

**MARDI DE L'AFTES**

**L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE ET LE GRAND PARIS EXPRESS**

**LES TRAVAUX SOUTERRAINS EN ZONE AQUIFÈRE**

***TRAVAUX SOUTERRAINS EN ZONE DE DISSOLUTION DU  
GYPSE – IMPACT DES RABATTEMENTS DE NAPPE***

26/11/2024

Cerema : P. Branchu, E. Dumont, F. Gaumet, P. Guezennec, V. Pratesi  
Ineris : A. Charmoille, I. Zaier  
SGP : C. Kreziak

# SOMMAIRE

**I Introduction**

**II Contextes géologiques et hydrogéologiques**

**III Caractérisations géol. et hydrogéol.**

**IV REX sur des pompages anciens**

**V Application aux travaux de la ligne 16 du GPE**

**VI Conclusions**

# I INTRODUCTION

## • Contexte

- Travaux de la Ligne 16 du Grand Paris Express traversent des zones d'aléa dissolution du gypse à Sevrans
- Actions de R&D menées par l'Ineris et le Cerema pour la SGP afin de mieux maîtriser les risques en phase de construction et garantir la pérennité de l'ouvrage

## • Première phase du projet (juillet 2016 à juillet 2020)

- Amélioration de la compréhension des mécanismes de dissolution et des mouvements de terrain associés
- Étude des couplages hydrodynamiques, chimiques et mécaniques dans les processus de dissolution
- Dimensionnement et mise en place du dispositif de suivi des travaux de la Ligne 16 à Sevrans
- Travail à différentes échelles (Plaine de France, commune de Sevrans, Laboratoire)

## • Deuxième phase du projet (juillet 2020 à juillet 2022)

- Suivi expérimental de l'effet des travaux

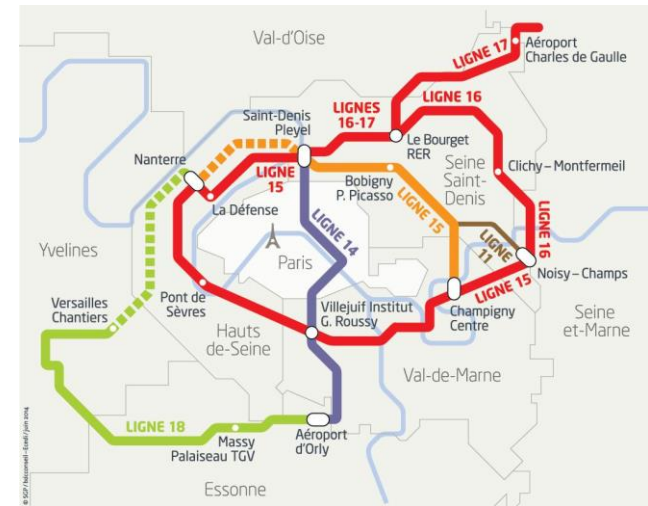


Fig. 1 : Carte des futures lignes du Grand Paris Express (Source : SGP)



Fig. 2 : Fontis survenu à Sevrans (Source : Cerema)

# I INTRODUCTION

## Délimitation de la zone d'étude

- **Délimitation d'une zone centrale**
  - Limitation à la Plaine de France via la courbe d'altitude topographique 65 m NGF
  - Extension vers l'ouest bornée par la Seine
  - Géométrie du projet : zone tampon de 500 m autour des lignes 16 et 15 Est
  - Intégration des communes particulièrement affectées par des désordres liés à la dissolution du gypse antéludien
- **Délimitation d'une zone d'intérêt périphérique**
  - Zone tampon de 1000 m autour de la zone centrale (avec critère topo)

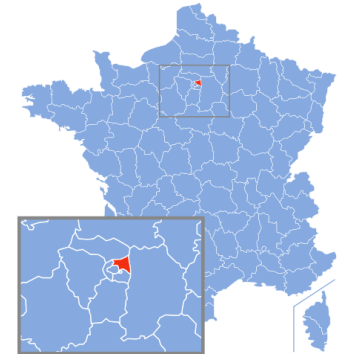


Fig. 3 : Localisation du département de Seine Saint-Denis (Source : Wikipédia)

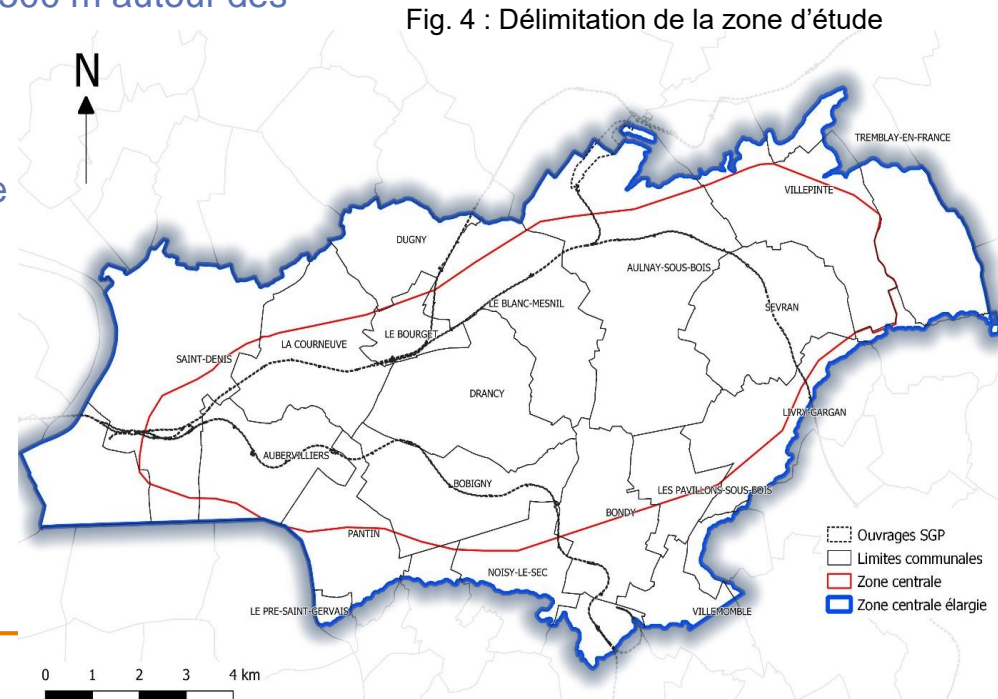


Fig. 4 : Délimitation de la zone d'étude

# II CONTEXTE (HYDRO)GÉOLOGIQUE

## Contexte géologique

- Plusieurs formations susceptibles de contenir du gypse dans la Plaine de France
  - Reliquat des Masses-et-Marnes du Gypse
  - Calcaire de Saint-Ouen
  - Sables de Beauchamp
  - Marnes et Caillasses

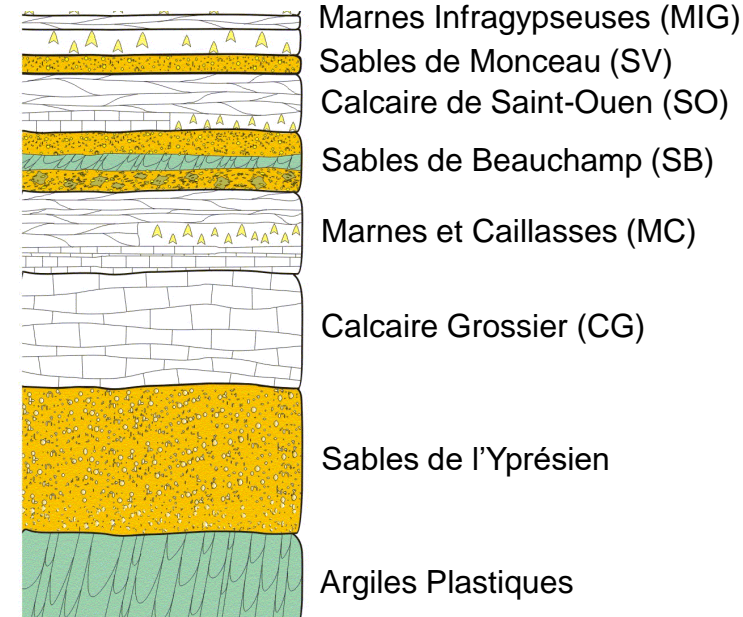


Fig. 5 : Extrait de la coupe litho-stratigraphique des terrains tertiaires du 93 (source : LREP)

- 2 anciennes lagunes situées dans la zone d'étude
  - Lagune d'Aubervilliers
  - Lagune de Sevrans

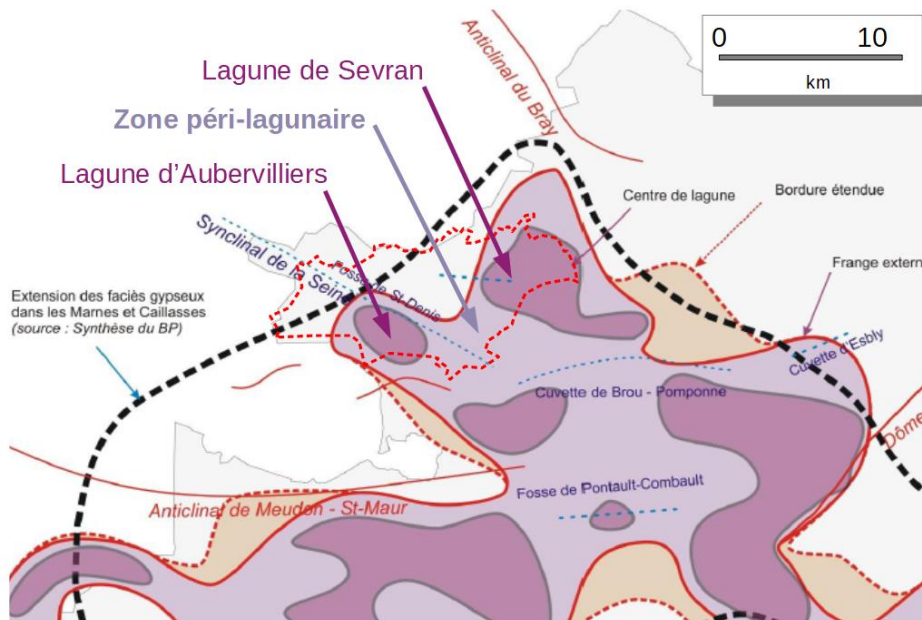


Fig. 6 : Extension des lagunes gypseuses du Lutétien sur la zone d'étude SGP. (Source : d'après BRGM)

# II CONTEXTE (HYDRO)GÉOLOGIQUE

## Contexte géologique

- A l'échelle de la commune de Sevrans
  - Contraste spatial des gisements de gypse lutétien (Marnes-et-Caillasses)
  - Au sud (gare de SEL) : bancs de gypse sain d'une épaisseur cumulée de 10 m
  - Au nord (gare de SEB) : lentilles de plus petites dimensions, fréquemment affectées par des phénomènes de dissolution
  - Existence d'un front de dissolution entre ces deux gares

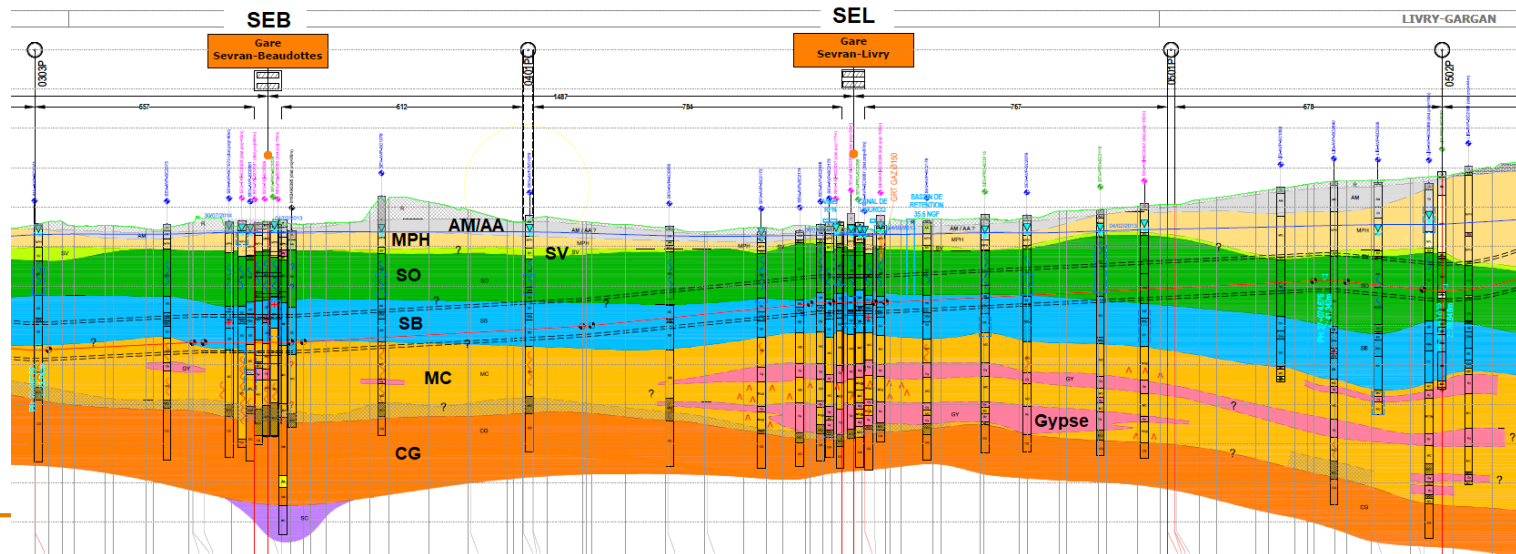


Fig. 7 : Extrait du profil géologique de la ligne 16 – Phase PRO (Source : EGIS)

# II CONTEXTE (HYDRO)GÉOLOGIQUE

## Contexte hydrogéologique

- Existence de plusieurs nappes, séparées par des couches peu perméables
- Interactions complexes entre ces nappes

Nappe superficielle

Nappe du Saint-Ouen - SO (Bartonien)

Nappe des Marnes-et-Caillasses - MC (Lutétien)

Nappe des Sables de l'Yprésien

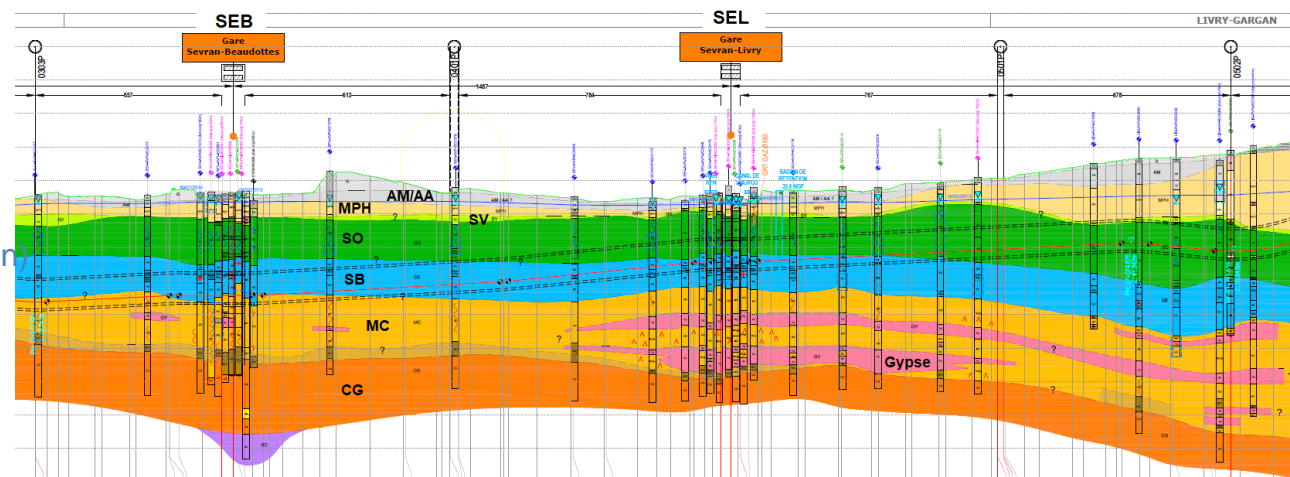
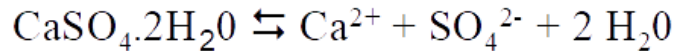


Fig. 7 : Extrait du profil géologique de la ligne 16 – Phase PRO (Source : EGIS)

# II MÉCANISME DE DISSOLUTION DU GYPSE

- Mécanisme de dissolution du gypse



- Synthèse des résultats des essais en laboratoire

- Travaux de thèse soutenus en février 2021 (I. Zaier)
- Taux de dissolution intrinsèques compris entre 2 et 12 mg/m<sup>2</sup>/s en fonction de la solution initiale, la texture et la composition minéralogique du faciès gypseux (Zaier et al., 2021)

- Approche par modélisation

- Modélisation de l'état des horizons gypseux après 60 ans
- Taux de récession de 3 m.an<sup>-1</sup> avec de l'eau sous-saturée
- Taux de récession de 1 à 2 cm.an<sup>-1</sup> lorsque la saturation est de 20%, soit environ 350 mg.L<sup>-1</sup>

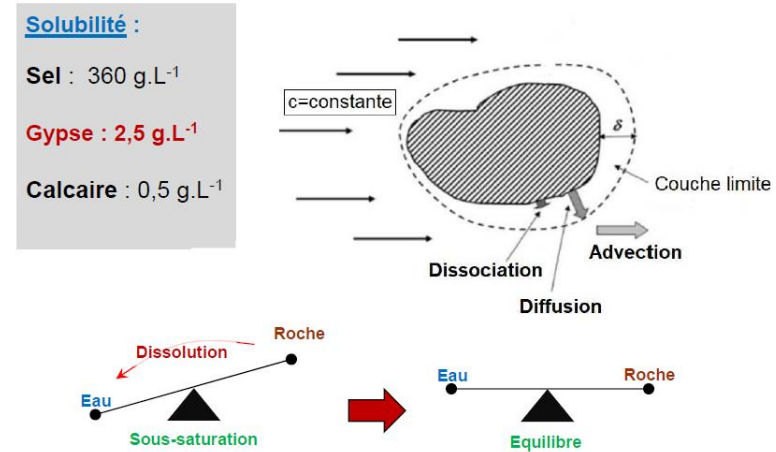


Fig. 8 : Schémas de principe décrivant les mécanismes de dissolution du gypse (source : Ineris)

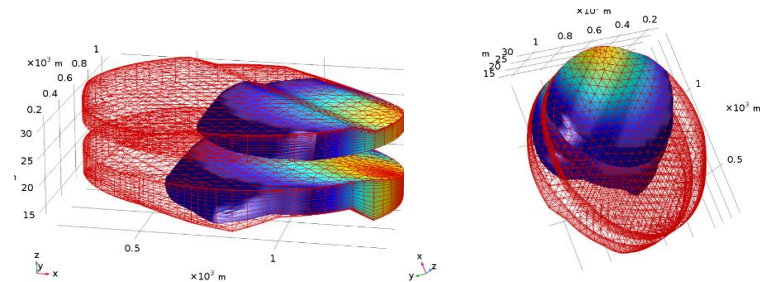


Fig. 9 : Modélisation des horizons gypseux après 60 ans pour de l'eau sous-saturée (à gauche) et après 70 ans pour de l'eau saturée à 20% (à droite) (source : Ineris)



# III CARACTÉRISATIONS (HYDRO)GÉOLOGIQUES

## • Création d'une base de données de sondages

- Intégration des données des L15 Est, L16, L17, de données d'archives du Cerema et de données de la BSS (BRGM)
- Interpolation du toit des formations géologiques (SO, SB, MC, CG) et calcul des épaisseurs du SO, SB et MC

Fig. 10 : Interpolation du toit du SO

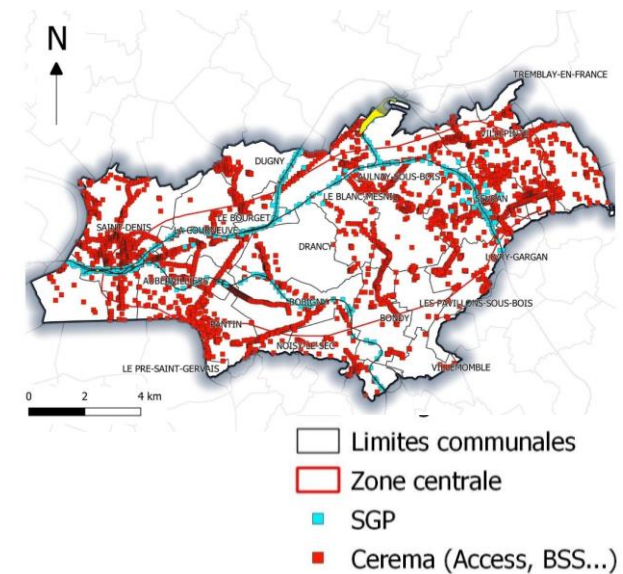
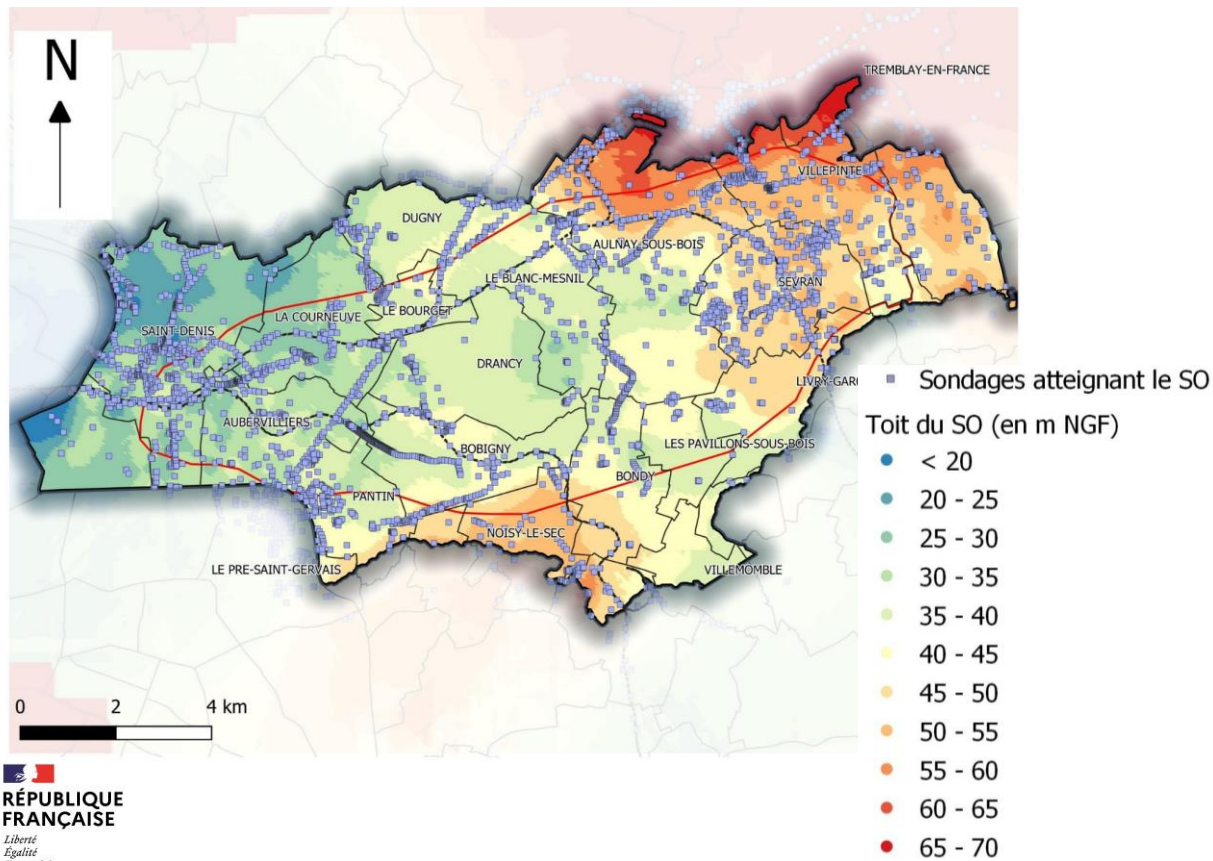


Fig. 11 : Implantation des sondages

# III CARACTÉRISATIONS (HYDRO)GÉOLOGIQUES

- Identification des zones de sur-épaisseurs des M&C, a priori siège des accumulations gypseuses.

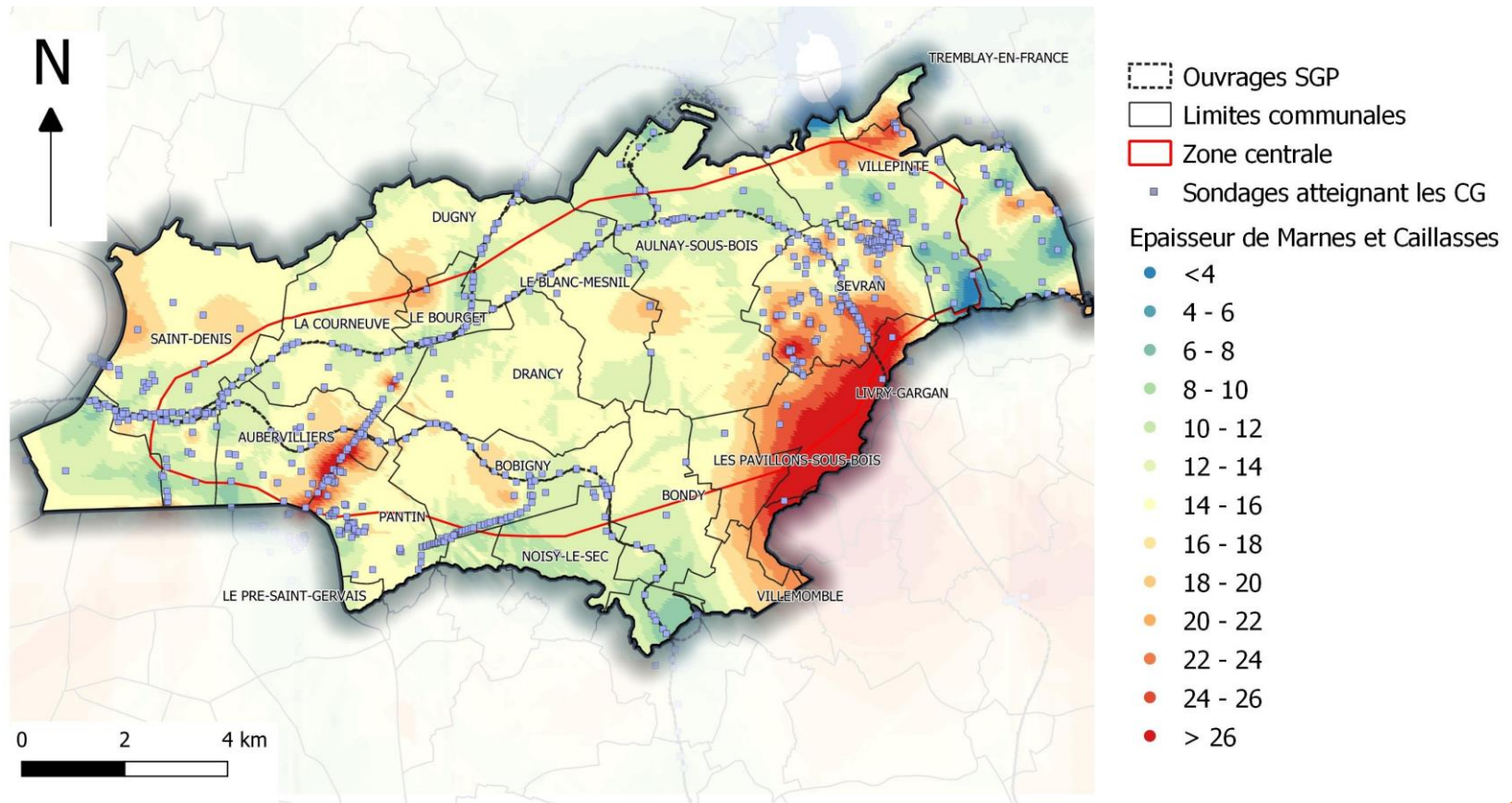


Fig. 12 : Carte d'épaisseur des Marnes-et-Caillasses

# III CARACTÉRISATIONS (HYDRO)GÉOLOGIQUES

- Cartographie des épaisseurs de gypse observé en sondage dans les MC (sources de données hétérogènes, estimations hautes et basses)

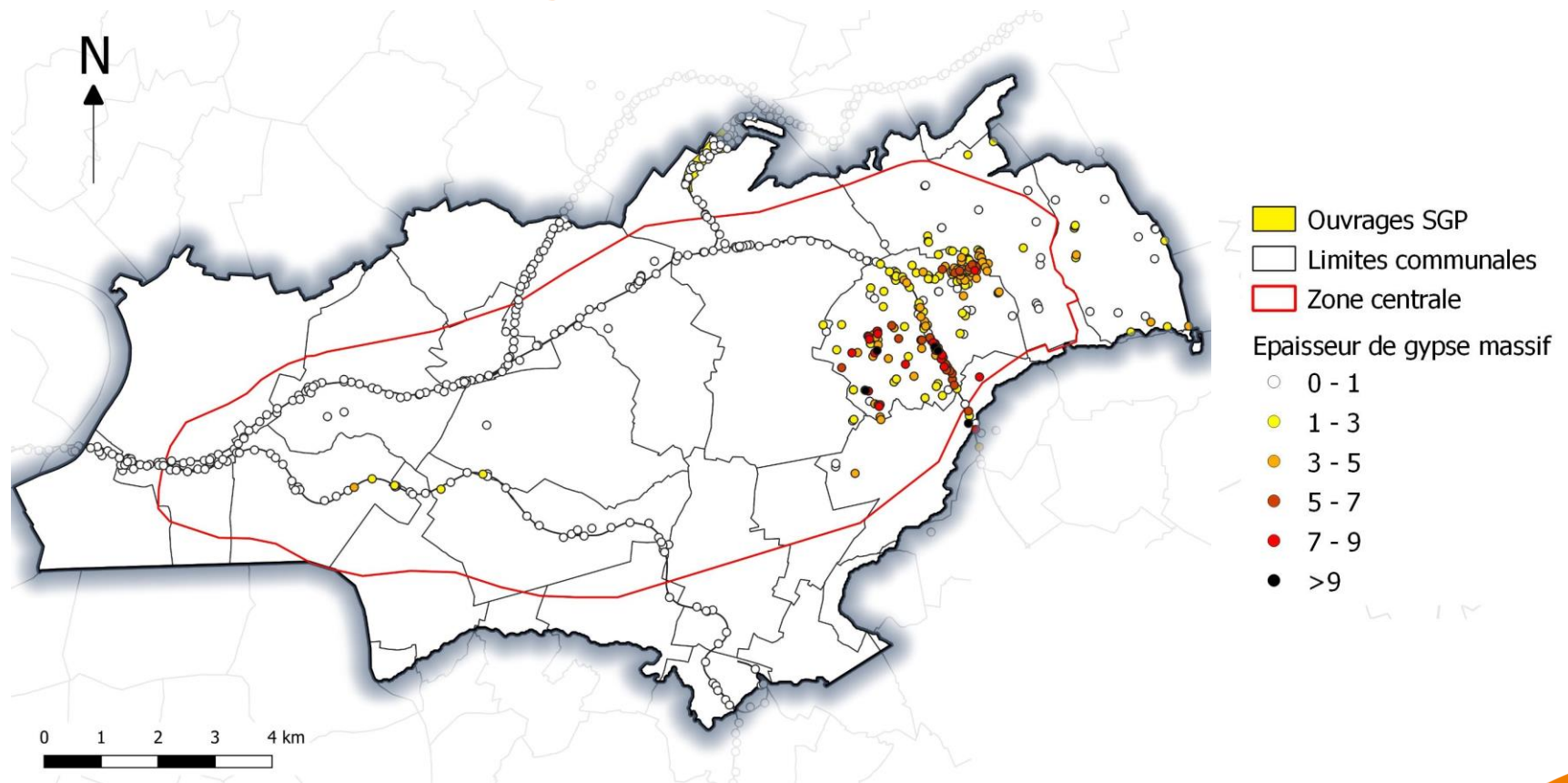
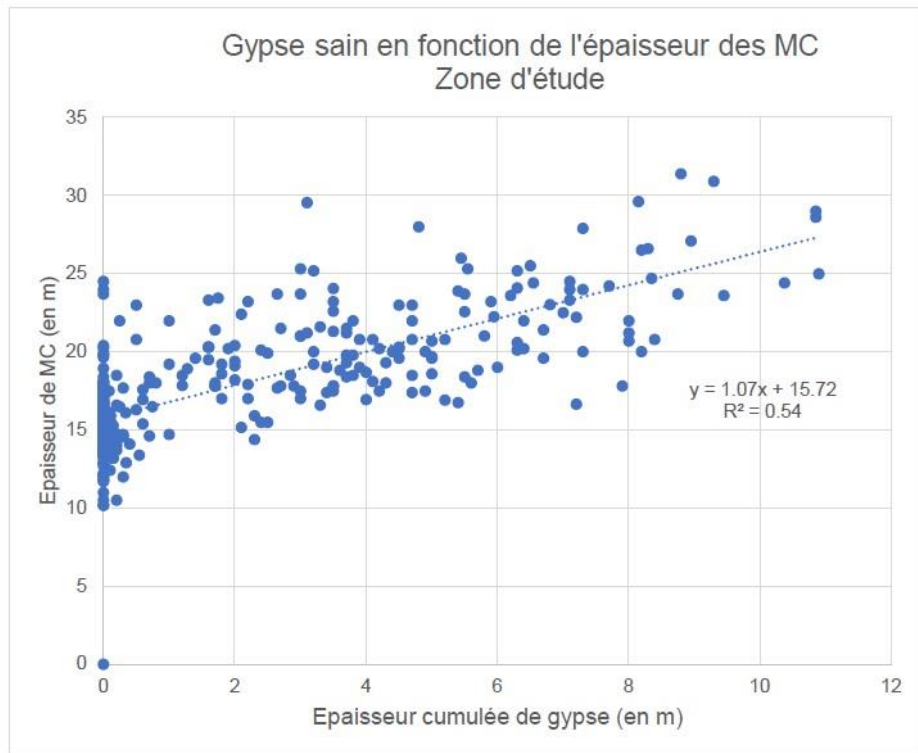


Fig. 13 : Carte des épaisseurs de gypse massif dans les MC (estimation basse)

# III CARACTÉRISATIONS (HYDRO)GÉOLOGIQUES

- Etude de la relation entre épaisseur de Marnes et Caillasses et épaisseur de gypse : épaisseurs de gypse massif significatives à partir de 15 m



- Relation cohérente avec la bibliographie, mais forte dispersion due à :
  - Incertitude sur interface exacte entre MC et CG
  - Difficulté pour quantifier précisément les épaisseurs cumulées de gypse
  - Difficulté pour prendre en compte les passes affectées par la dissolution du gypse

Fig. 14 : Relation entre épaisseur de gypse massif et épaisseur des Marnes et Caillasses

# III CARACTÉRISATIONS (HYDRO)GÉOLOGIQUES

## • Réalisation de cartes piézométriques

- Campagnes synchrones à l'échelle de la plaine de France
- Ecoulements Est Ouest en direction de la Seine, et influencés par les anciens cours d'eau

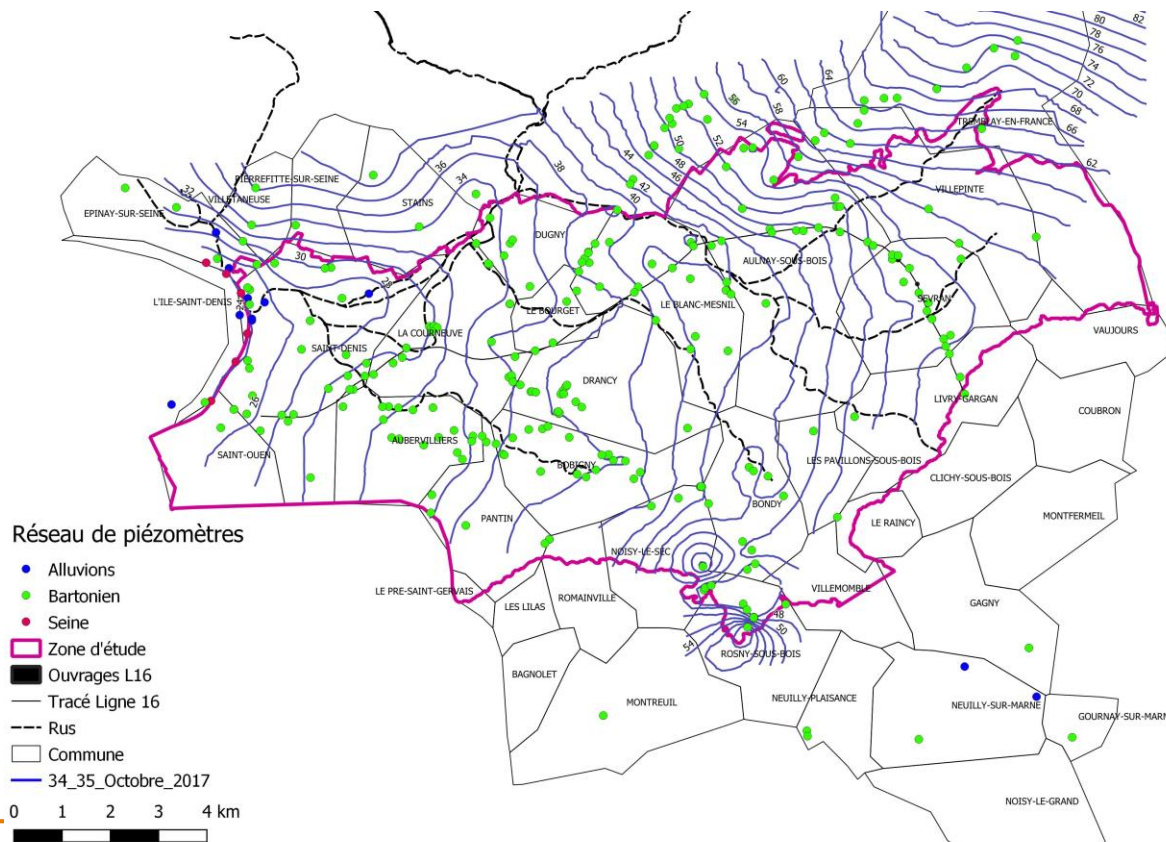


Fig. 15 : Carte piézométrique de la nappe du Saint-Ouen (octobre 2017)

# III CARACTÉRISATIONS (HYDRO)GÉOLOGIQUES

- **Suivi en continu des niveaux piézométriques et de la conductivité**
  - Réalisation d'un « plot d'essai » à Sevrans (doublets SO et MC)
  - Caractérisation des fluctuations piéométriques saisonnières et pluri-annuelles
  - Gradient hydraulique descendant (NE) ou ascendant (SO) selon les zones de la commune
  - Variation spatiale importante de la minéralisation (sulfates)

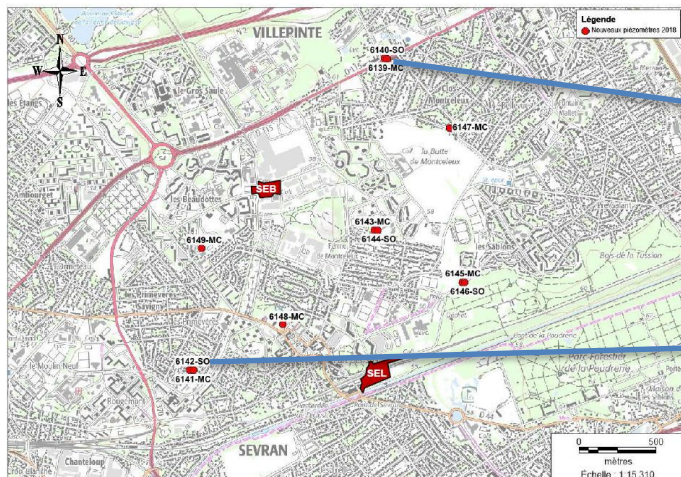


Fig. 16 : Position des piézomètres du plot d'essai

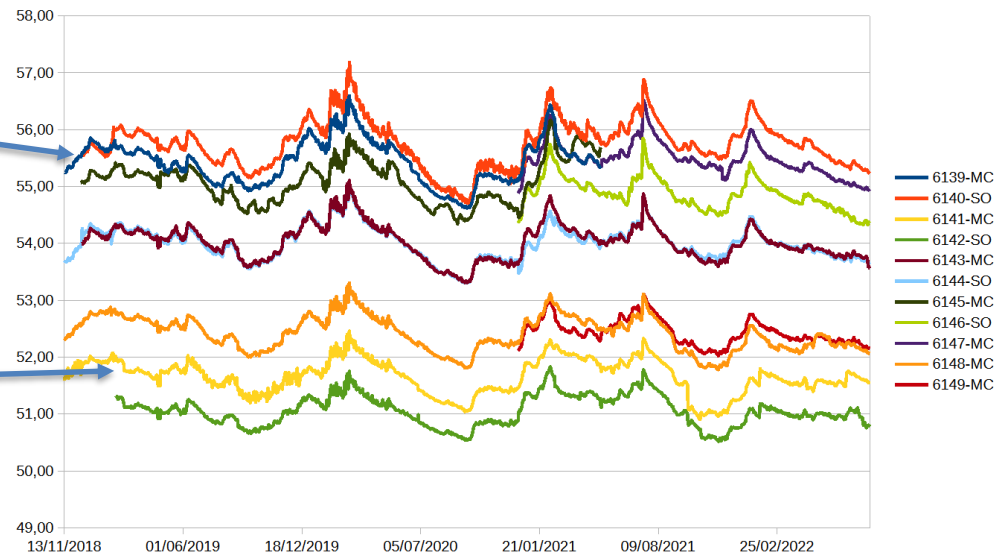


Fig. 17 : Chroniques piézométriques du plot d'essai (d'après Ineris)

# IV REX SUR DES POMPAGES ANCIENS

## Pompages de l'usine Kodak

- **Historique**

- Usine construite en 1924, et en activité jusqu'à 1995
- 5 puits de pompage, crépinés dans différentes nappes
- Capacité maximale de pompage de 500 m<sup>3</sup>/h en 1977
- Incertitude sur les volumes pompés, mais débit de pompage réel inférieur (probablement entre 100 et 200 m<sup>3</sup>/h dans les années 1970)



Fig. 18 : Photographie de l'usine Kodak (source : Wikipedia)

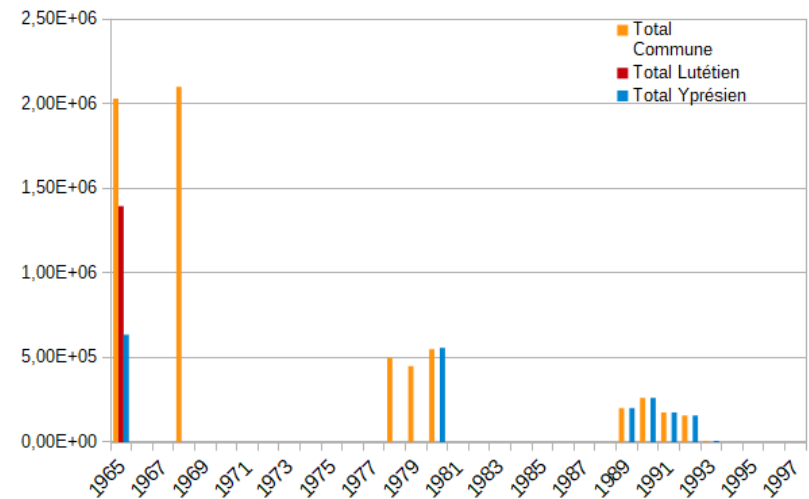


Fig. 19 : Evolution des prélèvements à Sevrans (source : Cerema)

# IV REX SUR DES POMPAGES ANCIENS

## Pompages de l'usine Kodak

### • Impact sur la nappe des MC

- Pour débit de 200 m<sup>3</sup>/h, rabattement de l'ordre de 4 m à proximité de l'usine, et 3 m à 500 m
- Existence de cycles journaliers et hebdomadaires, dûs à l'arrêt des pompages en dehors des heures de travail
- Concentrations en sulfates et calcium actuelles très différentes de celles de 1970

### → Avancée du front de dissolution provoquée par les pompages

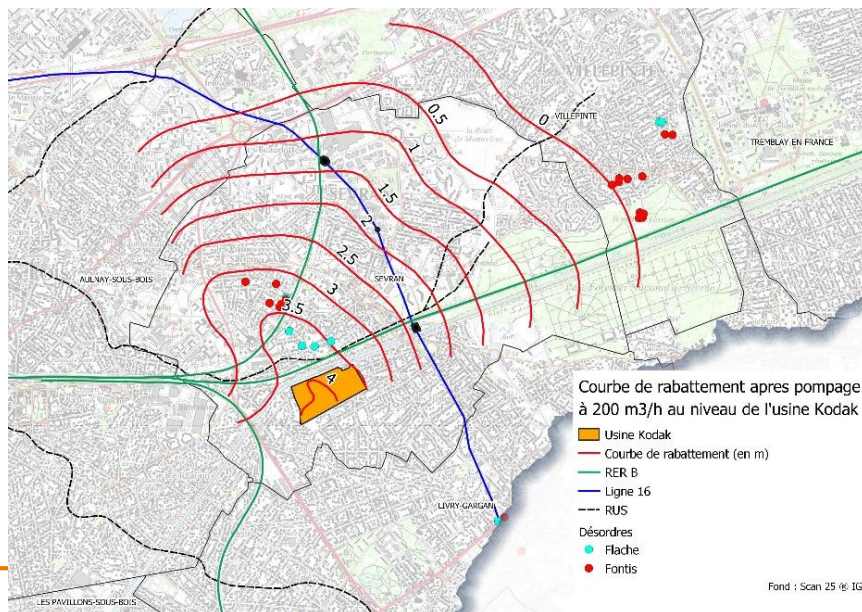


Fig. 20 : Courbes d'iso-rabattement après un pompage à 200 m<sup>3</sup>/h, et localisation de désordres (source : Cerema)

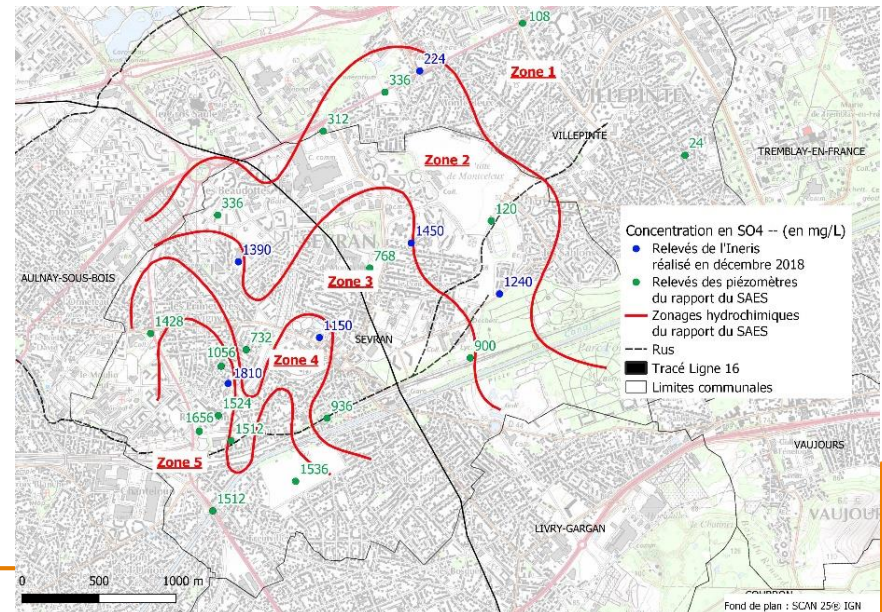


Fig. 21 : Comparaison des concentrations en sulfates en 1970 et en 2018 (source : Cerema et Ineris)



# IV REX SUR DES POMPAGES ANCIENS

## Pompages du RER B

### • Historique

- Tranchée couverte de 2600 m de long, dont la moitié en zone urbaine et l'autre moitié en zone non bâtie
- Délais réduits (12 mois)
- Rabattement de nappe effectué à l'aide de tranchées drainantes dans la nappe superficielle et de 41 puits crépinés dans le SO, alignés d'un côté de la fouille

### • Impact des premiers pompages

- Pompages extrêmement intenses (plus de 300 m<sup>3</sup>/h)
- Rabattement pouvant atteindre 14 m en début de travaux, suivi de l'apparition de plusieurs désordres
- Mise en place d'un dispositif de suivi piézométrique et adaptation du programme de pompage (débit de 350 m<sup>3</sup>/h pendant 6 mois)

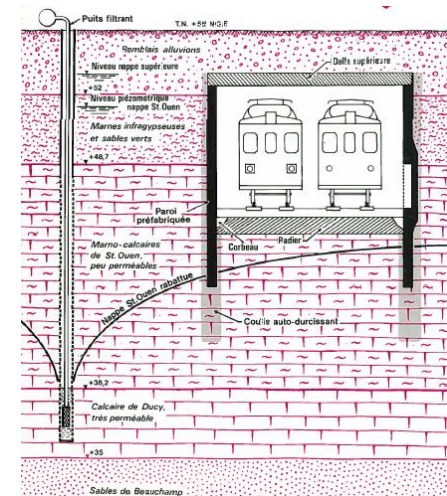
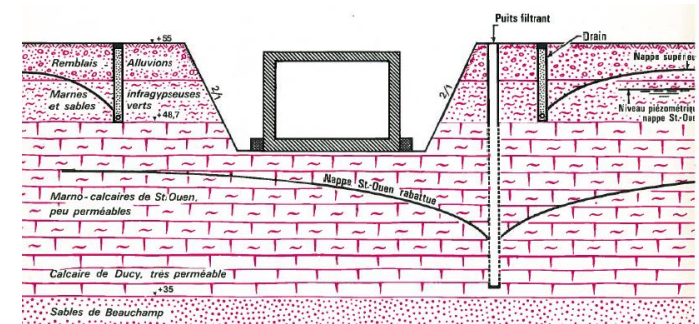


Fig. 22 : Profils de la tranchée couverte du RER B et dispositif de pompage (source : Inconnue)

# IV REX SUR DES POMPAGES ANCIENS

## Pompages du RER B

- Impact des pompages, après adaptation du dispositif
  - Rabattement de la nappe du SO de plus de 8 m à moins de 100 m de la tranchée et de plus de 5 m à 500 m de la tranchée
  - Rabattement de la nappe des MC de plus de 4 m à 200 m de la tranchée
- Désordres liés à la **réactivation d'anciennes zones de dissolution** par une **brutale variation des gradients**

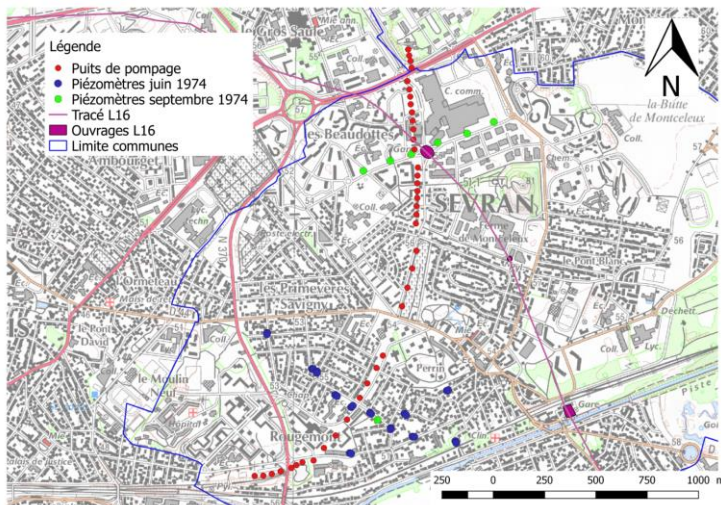


Fig. 23 : Emplacement des puits et piézomètres

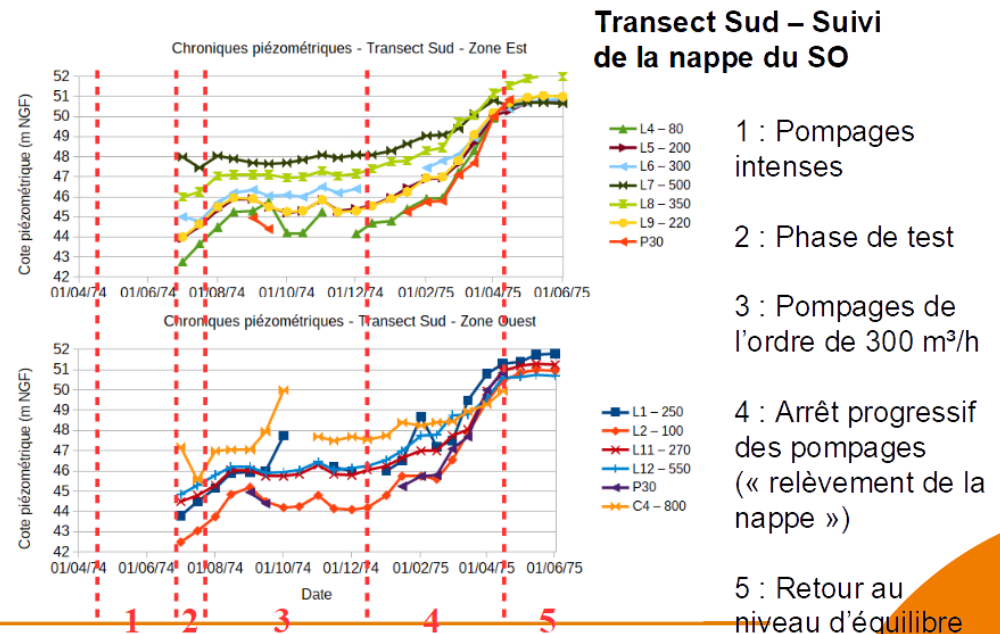


Fig. 24 : Chroniques piézométriques durant les différentes phases de pompages du RER B (Source : Cerema)

# V APPLICATION À LA LIGNE 16 DU GPE

## Adaptation des dispositions constructives des ouvrages - L16

### • Conception des ouvrages

- Gare de SEB : fond de fouille à 20,36 m NGF, avec PM ancrées dans les CG (5 m NGF) et prolongées par une jupe injectée (- 9,7 m NGF)
- Gare de SEL : fond de fouille à 30,5 m NGF, avec PM ancrées dans les MC (18,3 m NGF) et prolongées par une jupe injectée, ancrée de 5 m dans le CG)

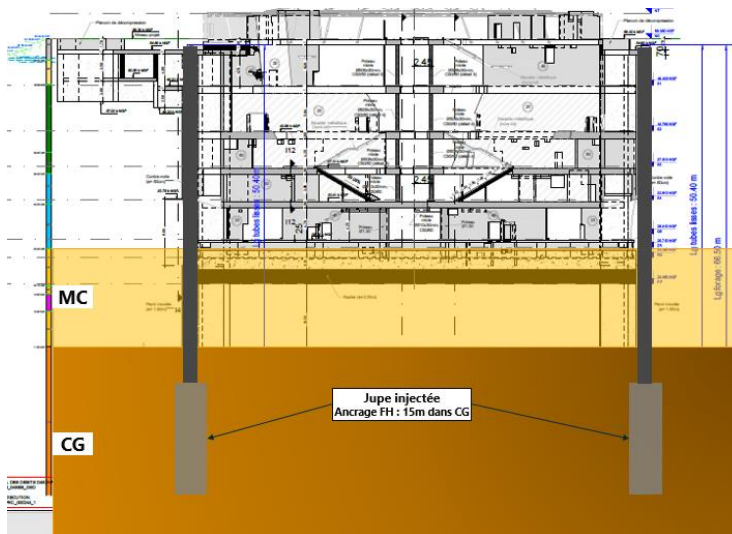


Fig. 25 : Vue en coupe de la gare de SEB (source : EGIS)

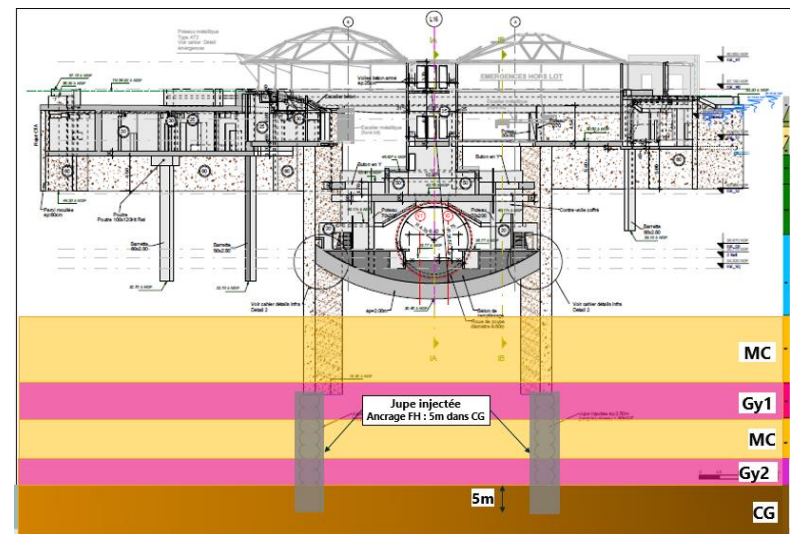


Fig. 26 : Vue en coupe de la gare de SEL (source : EGIS)

# V APPLICATION À LA LIGNE 16 DU GPE

## Adaptation des dispositions constructives des ouvrages - L16

- **Dispositif de pompage**
  - Puits de pompages situés dans l'enceinte de la gare et ancrés plusieurs mètres sous le fond de fouille
  - Nombre et répartition des puits dépend de la géométrie de la « boîte » et de la profondeur des puits
  - Profondeur des puits de la gare de SEL arrêtée au-dessus du premier banc de gypse pour limiter les débits pompés
  - Phasage des pompages dans les différents ouvrages défini de manière à limiter les débits cumulés à l'échelle de Sevrans

**Ces dispositions ont permis de limiter les débits effectivement pompés, en particulier au niveau des boîtes profondes (débit inférieur à 10 m<sup>3</sup>/h au niveau de la gare de SEL, et de l'ordre de 25 m<sup>3</sup>/h à SEB)**



Fig. 27 : Vue en coupe de la gare de SEB (source : EGIS)

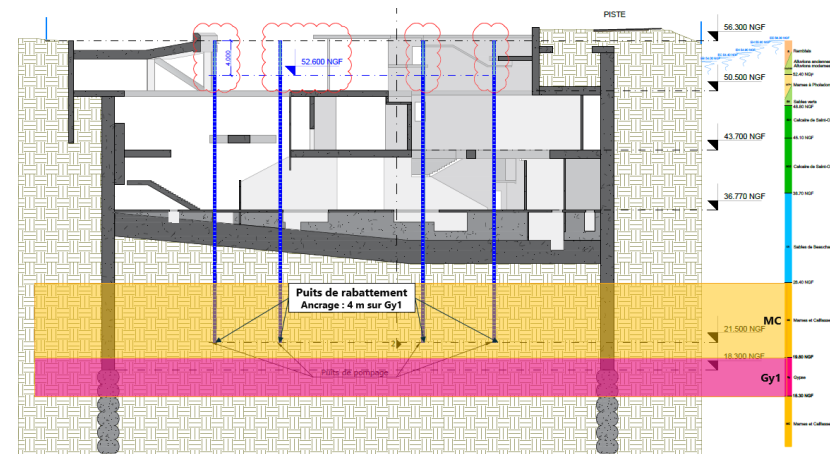


Fig. 28 : Vue en coupe de la gare de SEL (source : EGIS)

# V APPLICATION À LA LIGNE 16 DU GPE

## Dispositif de suivi en phase Exécution

- **Suivi piézométrique en phase EXE (entreprise)**
  - Etablissement d'une procédure de gestion du risque dissolution du gypse
  - Renforcement du réseau de suivi sur un rayon d'environ 150 m autour des gares et équipement de certains piézomètres en sondes autonomes
  - Suivi des « marqueurs gypse » (conductivité, sulfates, calcium) dans des piézomètres crépinés dans différentes nappes et dans les eaux d'exhaure
- **Suivi complémentaire (projet recherche)**
  - Instrumentation des piézomètres du « plot » d'essai avec des sondes de conductivité, et réalisation 3 de campagnes de prélèvements d'eau
  - Campagnes de relevés piézométriques mensuelles dans l'ensemble des piézomètres répertoriés sur la commune de Sevrans

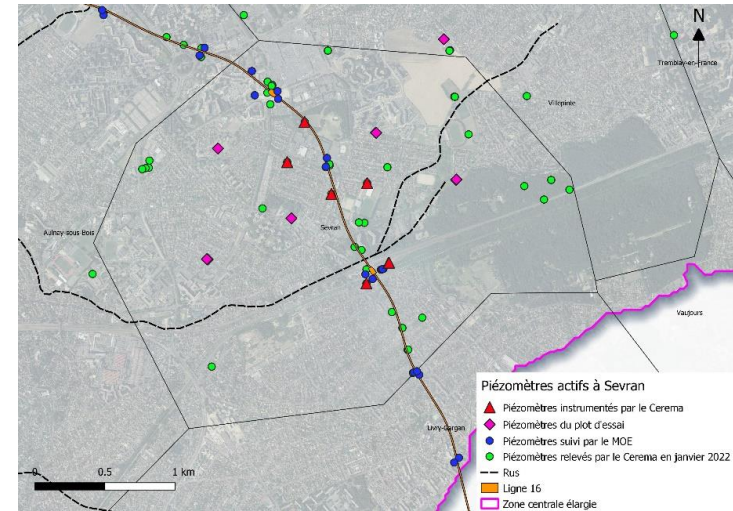


Fig. 29 : Réseau de suivi piézométrique à Sevrans (source : Cerema)

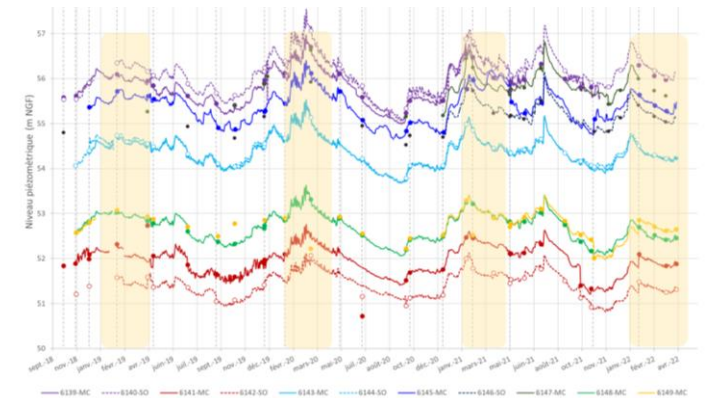


Fig. 30 : Chroniques piézométriques dans les piézomètres du plot d'essai (source : Ineris)

# V APPLICATION À LA LIGNE 16 DU GPE

## Dispositif de suivi en phase Exécution

- Définition de valeurs seuil pour les « marqueurs gypse »
  - Extrapolation des essais de laboratoire et de modélisation des interactions eau/roche à l'échelle du plot d'essai
  - Détermination des indices de récession in situ à partir des indices de saturation pour le gypse albaströide impur (cas défavorable)

$\tau_r \geq 8 \text{ cm/an}$   $\Rightarrow$  Désordre en moins d'1/2 siècle

$\rightarrow$   $IS \leq -0,43$

- Définition de seuils de conductivité et de concentration en sulfates

**Alerte** conductivité électrique : 1,5 mS/cm

$[\text{SO}_4^{2-}] = 900 \text{ mg/L } (\pm 100 \text{ mg/L})$

**Vigilance** conductivité électrique : 2 mS/cm

$[\text{SO}_4^{2-}] = 1300 \text{ mg/L } (\pm 100 \text{ mg/L})$

$\Rightarrow \tau_r = 5 \text{ cm/an}$

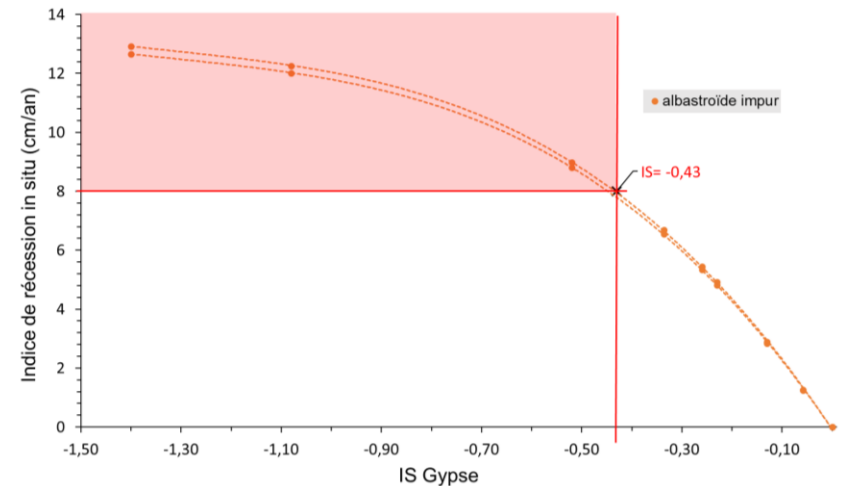


Fig. 31 : Evolution de l'indice de récession in situ en fonction de l'état de saturation du système (source : Ineris)

# VI CONCLUSION

Le chantier du Grand Paris Express a donné accès à une grande quantité de données qui a permis d'améliorer notre connaissance du fonctionnement des systèmes de dissolution du nord-est de l'Île de France :

- Les travaux de laboratoire ont permis de caractériser les phénomènes de dissolution de manière précise ainsi que d'identifier les paramètres pétro-physiques qui les influencent ;
- Dans le contexte étudié, les processus de dissolution naturels restent modérés sans sollicitation anthropique excessive de l'aquifère ;
- Les différents REX ont permis de mettre en évidence le rôle prépondérant des sollicitations anthropiques dans l'aggravation de processus de dissolution ;
- Les travaux de laboratoire, de modélisation et les investigations in situ ont permis d'avancer dans la quantification des mécanismes et de proposer des indices, des valeurs et des méthodologies permettant de contrôler les impacts du chantier en phase de réalisation ;
- D'une manière plus générale les travaux réalisés à l'occasion de ce projet ont permis une meilleure appréhension de l'intensité des phénomènes de dissolution naturelle du gypse et des facteurs qui peuvent conduire à leur aggravation et ainsi entraîner la mise en place de désordres.

## MERCI DE VOTRE PARTICIPATION

Contact : [emmanuel.dumont@cerema.fr](mailto:emmanuel.dumont@cerema.fr)