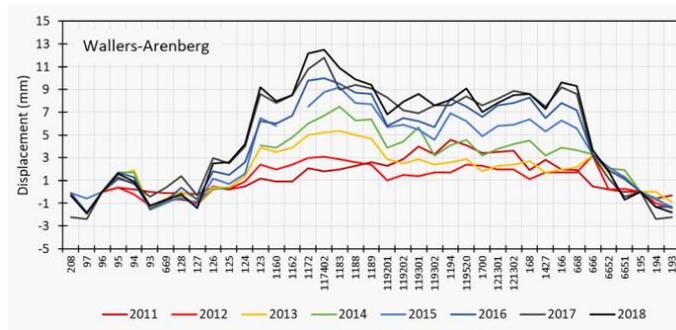
Comparaison sur la période Sentinel 1 (2015-2018).

Réseau de Wallers-Arenberg

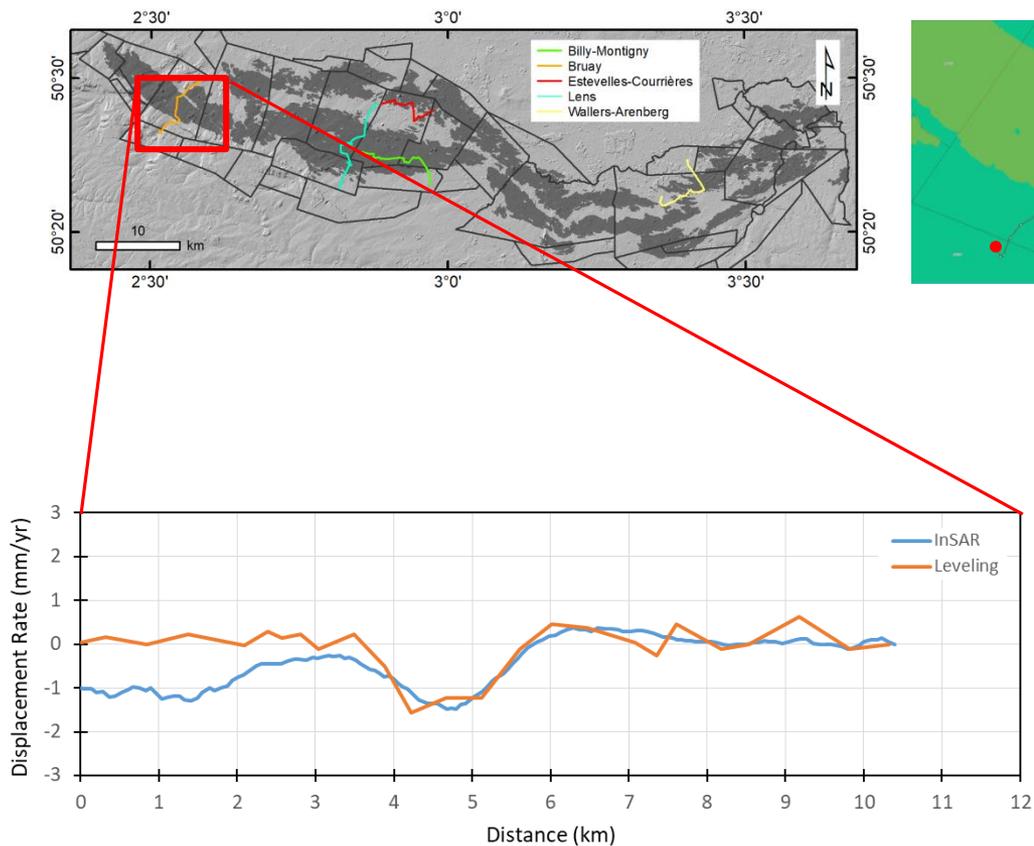
Points références instables, avec 4 mm/an d'affaissement.

Affaissement plus lent au milieu du réseau :

➡ surrection apparente à partir du nivellement, mais en réalité affaissement, plus rapide aux extrémités qu'au centre.



RÉSULTATS - COMPARAISON AVEC LE NIVELLEMENT

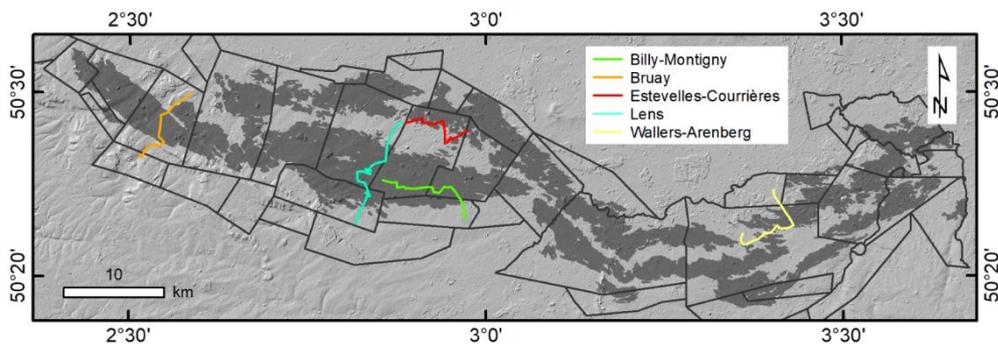


Réseau de Bruay

Déplacement différentiel des points références aux extrémités du réseau.

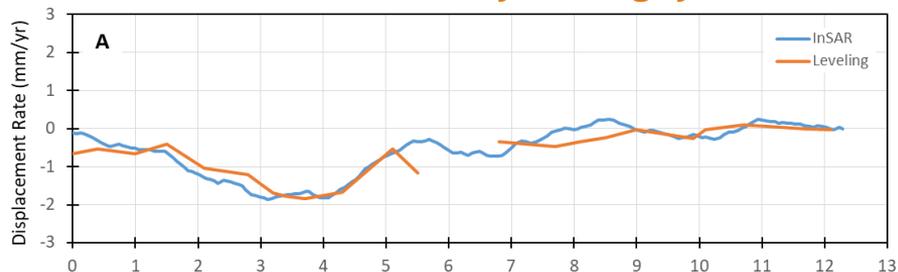
➡ déformation du profil de déplacement obtenu par nivellement.

RÉSULTATS - COMPARAISON AVEC LE NIVELLEMENT

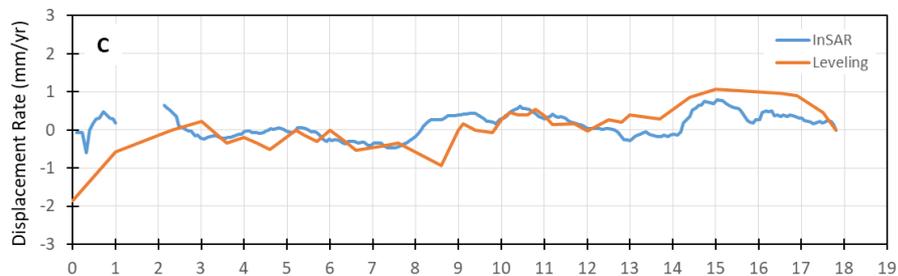
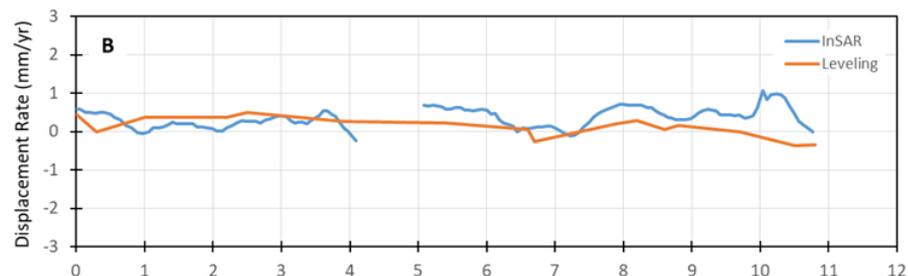


Après prise en compte de l'offset lié au déplacement des points références, les vitesses de déplacement calculées par les 2 méthodes (nivellement et InSAR) correspondent parfaitement.

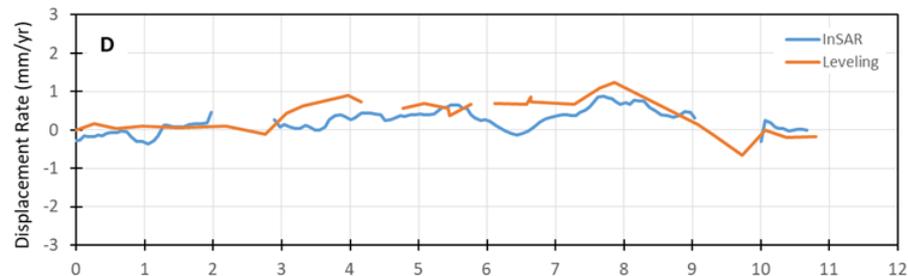
Réseau de Billy-Montigny



Réseau de Estvelles-Courrières



Réseau de Lens



Réseau de Wallers-Arenberg

CONCLUSIONS

- L'InSAR est un outil parfaitement adapté à la surveillance des mouvements du sol, avec une précision équivalente à celle du nivellement.
- L'InSAR offre la possibilité d'intégrer dans l'analyse les données historiques, tout en couvrant des zones beaucoup plus grandes.
- L'interprétation des potentiels mouvements induits par l'activité minière doit prendre en compte l'impact de phénomènes non-miniers (naturels ou anthropiques), en particulier l'influence de la géologie locale.
- L'InSAR apparait comme un outil complémentaire pour les mesures de nivellement, pour mettre en évidence et quantifier les éventuels mouvements des points références.

PERSPECTIVES - APPLICATION À D'AUTRES BASSINS MINIERES

Bassin houiller de Provence

G. Aslan (BRGM)

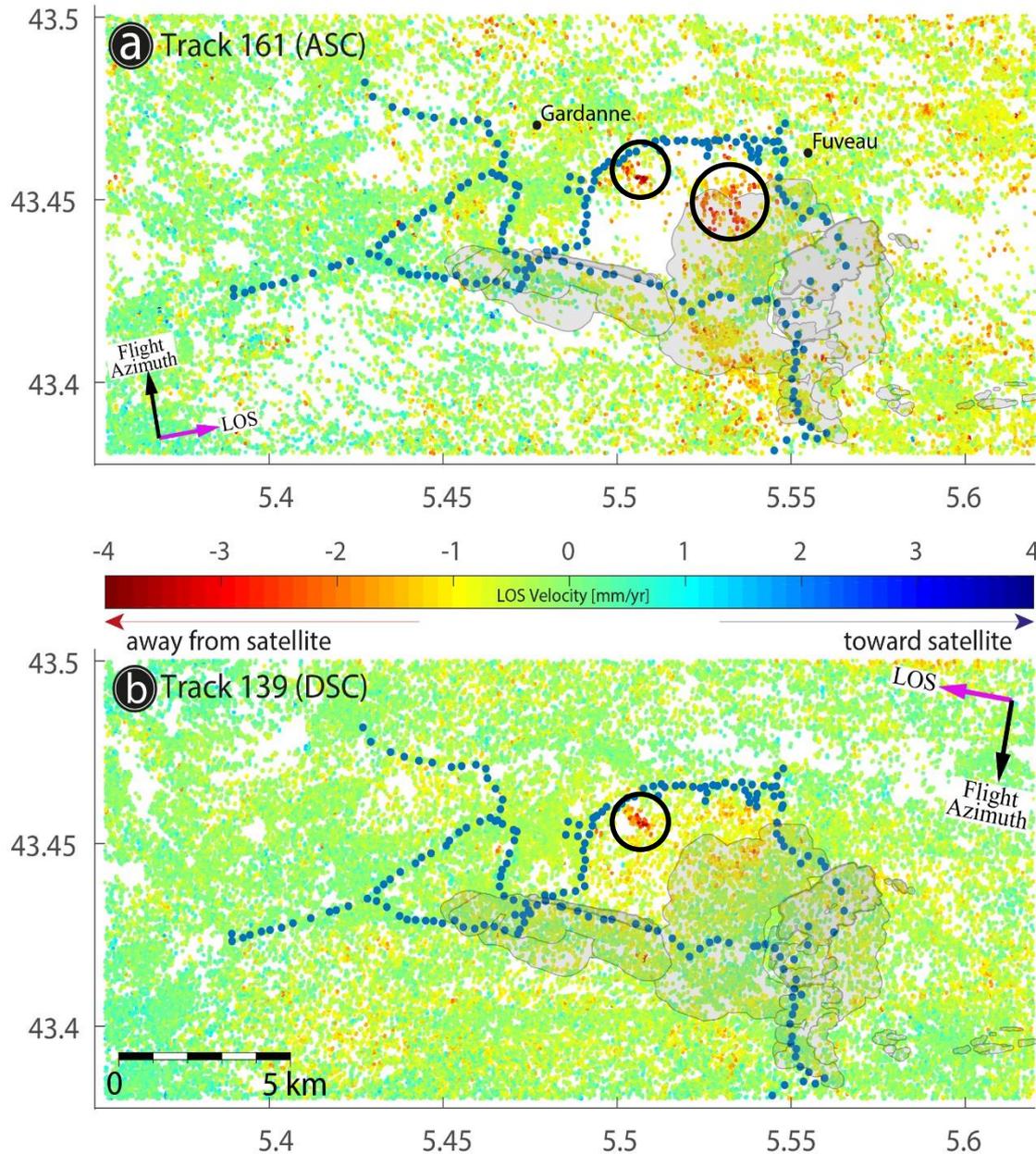
Caractérisé par des zones d'aléa affaissement et effondrement (affaissement « cassant »).

Aléa affaissement suivi par nivellement, aléa effondrement suivi par microsismique.

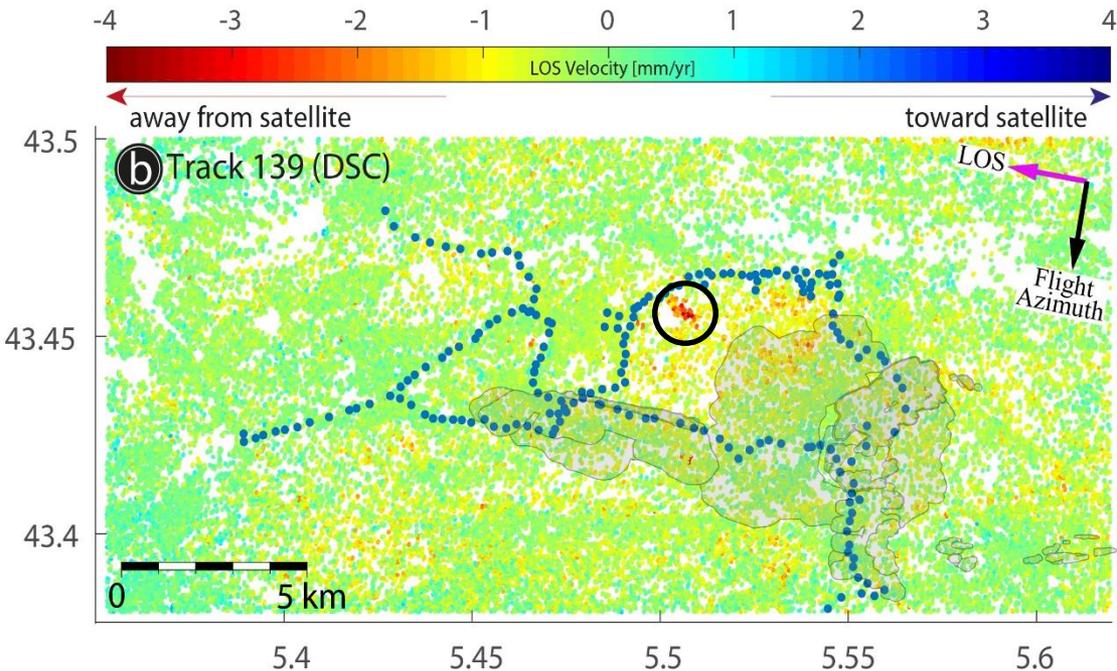
➡ test de l'InSAR

Période Sentinel-1 (2015-2020).

Identification de 2 zones en mouvement (affaissement).



PERSPECTIVES - APPLICATION À D'AUTRES BASSINS MINIERS



Bassin houiller de Provence

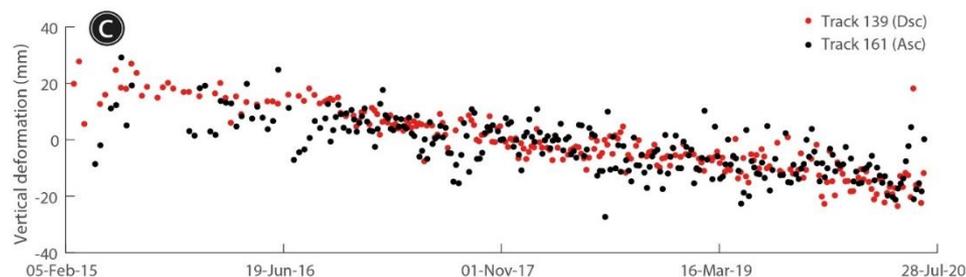
G. Aslan (BRGM)

Période Sentinel-1 (2015-2020).

Identification de 2 zones en mouvement (affaissement).

1 zone attribuée à la construction d'une centrale photovoltaïque sur le terri des Sauvaires.

Tassement constant sur la période.



PERSPECTIVES - APPLICATION À D'AUTRES BASSINS MINIERES

Bassin houiller de Provence

G. Aslan (BRGM)

Période Sentinel-1 (2015-2020).

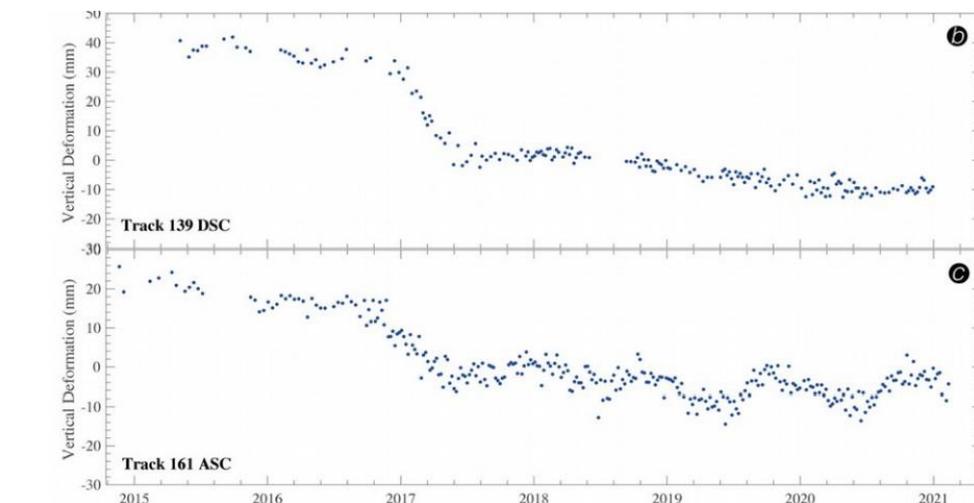
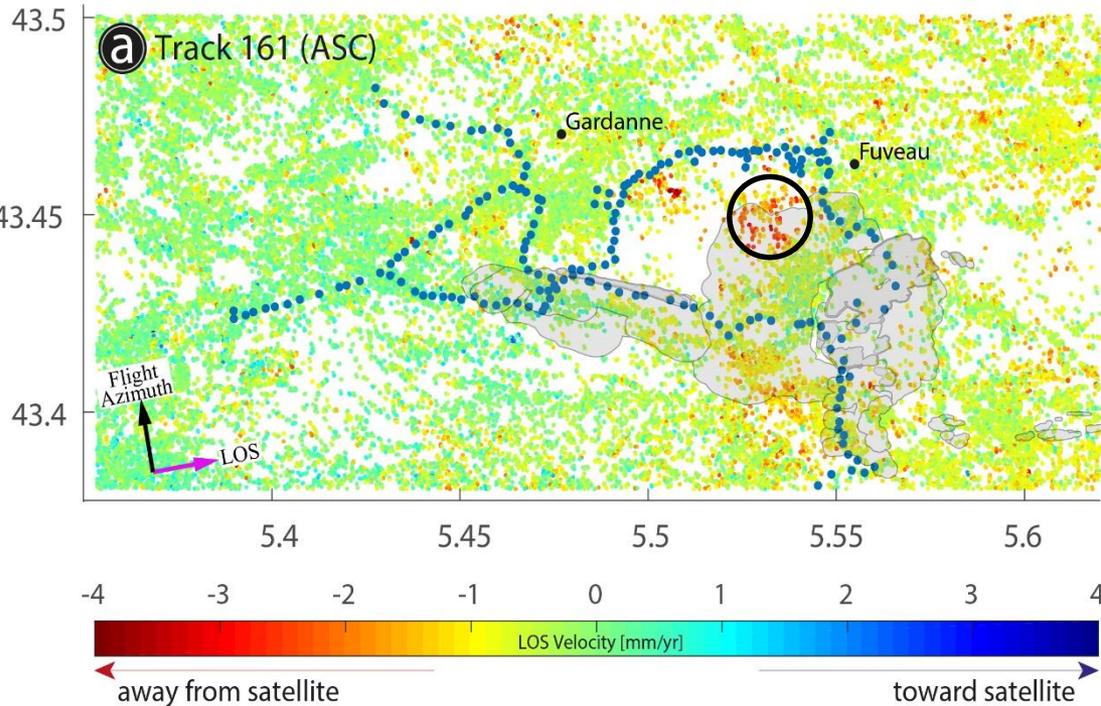
Identification de 2 zones en mouvement (affaissement).

1 zone potentiellement en lien avec la microsismicité induite.

Déplacement mesuré dans une période pendant laquelle une « crise » microsismique liée au battement de la nappe minière a également eu lieu.



P. Dominique
(BRGM)



PERSPECTIVES - L'EGMS

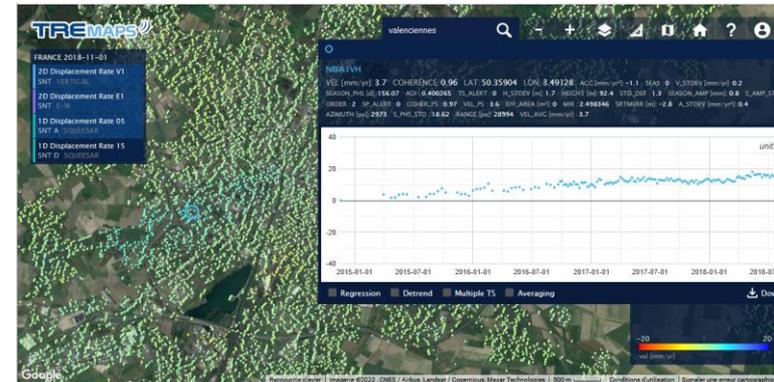
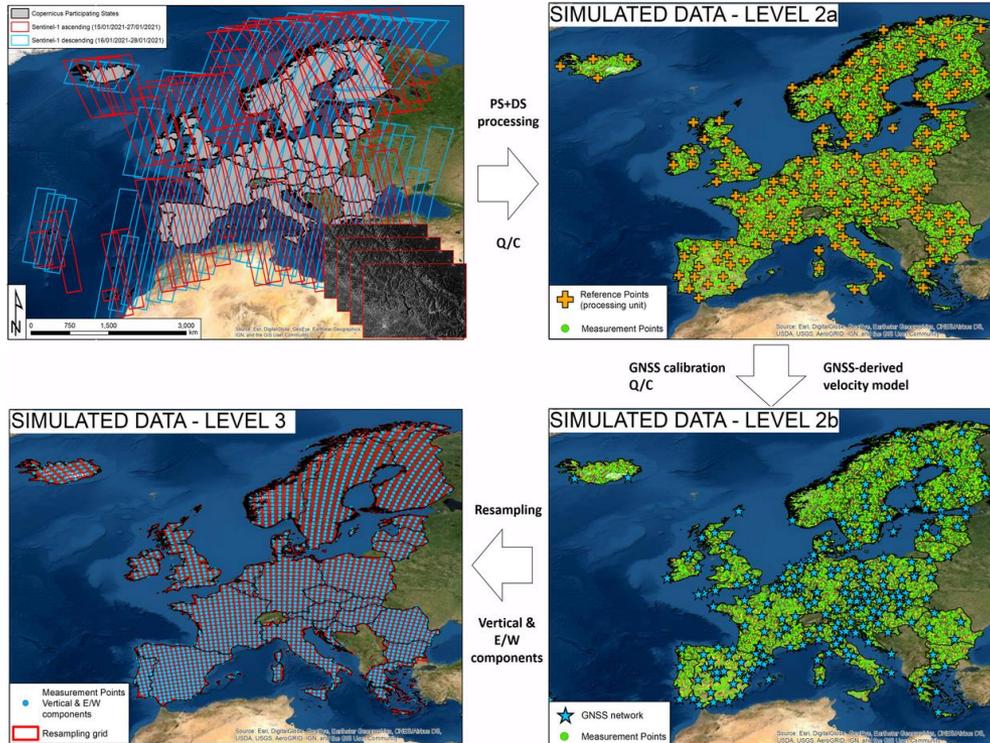
European Ground Motion Service (accessible fin 2022)

Cadre: Land Monitoring Service de Copernicus



Contribution du BRGM à la validation dans le cadre d'un projet européen en cours.

Application au bassin houiller lorrain.



Source: Prototype de couverture nationale CNES/TRE-Altamira(2015-2018)