Faisabilité de l'infiltration des eaux pluviales en zone d'aléa dissolution du gypse - cas de l'Ecoquartier de la Gare à Pantin

Feasibility of stormwater infiltration in area with gypsum dissolution hazards : case study of the « Ecoquartier de la Gare » in Pantin (France)

Emmanuel DUMONT[1], Philippe BRANCHU[1], Jérémie SAGE[1]
[1] Cerema Ile-de-France, Trappes, France

RÉSUMÉ –La faisabilité de l'infiltration des eaux pluviales vis-à-vis du risque de dissolution du gypse a été étudiée dans le cadre du projet d'Ecoquartier de la Gare à Pantin. Les travaux ont consisté à quantifier le gypse réellement présent, caractériser le fonctionnement hydrogéologique de la zone et modéliser l'impact des aménagements futurs sur la recharge, en vue d'optimiser les dispositifs de gestion des eaux pluviales.

ABSTRACT – Feasabiliy of stormwater infiltration with regard to gypsum dissolution hazards has been studied for a future ecodistrict near Paris. The program has consisted in assessing the presence of gypsum, characterizing the site hydrogeology and modelling the impact of urban planning on recharge. The modelling results can be used to optimize the infiltration system design in order to reduce the impact on groundwater geochemistry.

1. Introduction

Le risque de dissolution du gypse constitue dans de nombreuses zones d'Île-de-France un obstacle à l'infiltration des eaux pluviales, alors que l'incidence réelle de ce mode de gestion reste mal caractérisée. La gestion des eaux pluviales à la source, notamment par infiltration, constitue pourtant un enjeu important pour les collectivités afin de contribuer à la réduction des pressions sur les milieux aquatiques et des risques d'inondation.

L'Etablissement Public Territorial Est Ensemble et le Cerema ont signé une convention de partenariat de recherche et d'échanges de données, subventionnée par l'Agence de l'Eau Seine Normandie. Son objectif est d'étudier la faisabilité d'une politique d'infiltration des eaux pluviales urbaines dans des contextes hydrogéologiques sensibles, en particulier vis-à-vis du risque de dissolution du gypse, avec comme cas d'étude le projet d'aménagement de la ZAC Écoquartier de la gare à Pantin.

Pour atteindre cet objectif, une caractérisation fine de la géologie ainsi que des fonctionnements hydrogéologiques et géochimiques du site a dans un premier temps été effectuée. Les données recueillies ont par la suite été utilisées pour des travaux de modélisation numérique, visant à étudier les impacts du projet d'aménagement sur la recharge (simulation des écoulements dans la zone non-saturée). Deux scénarios d'aménagement, l'un basé sur une infiltration diffuse et l'autre sur une infiltration concentrée, ont ainsi pu être comparés à la situation actuelle, avant aménagement.

2. Contexte

2.1. Le projet d'écoquartier de la gare à Pantin

L'« Écoquartier de la gare » à Pantin (93) est une zone d'aménagement de 45 ha aux portes de Paris. L'objectif visé initialement pour la gestion des eaux pluviales sur la ZAC

était le « zéro rejet », c'est-à-dire la gestion à la source de la totalité des eaux pluviales, en priorité par infiltration volontaire. Il était ainsi prévu de rediriger les eaux pluviales des espaces publics et des espaces privés (sur lesquels une gestion des pluies courantes est également effectuée) vers un bassin d'infiltration situé dans un espace vert au centre de la ZAC (Figure 1). Les premières études opérationnelles ont toutefois montré que le site du projet était susceptible d'être concerné par des risques de dissolution du gypse, remettant en cause le principe de l'infiltration.

Figure 1 : Plan guide de l' « Ecoquartier de la gare » à Pantin (Source : TGT-FP 2019)

2.2. Contexte géologique et hydrogéologique

La commune de Pantin est située sur le versant Nord de la Butte de Romainville, butte témoin de l'Oligocène qui culmine à environ 127 m NGF. Le territoire communal, compris entre 112 et 41 m NGF se décompose en deux zones bien distinctes : le versant, dans lesquelles les Masses-et-Marnes du Gypse (Ludien) ont été exploitées, et la plaine. Dans la plaine, où se situe la zone d'étude, les Masses-et-Marnes du Gypse ont été érodées, et seul subsiste un reliquat de cette formation, appelé Marnes Infragypseuses, sous une importante épaisseur de remblais. Le log stratigraphique au droit du site est représenté sur la Figure 2 au côté d'un extrait de la carte géologique de Paris. Parmi les formations géologiques présentes au droit du site, trois d'entre elles sont susceptibles de contenir du gypse : Les Marnes Infragypseuses, le Marno-Calcaire de Saint-Ouen (Bartonien) et les Marnes et Caillasses (Lutétien).

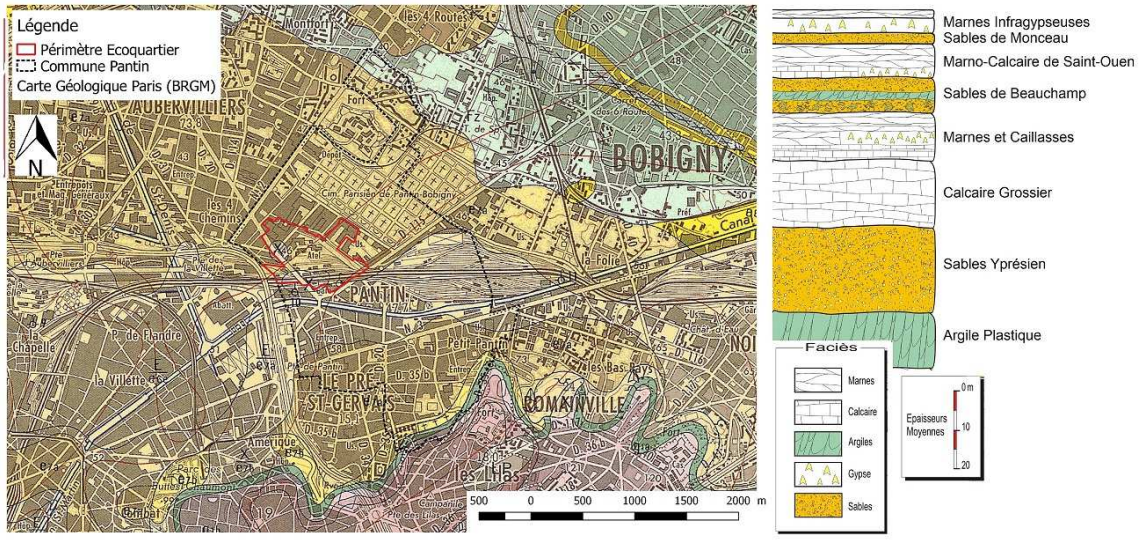


Figure 2 : Localisation du site (en rouge) sur fond de carte géologique (Feuille de Paris, BRGM) à gauche. Log stratigraphique au droit du site à droite (d'après Fouché et al., 2007)

D'un point de vue hydrogéologique, la zone d'étude se caractérise par la présence d'un aquifère multicouche baignant les formations de l'Eocène. La première nappe rencontrée est la nappe du Calcaire de Saint-Ouen, qui est séparée de la nappe sous-jacente des Calcaires Lutétiens par une couche peu perméable située dans la partie médiane des Sables de Beauchamp.

3. Caractérisation géologique, hydrogéologique et géochimique du site

3.1. Caractérisation géologique

Afin de quantifier plus précisément le gypse réellement présent au sein des différentes formations, un modèle géologique a été créé à partir des sondages bibliographiques issus des archives du Cerema, de la Banque de Données du Sous-Sol (BRGM) et des archives d'Est Ensemble. Une campagne de reconnaissances hydrogéologiques dédiées a par ailleurs été commanditée par Est Ensemble. Cette campagne comprenait 11 sondages équipés en piézomètres (8 sondages destructifs et 3 sondages carottés). Hormis un sondage profond atteignant le toit du Calcaire Grossier, les sondages ont été arrêtés au niveau du toit des Sables de Beauchamp.
Les sondages étant de profondeur et qualité variables, une vérification approfondie de ces sondages a été menée afin de ne conserver que les sondages les plus fiables, c'est-à-dire majoritairement les sondages carottés ainsi que les sondages destructifs accompagnés de mesures de radioactivité naturelle (diagraphie gamma-ray). Des interpolations du toit des formations géologiques ont été réalisées à l'aide du logiciel GDM (BRGM) afin de dresser des cartes d'isopaques des formations du Marno-Calcaire de Saint-Ouen et des Marnes-et-Caillasses (Figure 3). Les travaux de recherche antérieurs (Toulemont, 1986, Thierry et al. 2009) ont en effet permis d'établir une relation empirique entre épaisseur des Marnes-et-Caillasses et présence de gypse. Selon cette relation, la probabilité que du gypse soit présent commence à être significative lorsque l'épaisseur des Marnes-et-Caillasses est supérieure à 15 m, et l'épaisseur potentielle de gypse est ensuite proportionnelle à la surépaisseur de Marnes-et-Caillasses.

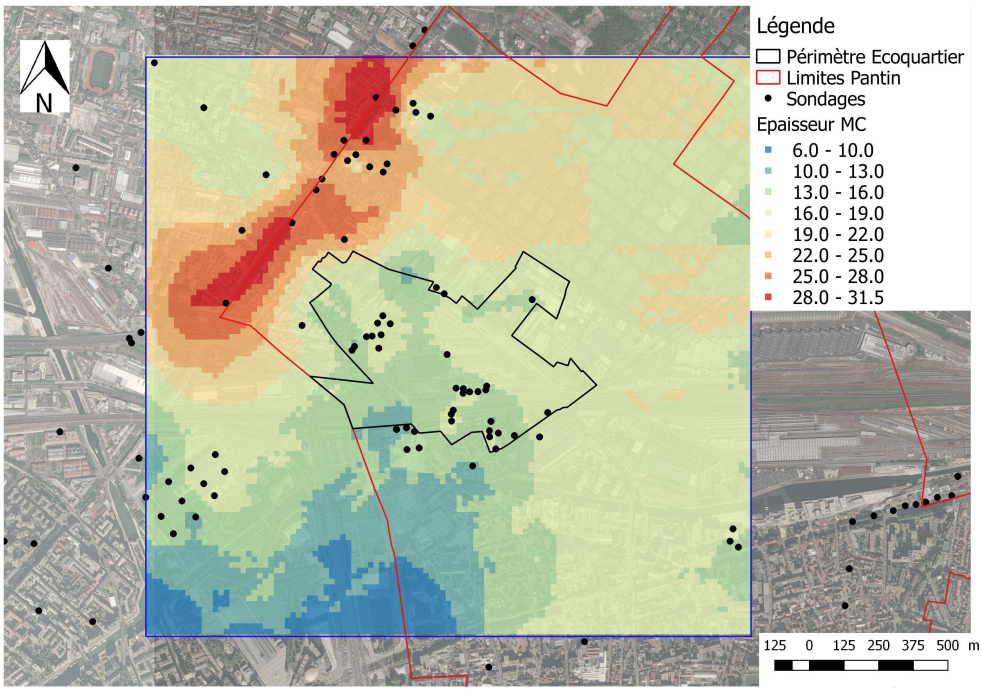


Figure 3 : Carte d'épaisseur des Marnes-et-Caillasses (interpolations réalisés par krigeage réalisées avec le logiciel GDM2014 du BRGM)

L'analyse de l'ensemble des données de sondage ainsi que les interpolations ont permis de confirmer la présence de gypse dans les Marnes-et-Caillasses. Les épaisseurs cumulées de gypse massif ne dépassent pas 2 m au droit du futur écoquartier, mais elles sont bien plus importantes à l'aval dans la zone de surépaisseur des Marnes et Caillasses (épaisseur cumulée de gypse pouvant atteindre 10 m). Le gypse étant présent sous forme lenticulaire, il n'est toutefois pas systématiquement reconnu dans cette formation. Des anomalies de vitesse ont par ailleurs été fréquemment observées à la base du Calcaire de Saint-Ouen et dans les Marnes-et-Caillasses. En revanche, bien que des sondages mentionnent la présence de gypse dans les Marnes Infragypseuses et dans le Calcaire de Saint-Ouen, le Cerema n'a pas obtenu d'éléments probants attestant la présence de gypse en quantité significative dans ces deux formations. Il semble ainsi que le Calcaire de Saint-Ouen ait pu contenir du gypse (notamment à la base), mais qu'il n'en reste plus, ou alors en très faible quantité. La présence de gypse signalée dans le Calcaire de Saint-Ouen résulte généralement d'erreurs d'interprétation des mesures de radioactivité naturelle.

3.2. Caractérisation du fonctionnement hydrogéologique

Quatre piézomètres crépinés dans la nappe du Saint-Ouen entourent la ZAC et les cinq autres piézomètres (1 captant la nappe des Marnes-et-Caillasses (P10) et 5 captant la nappe du Saint-Ouen, dont 1 crépiné uniquement dans la partie supérieure marneuse du Saint-Ouen (P7)) se concentrent dans la zone centrale, au niveau du futur bassin, où un essai de pompage a été réalisé dans la nappe du Saint-Ouen. Ces neuf piézomètres ont été équipés de sondes automatiques permettant de suivre en continu les niveaux d'eau et la conductivité. Les fluctuations piézométriques sont très homogènes dans l'ensemble des piézomètres captant la nappe du Saint-Ouen, avec un battement de l'ordre de 1,3 m et une profondeur moyenne variant entre 6,5 et 13,5 m selon les piézomètres (Figure 4a). Cette nappe s'écoule du Sud Est vers le Nord Ouest selon un gradient de l'ordre de 4‰ (Figure 4b). La comparaison des niveaux de la nappe du Saint-Ouen et de la nappe des Marnes-et-Caillasses dans un doublet de piézomètre (respectivement P6 et P10, distants de 2 mètres) montre qu'il existe une différence de charge entre ces deux nappes de l'ordre de 0,5 mètres (gradient hydraulique descendant).

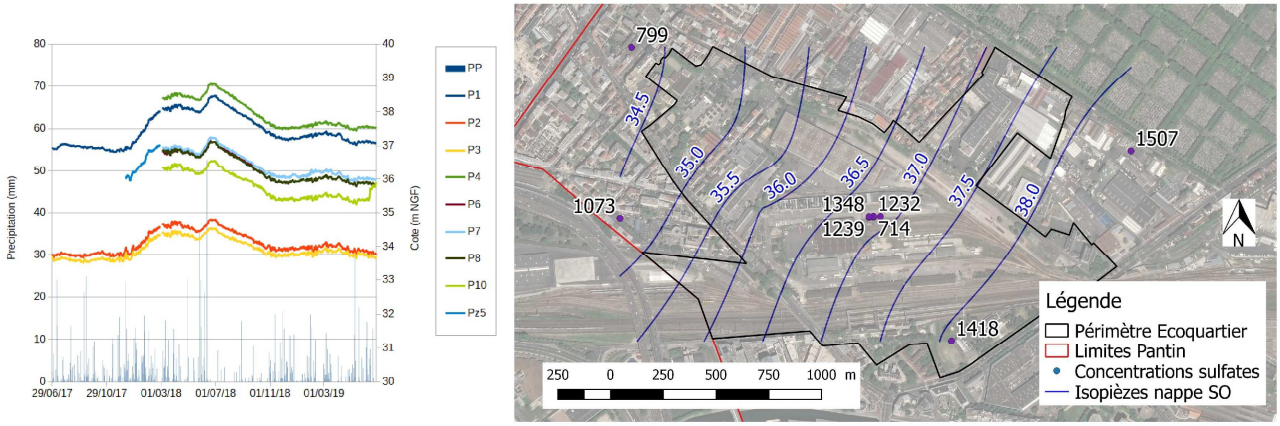


Figure 4 : 4a) Fluctuation des cotes piézométrique (m NGF) et précipitations journalières (Source : https://www.infoclimat.fr/) ; 4b) Carte piézométrique établie à partir des relevés d'avril 2018 et concentrations en sulfates (mg/L) mesurées lors de cette campagne

3.3. Caractérisation géochimique

Les caractérisations géochimiques réalisées sur la zone d'étude ont porté sur les eaux souterraines, les eaux d'infiltration percolant dans les remblais non saturés et l'étude des remblais.

Neuf piézomètres ont fait l'objet de prélèvements entre le 1er juin 2017 et le 21 janvier 2020. Ces piézomètres sont répartis suivant un axe amont-aval d'écoulement des eaux souterraines, avec, en zone centrale, des piézomètres crépinés à différentes profondeurs. Les analyses ont permis de caractériser le faciès hyper sulfaté calcique de ces eaux. Les piézomètres se différencient selon un gradient de concentrations en sulfate et en calcium diminuant de l'amont à l'aval selon une droite de dilution partant d'un pôle sur-saturé vis à vis du gypse (Figures 4b et 5). La sous-saturation de l'eau vis à vis du gypse n'est caractérisée que dans le piézomètre captant la partie supérieure marneuse du Saint-Ouen (P7), qui présente les concentrations les plus faibles. La distribution des concentrations en nitrates évolue quant à elle en sens opposé à celle des sulfates. Au gradient de diminution des concentrations en sulfate vers l'aval est ainsi associé un gradient d'augmentation des concentrations en nitrates suggérant un apport d'eau ayant une origine différente, une origine anthropique. Ce pôle anthropique permettrait ainsi une dilution de l'ordre de 50% des eaux entre l'amont et l'aval. Le suivi temporel met quant à lui en évidence des phénomènes de recharge différents entre les Marnes et Caillasses et le St Ouen qui est caractérisé par une variabilité physico-chimique plus importante.

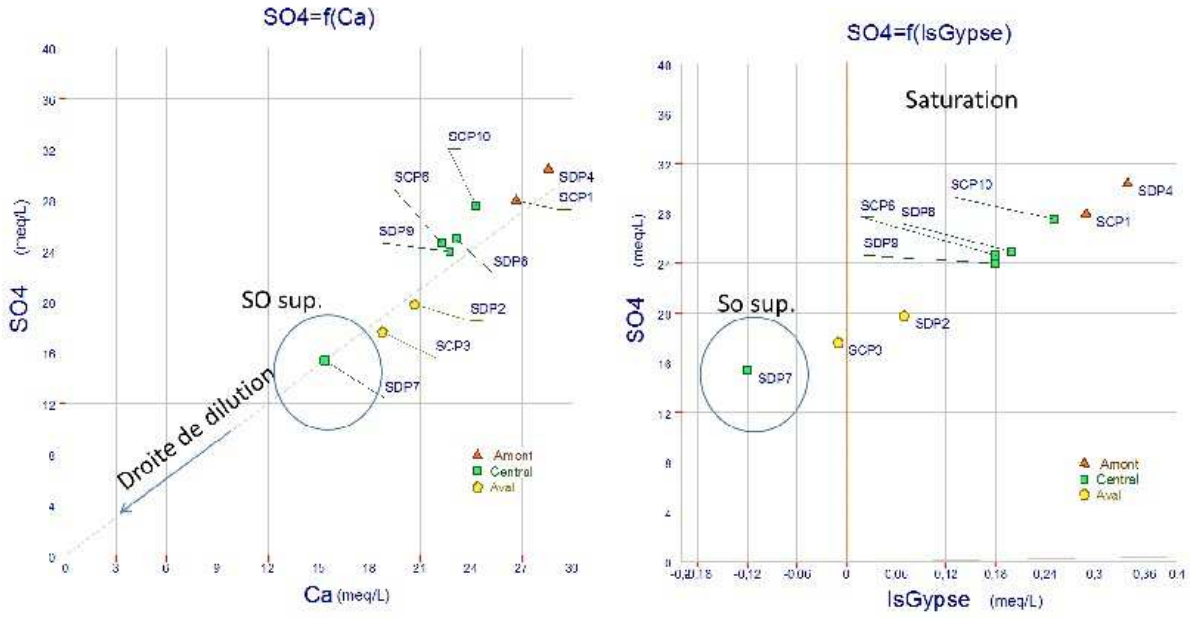


Figure 5 : Distribution des concentrations en sulfates en meq/L dans les différents piézométres en fonction de la concentration en calcium (à gauche) et de l'indice de saturation du gypse (à droite). Les figurés représentent les concentrations moyennes calculées sur la période de mesure. La mention MC réfère au piézomètre des Marnes et Caillasses.

Dans le même temps, les eaux percolant gravitairement dans un profil de sol constitué de remblais ont été échantillonnés d'avril 2019 à février 2020 par quatre plaques poreuses en nylon installées par paire à 0,5 et 1,3 m de profondeur. Ces prélèvements sont réalisés à proximité d'un des piézomètres situés en amont de la zone. Ce suivi met en avant une forte minéralisation des eaux du profil avec un gradient selon la profondeur. Les eaux à 1,3 m présentent une concentration en sulfates comprise entre 1200 et 1400 mg/L, proche de celle de la nappe, dont le niveau se situe à 12 m de profondeur. Ce comportement est à relier à la présence d'une fraction importante de sulfates lixiviables dans les remblais (valeur médiane de 13 450 mg/kg) dont l'épaisseur peut atteindre 6 m d'épaisseur. La présence de ces remblais et la minéralisation, lors leur traversée, de l'eau

d'infiltration par les sulfates mais également par les nitrates, semble ainsi s'opposer à la dilution des eaux de la nappe par un pôle anthropique.

4. Modélisation de la recharge

4.1. Approche de modélisation

L'incidence de l'aménagement sur la recharge est évaluée à partir d'un modèle hydrologique dédié permettant de simuler les transferts hydriques (infiltration et évapotranspiration) depuis l'interface sol-atmosphère jusqu'à la zone saturée (ZS). Les simulations sont effectuées en distinguant différents profils d'occupation du sol : voiries, bâti, surfaces naturelles, voies SNCF et ouvrages d'infiltration. Chaque profil est décrit comme la combinaison d'un réservoir de surface et d'un compartiment correspondant à la zone non-saturée (ZNS).

La paramétrisation des réservoirs de surface, hors ouvrages d'infiltration est analogue à celle du modèle URBS (Rodriguez et al. 2008). La description des ouvrages d'infiltration est basée sur les travaux de Sage et al. (2016). Pour la ZNS, une modélisation unidimensionnelle des écoulements dans la zone non-saturée (ZNS) est adoptée en s'appuyant sur une solution approchée de l'équation de Richards développée par le Cerema et adaptée des travaux de Milly (1986). La ZNS est décrite comme un milieu homogène. Bien que constituant une hypothèse forte, ce choix peut être justifié par la méconnaissance du sous-sol et plus encore des caractéristiques hydrodynamiques des différentes formations. La modélisation de la ZNS est découplée de celle de la ZS ; une épaisseur représentative de la ZNS fixée à 12 m est ainsi considérée (sans tenir compte de l'effet des mouvements de la nappe sur la recharge). La recharge est alors estimée comme le flux simulé en limite inférieure du domaine.

La zone d'étude est discrétisée selon un maillage régulier (unités de 20×20 m, pour un domaine de modélisation de 1000×740 m incluant la ZAC). Pour chaque unité spatiale, les surfaces correspondant aux différents profils d'occupation des sols sont spécifiées à partir de données SIG (sources vectorielles et photo-interprétation) pour l'état initial. Pour l'état aménagé, différents scénarios d'aménagement et de gestion des eaux sont analysés. Les résultats présentés dans la suite correspondent à l'hypothèse d'une gestion diffuse des eaux pluviales : rétention à la source via des toitures stockantes se rejetant dans des ouvrages perméables pour les lots privées (en faisant l'hypothèse d'un ratio de pleine terre de 1:10 sur chaque lot) ; système de noues d'infiltration gérant les volumes produits sur l'espace public et convergeant vers un ouvrage central. L'occupation des sols pour l'état initial et l'état aménagé est présentée en Figure 6.

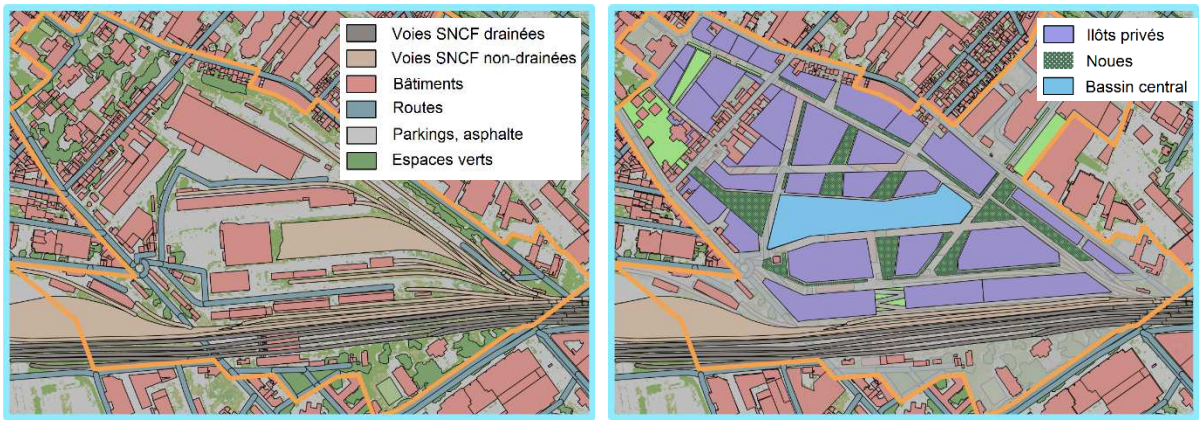


Figure 6 : Comparaison de l'occupation des sols entre l'état initial (à gauche) et l'état aménagé pour le scénario de gestion diffuse des eaux pluviales (à droite)

Les simulations sont effectuées à pas de temps variable (inférieur à 5min) sur une période de simulation de 15 ans, en utilisant des données de précipitations et d'évapotranspiration représentatives du climat de la petite couronne francilienne. Afin de tenir compte de l'incertitude quant aux caractéristiques du sous-sol, deux valeurs contrastées de la perméabilité K_S du sol dans la ZNS (2×10^{-6} m/s et 2×10^{-5} m/s) sont systématiquement considérées pour l'estimation de la recharge.

4.2. Incidence de l'aménagement

Une première comparaison des niveaux de recharge simulés à l'échelle de la zone d'étude avant et après aménagement est présentée dans la Figure 7.

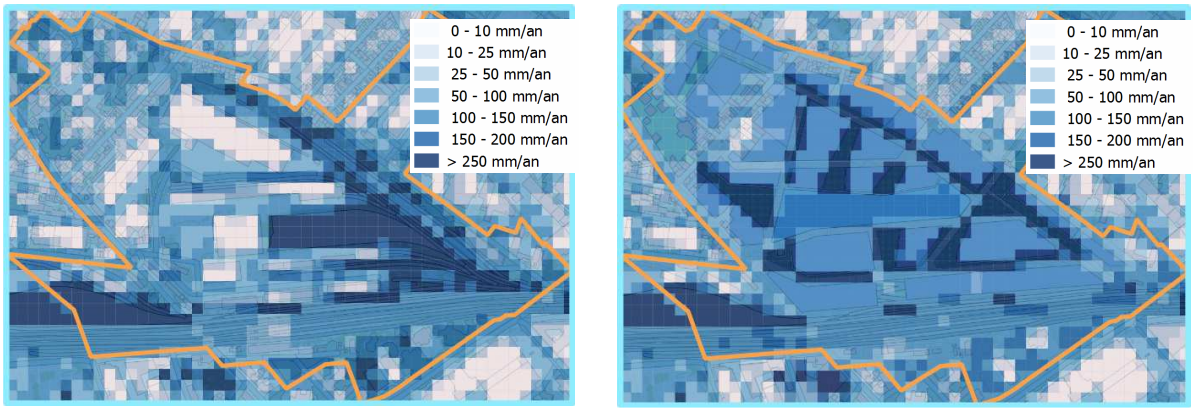
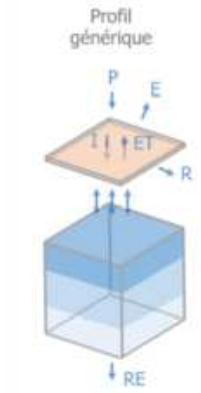


Figure 7 : Comparaison entre les niveaux de recharge simulés pour l'état initial (à gauche) et l'état aménagé (à droite) (sous l'hypothèse $K_S = 2\times10^{-5}$ m/s)

De façon prévisible, la distribution de la recharge est significativement modifiée suite à l'aménagement. Alors que celle-ci se concentre sur les voies SNCF à l'état initial, elle s'effectue de façon prédominante au niveau des ouvrages de gestion des eaux pluviales à l'état aménagé. Bien que les niveaux de recharge simulés puissent être localement très élevés sur les noues de l'espace publics (400 à 2000 mm/an), leur contribution à la recharge à l'échelle de la zone d'étude s'avère équivalente à celle des ouvrages associés aux îlots privés (25 à 27% contre 24% respectivement).

Le bilan hydrique simulé à l'état aménagé est détaillé dans la Figure 8 et comparé à l'état actuel ainsi qu'à un état « naturel » plus théorique correspondant à un absence d'aménagement (espace vert sur toute la zone). Bien que supérieurs à ceux obtenus pour l'état initial, les niveaux de recharge demeurent comparables à ceux simulés pour l'état de référence « naturel ». La gestion diffuse des eaux pluviales permet en effet de maîtriser l'augmentation de la recharge en favorisant l'évaporation de surface via les toitures stockantes et en limitant la diminution de l'évapotranspiration.



	État « naturel »	État actuel	Gestion diffuse
P	649 mm/an	649 mm/an	649 mm/an
R	0 mm/an	352 mm/an	231 à 233 mm/an
E	29 mm/an	54 mm/an	140 mm/an
I	620 mm/an	243 mm/an	277 mm/an
ET	426 à 518 mm/an	127 à 153 mm/an	118 à 145 mm/an
RE	90 à 174 mm/an	77 à 106 mm/an	116 à 147 mm/an

P = précipitations ; E = évaporation de surface ; I = infiltration de surface ; ET = évapotranspiration ; RE = recharge vers la zone saturée

Figure 8 : Bilan hydrique simulé à l'état aménagé: différents termes du bilan en % et mm/an et évolution par rapport à l'état initial (écart relatif).

5. Conclusions

La caractérisation géologique du site a montré qu'il était peu probable que du gypse soit présent en proportion significative dans les Marnes Infragypseuses ou dans le Calcaire de Saint-Ouen. Ainsi, le gypse ne serait présent que dans les Marnes-et-Caillasses, soit à plus de 35 mètres de profondeur.

Sur le plan géochimique, les nappes du Saint-Ouen et des Marnes-et-Caillasses ont un faciès hyper sulfaté calcique. Dans la nappe du Saint-Ouen, les concentrations en sulfates diminuent de l'amont vers l'aval alors que les concentrations en nitrates augmentent, suggérant que la dilution des concentrations en sulfates est due à des apports anthropiques.

Par ailleurs, la grande épaisseur de zone non saturée (plus de 10 mètres), la présence de couches marneuses peu perméables et l'existence d'une fraction importante de sulfates lixiviables dans les remblais permet vraisemblablement aux eaux d'infiltration de se charger en sulfates lors de leur percolation, s'opposant ainsi à la dilution de la nappe par un pôle anthropique.

L'incidence de l'aménagement sur la recharge a été évaluée à partir d'un modèle hydrologique. Les résultats de ces modélisations font apparaître une augmentation de la recharge par rapport à l'état actuel, quel que soit le scénario d'aménagement. Le recours à une gestion diffuse permet cependant de limiter l'incidence de l'aménagement sur la recharge, et de se rapprocher sensiblement d'un état de référence « naturel ».

L'ensemble de ces résultats convergent pour estimer que le risque de dissolution du gypse lié à l'infiltration des eaux pluviales sur le site de l'Ecoquartier de la Gare est faible. Bien que l'augmentation de la recharge soit modeste, celle-ci pourrait néanmoins contribuer à amplifier la dilution des concentrations en sulfates, et ainsi générer un risque plus élevé sur le gypse présent à l'aval hydrogéologique du site. Une modélisation des écoulements en zone saturée et du transport conservatif est actuellement en cours (logiciel Visual Modflow), afin d'étudier l'impact de ces aménagements sur la dilution des concentrations en sulfates. Un troisième scénario de gestion des eaux pluviales permettant de limiter encore d'avantage la recharge est par ailleurs à l'étude.

6. Références bibliographiques

Fouché O, Hirschauer A (2007). « Variations de la nappe phréatique et cartographie de l'infiltrabilité des sols sur le territoire de la Seine-Saint-Denis ». XIVes journées techniques du Comité français d'hydrogéologie – Lyon 8-10 novembre 2007.

Milly, P. C. D. (1986). "An event-based simulation model of moisture and energy fluxes at a bare soil surface." Water Resources Research, 22, 1680.

Rodriguez, F., Andrieu, H., and Morena, F. (2008). "A distributed hydrological model for urbanized areas : Model development and application to case studies." Journal of Hydrology, 351, 268–287.

Sage, J., Berthier, E., and Gromaire, M.-C. (2016). "Towards the production of guidelines to support the design of stormwater management practices for on- site pollution control." NOVATECH 2016, Lyon, France.

Thierry P., Prunier-Leparmentier A.M., Lembezat C. and Vanoudheusden E. (2009). 3D geological modelling at urban scale and mapping of ground movement susceptibility from gypsum dissolution: The Paris example (France). Eng Geol 105, pp. 51–64

Toulemont M. (1986) – Les gypses lutétiens du Bassin de Paris : sédimentation, karstification et conséquences géotechniques. Thèse de doct., Univ. Paris-Sud - Orsay