

Étude du risque inondation par remontées de nappe en agglomération parisienne

Mathias Maillot^{1,2*}, Agnès Rivière¹, Nicolas Flipo¹, Marc Vincent²

¹ Centre de Géosciences, Mines-ParisTech, PSL Université

² EPTB Seine Grands Lacs

* mathias.maillot@mines-paristech.fr

Résumé

La gestion du risque inondation lors des crues de la Seine et de la Marne constitue un enjeu majeur en agglomération parisienne du fait de l'importante densité de population et de la vulnérabilité des infrastructures stratégiques qui s'y trouvent. Le phénomène de remontée de nappe accompagne les épisodes de crue via le transfert des eaux de surface vers les eaux souterraines. Le contexte hydrogéologique de Paris est fortement affecté par la régulation des niveaux d'eau de nappe et de rivière, par le caractère hétérogène du milieu géologique, et par la présence de structures souterraines (caves, parkings, métro). Cette étude est une synthèse de la thèse de [Maillot \(2019\)](#) qui vise à décrire le risque inondation par remontées de nappe en agglomération parisienne par la modélisation hydrogéologique. La modélisation permet de quantifier la durée et l'amplitude des dynamiques de remontées de nappe en réponse à des scénarios de crue combinés à des scénarios d'évolution des pompages.

Points clés

- En cas de crue de la Seine, le centre de Paris est vulnérable aux remontées de nappe indépendamment du débordement du cours d'eau ;
- Modèle hydrogéologique de l'agglomération parisienne ;
- Analyse de trois campagnes de relevés synchrones du niveau piézométrique ;

Abstract

The Paris urban area is a densely populated city where strategic infrastructures and population are subject to the flooding risk during Seine and Marne Rivers flood events. The groundwater rising process is associated with flood event through the drainage of river water towards the aquifer. In urban environments, groundwaters are strongly impacted by anthropogenic activities such as permanent pumping and underground structures development (basements, subway, etc. . .). This report is based on the work of [Maillot \(2019\)](#) on the modelling of groundwater rising during flood events in Paris urban area. Modeling makes it possible to quantify the duration and the amplitude of the dynamics of groundwater upwelling in response to flood scenarios combined with pumping evolution scenarios.

Key points

- Paris center is vulnerable to groundwater rising during flood events, even in the absence of surface overflow ;
- A hydrogeological model covering Paris urban area has been developed ;
- Analysis of three piezometric snapshot campaigns.

Introduction

L'agglomération parisienne est située au centre du bassin versant de la Seine. Elle représente une unité urbaine (Fig.1) intégrant Paris intra-muros (la ville de Paris), la totalité des communes de la petite couronne (départements 92, 93 et 94), et certaines communes de la grande couronne (départements 77, 78, 91 et 95). L'agglomération compte une population totale de près de 11 millions d'habitants répartis dans 412 communes, couvrant près de 3000 km², ce qui la classe parmi les dix agglomérations les plus densément peuplées au monde. Le réseau hydrographique de cette agglomération est représenté principalement par la Seine et la Marne dont le tracé méandriforme long de près de 85 km traverse l'agglomération depuis le sud et l'est vers le nord-ouest. L'agglomération parisienne est particulièrement exposée au risque inondation du fait des nombreuses habitations et infrastructures déployées dans la plaine alluviale inondable, de sa densité de population et de son caractère métropolitain. Les crues de la Seine sont lentes, surviennent généralement en hiver, et leur durée s'étale souvent sur plusieurs semaines. Entre 1910 et 1960, Paris a ainsi connu dix événements de crue majeurs.

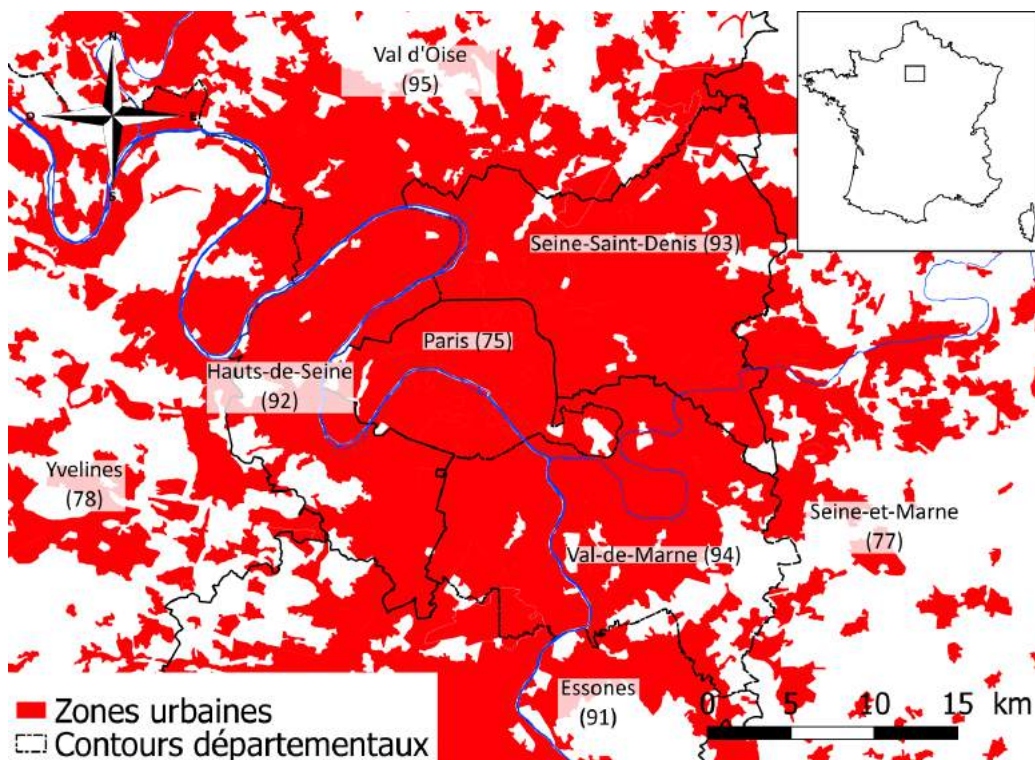


Figure 1. Carte de localisation administrative de Paris et de la petite couronne

L'action des gestionnaires et des scientifiques, attachés aux relations entre la ville et ses ressources en eau, s'est surtout concentrée sur les eaux de surface, en particulier au sujet de la détérioration de la qualité des cours d'eau due aux rejets urbains, de l'aggravation du pic de ruissellement et des débordements entraînant des inondations. Cependant, les crues peuvent également entraîner des remontées de nappe, susceptibles de causer des dommages aux installations souterraines. Dans le contexte actuel de changement climatique et d'urbanisation, les deux composantes du risque inondation (aléa et vulnérabilité) sont amplifiées, et le risque inondation qui en résulte augmente (Keating et al., 2014). En cas de crue exceptionnelle, les dommages sont non seulement matériels, mais aussi logistiques, socio-économiques et politiques puisque nombre de centres décisionnels sont situés à Paris et en petite couronne. Sur un plan matériel, le bâti et les infrastructures peuvent être détériorés par l'immersion de leur sous-sol, par la dégradation de leurs fondations sous la pression hydrostatique et par la corrosion (Lerner and Barrett, 1996). Sur un plan technique, un dysfonctionnement en

masse des réseaux est susceptible de se produire. Ce risque est aggravé par l'enfouissement systématique des réseaux au sein de l'agglomération parisienne. En cas de crue de la Seine excédant 8 m à l'échelle de Paris-Austerlitz, il est estimé que plus de 850 000 personnes et près de 10 % des entreprises seraient impactées par les inondations par débordement (EPTB - Seine Grands Lacs, 2014). De plus, d'après la RATP, les inondations causées par les crues peuvent impacter 140 km de ligne de métro sur un total de 250 km. Pour les gestionnaires du risque inondation, le renforcement des connaissances sur le niveau de la nappe superficielle durant les périodes de crue permettrait de quantifier les dommages causés aux réseaux critiques enterrés, et de prévoir la répartition des zones affectées par l'endommagement de ces réseaux.

Lors de la crue de janvier 2018, la crue de la Seine a atteint une hauteur de 5,87 m à l'échelle de Paris-Austerlitz, causant des inondations importantes dont le coût total est estimé entre 190 et 300 M€ (CCR Caisse Centrale de Réassurance, 2018). Bien que l'agglomération parisienne ait été globalement protégée des inondations par débordement par le dispositif de murettes anti-crues, une partie du réseau de transport souterrain a été affectée par les premiers effets des remontées de nappe (fermeture préventive du RER C, venues d'eau constatées dans les tunnels des lignes 4, 7, 9 et 11 du métro). Durant cet évènement, le suivi du niveau piézométrique mené par les services de l'IGC (Inspection Générale des Carrières, service de la Ville de Paris) a permis de constater l'absence de remontée de nappe généralisée au centre de Paris grâce au maintien des pompages en cours. En cas d'arrêt de ces pompages, sous l'effet de défaillances d'alimentation électrique notamment, cette crue aurait pu causer d'importants dommages sur les structures souterraines du fait des inondations par remontées de nappe.

Bien que le risque inondation par le débordement des cours d'eau soit désormais correctement caractérisé, les remontées de nappe consécutives aux crues de la Seine et de la Marne représentent encore une source d'incertitude pour les acteurs locaux de la gestion de crise. Abrisant une grande densité de population, les zones urbaines font en effet l'objet d'une attention particulière des pouvoirs publics, mais aussi des collectivités locales, pour y réduire le coût des dommages consécutifs aux inondations.

Les Programmes d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI) ont été initiés en 2003 suite aux inondations ayant touché la France (Bretagne, Aube, Somme, Rhône) entre 1999 et 2002. Les PAPI sont portés par des collectivités territoriales ou leurs groupements (départements, communes, syndicats mixtes). Ils visent à promouvoir une gestion intégrée du risque inondation pour réduire les conséquences dommageables sur la santé humaine, les biens, les activités économiques et l'environnement. Outil de contractualisation entre l'État et les collectivités, le dispositif PAPI permet la mise en œuvre d'une politique globale de gestion du risque inondation, pensée à l'échelle du bassin versant.

La réduction du risque inondation passe par des actions de compréhension, de prévention et de gestion des inondations. À l'issue de la première génération de PAPI (2003-2009), une synthèse a mutualisé les retours d'expérience de près de 50 programmes identifiant ainsi les points forts et les pistes d'amélioration des PAPI. Une deuxième génération de PAPI a été mise en œuvre à partir de 2011 dans le but d'accompagner la transposition de la directive européenne 2007/60/CE, adoptée le 23 octobre 2007. Le PAPI SMF (Seine et Marne franciliennes) porté par l'établissement public territorial de bassin (EPTB) Seine Grands Lacs, a été labellisé dans ce cadre en 2013 et est depuis mis en œuvre, avec une révision à mi-parcours adoptée fin 2016 comme pour tous les PAPI. Les actions (au nombre de 166, suite à la révision de 2016, pour un montant prévisionnel global de 103 M€ TTC, pilotées par 20 maîtres d'ouvrages distincts) sont réparties autour des 7 axes suivants :

- Axe 1 – Amélioration de la connaissance et de la conscience du risque
- Axe 2 – Surveillance, prévision des crues et des inondations
- Axe 3 – Alerte et gestion de crise
- Axe 4 – Prise en compte du risque d'inondation dans l'urbanisme
- Axe 5 – Réduction de la vulnérabilité des biens et des personnes
- Axe 6 – Ralentissement dynamique des écoulements

— Axe 7 – Ouvrages de protection hydraulique

En 2015, l'action 1.1.5 rattachée à l'axe 1 du PAPI SMF, intitulée « Étude de la propagation de la nappe d'accompagnement de la Seine en cas de crue », est lancée. Le comité de suivi de l'action 1.1.5 est composé des principaux acteurs de l'hydrogéologie parisienne, maîtres d'ouvrages et gestionnaires du risque inondation (par ordre alphabétique, le BRGM, le CEREMA, la DRIEE Île-de-France, les Conseils Départementaux du Val-de-Marne et de Seine-Saint-Denis, Mines ParisTech, la RATP, la SNCF, la Société du Grand Paris, et la Ville de Paris avec l'IGC et la Direction de la Prévention, Sécurité et Protection). Cette action, qui vise à mieux prévenir le risque d'inondation par remontées de nappe dans l'agglomération parisienne, passe essentiellement par une meilleure connaissance de l'hydrogéologie urbaine.

Les travaux de recherche de cette étude s'inscrivent dans le PAPI SMF porté par l'EPTB Seine Grands Lacs. Ils font partie d'un travail de thèse portant sur l'étude de la propagation de la nappe alluviale de la Seine en cas de crue dans l'agglomération parisienne qui a été initié en juillet 2016 dans le contexte particulier de la crue de la Seine de mai juin 2016 ayant causé d'importants dommages sur l'ensemble du bassin versant de la Seine. La crue de la Seine et de la Marne de janvier 2018 a également touché le bassin versant de la Seine durant le déroulement de cette étude.

Les objectifs de ce travail sont d'améliorer les connaissances sur le fonctionnement hydrogéologique de Paris et de la petite couronne, de comprendre les impacts d'événements de crue sur le fonctionnement hydrogéologique et le rôle des écoulements de nappe. Le fonctionnement hydrogéologique de l'agglomération parisienne est caractérisé par l'analyse des données synchrones acquises par les membres du PAPI SMF et par la mise en œuvre d'une méthode de cartographie de la piézométrie, établie à l'aide d'outils géostatistiques (Renard et al., 2019).

L'application de la plateforme de modélisation CaWaQS (Labarthe, 2016) a permis la simulation des écoulements souterrains et de surface à l'échelle régionale du bassin versant de la Seine (Labarthe, 2016; Flipo et al., 2020b). Le modèle régional du bassin versant de la Seine a également fait l'objet d'une étude des perspectives climatiques de ce bassin dans Gallois et al. (2019) et Flipo et al. (2020a). La modélisation hydrogéologique de l'agglomération parisienne s'appuie sur le concept de modélisation emboîtée. Ces travaux répondent aux objectifs suivants :

- Définir le fonctionnement de l'aquifère superficiel de l'agglomération parisienne durant les périodes de basses eaux et de hautes eaux ;
- Développer des outils de caractérisation du risque inondation par remontées de nappe ;
- Décrire l'évolution des interactions nappe-rivière lors d'une période de crue et en déduire les dynamiques de remontées de nappe ;
- Évaluer les remontées de nappe dans l'agglomération parisienne lors de périodes de crue de la Seine et de la Marne combinées à différents scénarios de pompages.

Ce rapport est structuré en trois parties. La première porte sur la caractérisation de l'aquifère superficiel basée sur l'application d'une méthode de cartographie innovante, qui a été développée afin d'exploiter les données acquises lors des campagnes de relevés synchrones. La deuxième partie porte sur le développement du modèle hydrogéologique, dont la construction a nécessité l'utilisation de données diverses (cartes piézométriques, base de données SONGE (Société du Grand Paris, 2019), modèle hydrogéologique de Paris (Lamé, 2013), modèle géologique tridimensionnel du Tertiaire du Bassin de Paris (BRGM and DRIEE, 2014)). Enfin, la dernière partie porte sur l'application de scénarios de crue en entrée du modèle hydrogéologique. L'exploitation de ce modèle permet de quantifier la durée et l'amplitude des dynamiques de remontées de nappe en réponse à des scénarios de crue combinés à des scénarios d'évolution des pompages.

1 Fonctionnement hydrogéologique de l'agglomération parisienne

À partir des données historiques du suivi hydrométrique de la Seine à Paris et du suivi piézométrique plus récent, le fonctionnement hydrogéologique de l'agglomération parisienne a fait l'objet de nombreuses synthèses, notamment depuis les années 1950 (Soyer, 1953b; Diffre, 1969; Mégniën, 1980; Filliat, 1981; Prunier-Leparmentier, 1988; Lamé, 2013). Le fonctionnement actuel de l'aquifère superficiel de l'agglomération parisienne est soumis à une importante pression anthropique, tant en termes de régulation du niveau d'eau en rivière (barrages réservoirs, barrages de navigation) qu'en termes de régulation des niveaux piézométriques par l'action de pompes. Afin de préserver les zones vulnérables aux risques d'inondation, la régulation des flux est plus importante en période de crue. De ce fait, deux modes de fonctionnement hydrogéologique caractérisent les aquifères superficiels parisiens : en période de crue et hors période de crue. La caractérisation de ces deux fonctionnements est nécessaire pour conceptualiser l'évolution dans l'espace et dans le temps de l'aquifère superficiel de l'agglomération parisienne.

Afin de répondre à cette problématique, l'acquisition de données piézométriques a été organisée au cours de trois campagnes de relevés synchrones dans le cadre de l'action 1.1.5 du PAPI SMF, avec la participation de l'ensemble des acteurs de cette action :

- deux campagnes de basses eaux (314 mesures en octobre 2015, 258 mesures en avril 2016) durant des périodes de régulation du niveau d'eau de la Seine ;
- une campagne de hautes eaux (202 mesures du 10 au 20 juin 2016) durant la période de récession de la crue de mai-juin 2016.

La méthodologie cartographique développée et décrite dans Maillot (2019) a été appliquée aux jeux de données correspondant à ces campagnes. Ces cartes permettent de décrire l'état de la piézométrie sous différents contextes et de caractériser, par comparaison, les écoulements dans le sous-sol de l'agglomération parisienne.

1.1 Méthodologie d'analyse du fonctionnement hydrogéologique

Le fonctionnement hydrogéologique de l'agglomération parisienne est caractérisé à partir des cartes piézométriques élaborées à partir des jeux de données correspondant à la période de basses eaux d'octobre 2015 et aux périodes de crue de juin 2016 et janvier 2018.

Trois sous-zones sont délimitées selon des critères administratifs et géographiques (Fig.2) et présentent des motifs piézométriques propres. Ces zones sont la plaine alluviale de la Seine et de la Marne située à l'amont de la confluence Seine-Marne, Paris intra-muros et les Hauts-de-Seine, et la plaine de la Vieille Mer.

Le fonctionnement hydrogéologique est défini de manière indépendante au sein de chaque zone, par la caractérisation de l'orientation et de la magnitude des gradients hydrauliques locaux de l'aquifère superficiel. L'orientation des échanges nappe-rivière des sections connectées est déterminée en comparant le niveau d'eau en rivière et le niveau piézométrique à 50 m de la rivière (deux pixels de la carte). Dans le cas où le niveau d'eau en rivière dépasse celui de la nappe sur les deux berges, la rivière alimente la nappe. Dans le cas contraire, la rivière est drainée par la nappe.

Les trois statuts de relation nappe-rivière sont :

- La connexion, dans le cas où le débit d'échange nappe-rivière est dépendant du gradient de charge entre la nappe et la rivière. Les écoulements peuvent être ascendants lorsque la nappe alimente la rivière et descendants lorsque la rivière alimente la nappe.
- La transition dans le cas où une zone non saturée se met en place entre la nappe et la rivière.
- La déconnexion dans le cas où la zone non saturée devient suffisamment épaisse pour que le débit d'infiltration entre la rivière et la nappe ne soit plus dépendant du gradient de charge et qu'il soit contrôlé principalement par la gravité. Le débit d'infiltration est maximal dans cet état.

Sur les cartes piézométriques, l'état de transition n'est pas représenté. L'état connecté est présenté selon

trois configurations : i) flux ascendant, ii) flux descendant et iii) l'orientation des écoulements diffère selon les berges avec une berge présentant des flux ascendants et l'autre des flux descendants.

Le fonctionnement hydrogéologique est ensuite défini à partir des chroniques piézométriques disponibles. Le comportement hydrogéologique est catégorisé selon deux modes de fonctionnement. Le fonctionnement hors période de crue représente le comportement de l'aquifère soumis aux facteurs anthropiques (pompages, régulation du niveau d'eau en rivière), tandis que le fonctionnement en période de crue correspond à la réponse du système aux perturbations induites par les crues de la Seine et de la Marne.

L'identification des deux modes de fonctionnement hydrogéologique s'appuie sur les chroniques piézométriques de longue durée acquises par l'IGC, notamment pour les piézomètres situés à proximité de la Seine, afin d'identifier l'effet des fluctuations du niveau d'eau en rivière sur le niveau piézométrique. La sensibilité du niveau piézométrique de l'aquifère superficiel est résumée par l'analyse de chroniques piézométriques de piézomètres représentatifs situés au voisinage du cours d'eau (Fig.4). Les valeurs mesurées sont centrées et réduites afin de distinguer la dynamique commune de ces piézomètres en réponse des fluctuations du niveau d'eau de la Seine.

Lors de la crue de janvier 2018, seule la zone de Paris a fait l'objet d'un suivi du niveau piézométrique, notamment grâce à la mise en place d'un système automatique de relevé piézométrique (23 piézomètres sur une centaine mesurés tous les jours), ce qui a justifié la poursuite de l'équipement des piézomètres.

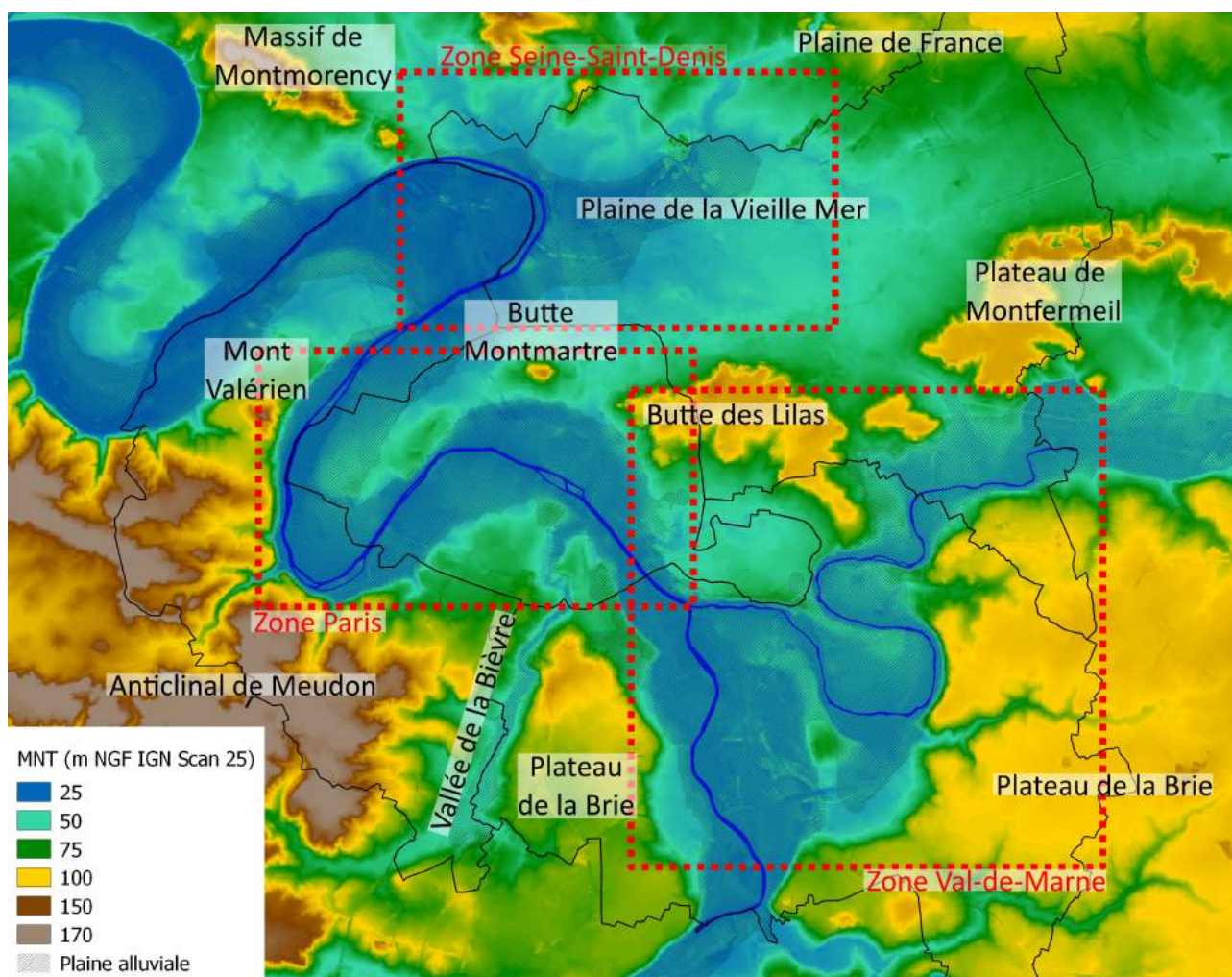


Figure 2. Carte topographique, dénomination des reliefs de l'agglomération parisienne, et délimitation des sous-zones piézométriques

Tableau 1. Longueur des tronçons de rivière en fonction du type de relation nappe-rivière pour la carte de basses eaux et la carte de haute eaux

	Basses eaux	Hautes eaux
Longueur tronçons déconnectés (km)	4.9	0.8
Alimentation de la nappe par la rivière (km)	30.3	20.0
relation nappe-rivière mixte (km)	38.3	39.3
Alimentation de la rivière par la nappe (km)	11.5.4	25.0

1.2 Analyse globale des cartes piézométriques de l'agglomération parisienne

Cette section décrit le fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère superficiel à l'échelle de l'agglomération parisienne. Les zones de l'agglomération parisienne présentant un gradient hydraulique maximum (1 ‰) sont situées à proximité de la Seine et de la Marne, et des zones associées à un relief marqué (Fig.3). La valeur minimum du gradient hydraulique est comprise entre 0,1 ‰ et 1 ‰ avec une valeur moyenne de 0,6 ‰ observée au niveau des plaines alluviales de la Vieille Mer et de la confluence entre la Seine et la Marne majoritairement.

À l'exception de la zone centrale, les écoulements sont principalement contrôlés par l'état de la connexion du système nappe-rivière et par la topographie. Au centre de l'agglomération, l'action de pompes permanents génère un important rabattement du niveau piézométrique. L'effet combiné de ce rabattement et de l'étanchéité des berges entraîne la déconnexion entre la nappe et la rivière. Dans cette zone, le niveau piézométrique est estimé à une profondeur de près de 4 m sous le lit de la Seine. Dans les deux contextes hydrologiques (basses eaux et hautes eaux), les sections de déconnexion nappe-rivière se situent exclusivement au centre de Paris (Fig.3).

L'augmentation de la ligne d'eau durant la crue de juin 2016 modifie considérablement le niveau piézométrique à proximité de la rivière. Au passage de la crue, l'augmentation du gradient hydraulique entre la nappe et la rivière est associée à une augmentation de l'infiltration au niveau des sections connectées. En comparant la figure 3.a et la figure 3.b, la plupart des sections d'alimentation de la nappe par la rivière s'inversent vers une alimentation de la rivière par la nappe. Ce constat est conforté par la diminution de la longueur totale des sections d'alimentation de la nappe par la rivière en période de crue (Tab.1).

La reconnexion des sections déconnectées en basses eaux peut être initialement causée par l'augmentation du débit d'infiltration au niveau des sections initialement connectée. Cette augmentation se traduit par l'augmentation du niveau piézométrique au voisinage de ces sections qui se propage le long du cours d'eau jusqu'aux sections initialement déconnectées. En conséquence, la quasi-totalité du réseau hydrographique est reconnectée à la nappe. La persistance de la section déconnectée au centre de Paris en période de crue (0,75 km, voir Fig.3.b.) peut être causée par l'augmentation des débits pompés en temps de crue.

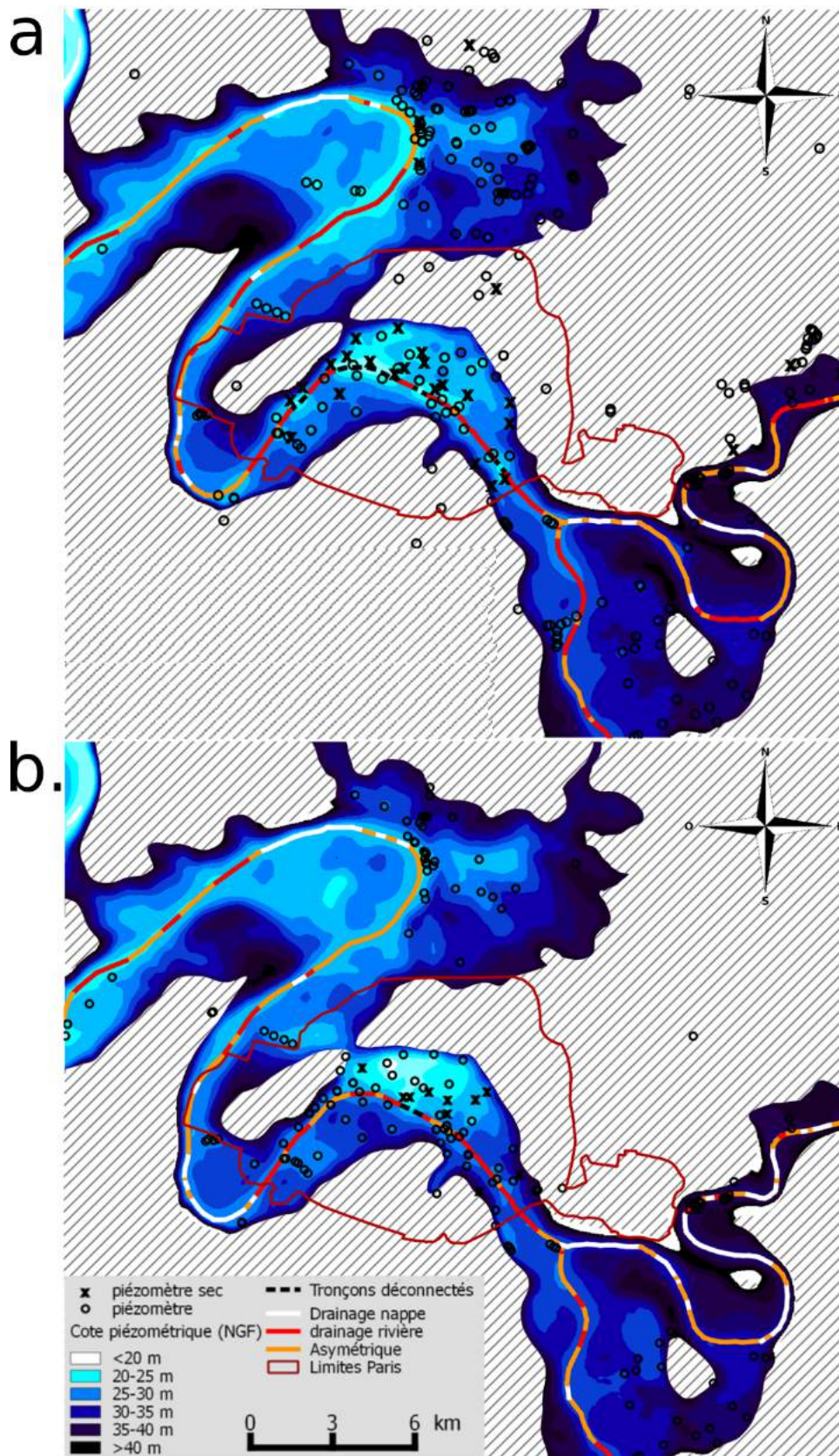


Figure 3. Cartes piézométriques de l'aquifère superficiel de l'agglomération parisienne pour la période de basses eaux (a.) et pour la période de hautes eaux (b.)

1.3 Définition du fonctionnement hydrogéologique suivant le contexte hydrologique

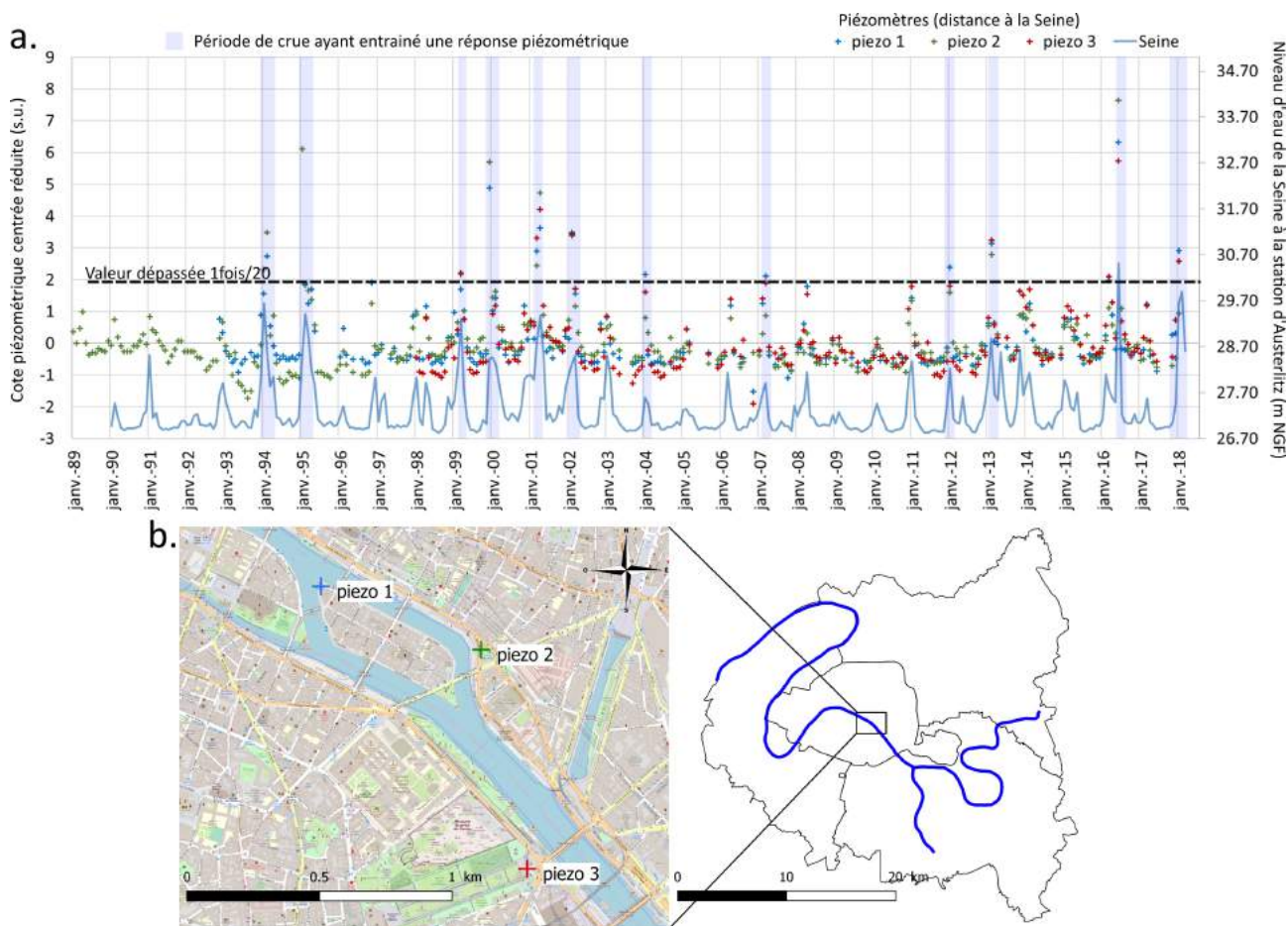


Figure 4. Mesures mensuelles centrées réduites de trois piézomètres proches de la Seine à Paris et niveau d'eau de la Seine sur la période 1989 - 2018

Les mesures piézométriques sont acquises à Paris intra-muros par les services de l'IGC depuis la fin des années 1970. Le niveau piézométrique a évolué depuis cette période, d'abord par une augmentation généralisée due à la désindustrialisation (Lamé 2013 ; Prunier-Leparmentier 1988), puis s'est stabilisé depuis la fin des années 1990 à un niveau proche de l'état actuel. Cette stabilisation du niveau piézométrique est modulée par l'action de pompages importants mis en place lors des chantiers des projets Meteor et Eole, et également par les événements de crue.

L'objectif de l'analyse est d'identifier l'effet des fluctuations du niveau d'eau en rivière sur le niveau piézométrique. Dans ce but, trois piézomètres de l'IGC, présentant une dynamique piézométrique influencée par le cours d'eau et représentatifs du reste des piézomètres, sont sélectionnés pour cette analyse. Ces piézomètres sont également sélectionnés en raison de leur proximité au cours d'eau (Fig.4.b).

Afin d'identifier l'influence relative des fluctuations du niveau d'eau en rivière sur le niveau piézométrique, les mesures ont été standardisées (centrées réduites) et comparées au niveau d'eau en rivière (Fig.4.a). Ce type de représentation permet d'identifier les événements de crue ayant entraîné une augmentation significative du niveau piézométrique. Sur la figure 4, les 5 % des niveaux piézométriques les plus hauts observés sur la période 1989-2018 se sont mis en place lors de crues relativement importantes de la Seine sur cette période (1994, 1995, 1999, 2001, 2013, 2016 et 2018) et parfois lors de crues n'ayant pas atteint de niveaux particulièrement

hauts (2000, 2004, 2007, 2012).

La représentation (Fig.4.a) de l'évolution de la hauteur d'eau en rivière et des variations du niveau piézométrique fait ressortir deux modes de fonctionnement hydrogéologique :

- Le fonctionnement hydrogéologique hors période de crue. Les débits de la Seine et de la Marne y sont régulés par l'action des barrages-réservoirs, empêchant ainsi les étiages sévères, et la hauteur d'eau en rivière est maintenue à des niveaux constants par l'action des barrages de navigation. Ces conditions en rivière génèrent un contexte hydrologique stable pour l'aquifère superficiel de l'agglomération parisienne ;
- Le fonctionnement hydrogéologique en crue est atteint lors des crues de la Seine et de la Marne suffisamment importantes pour avoir un impact significatif sur les niveaux de nappe au voisinage du cours d'eau. La nappe et la rivière se reconnectent alors progressivement à la traversée de Paris. La reconnexion entre la nappe et la rivière se fait dans le prolongement des sections initialement connectées (sect. 1.2).

2 Modélisation hydrogéologique dynamique de l'agglomération parisienne

2.1 Plateforme de modélisation CaWaQS

La plateforme de modélisation CaWaQS (Flipo, 2005; Labarthe, 2016; Flipo et al., 2019) simule les écoulements souterrains au sein d'aquifères de surface, leurs échanges avec le réseau hydrographique, ainsi que les échanges entre les aquifères (Fig.5). Cette plateforme a hérité d'un certain nombre de conceptualisations des processus physiques du programme MODCOU (de Marsily et al., 1978; Ledoux, 1980). CaWaQS est une plateforme mixte, à la fois conceptuelle et mécaniste, ce qui lui permet de reproduire les écoulements dans les hydrosystèmes couplant processus de surface et écoulements souterrains à moindre coût numérique. Le bilan d'eau de surface est calculé de manière conceptuelle au moyen de fonctions de production et de réservoirs, les écoulements souterrains sont calculés de manière mécaniste résolue en pseudo 3D, et des échanges verticaux sont calculés en appliquant le concept de drainance.

La plateforme CaWaQS a jusqu'ici été développée par les membres de l'équipe SHR (Systèmes Hydrologiques et Réservoirs) du Centre de Géosciences (MINES ParisTech, PSL Université). Dans le cas du modèle hydrogéologique de Paris et de la Petite Couronne, la conceptualisation de la nappe libre simplifiée a été développée et introduite au sein de cette plateforme de modélisation. Ainsi, la transmissivité évolue en fonction du degré de saturation du sol. Une transmissivité maximale est atteinte lorsque la colonne de milieu poreux est totalement saturée. Elle diminue à mesure que le degré de saturation diminue. À l'échelle d'une maille de modèle hydrogéologique, cette évolution de la transmissivité est simplifiée en considérant une perméabilité nulle au sein de la zone non saturée, et une perméabilité maximum dans la zone saturée. Suivant cette simplification, la transmissivité équivalente d'une maille de nappe libre varie donc en fonction de la charge hydraulique. La transmissivité (T , en $m^2.s^{-1}$) est recalculée comme le produit de l'épaisseur mouillée (e , en m), et de la perméabilité équivalente (K_{eq} en $m.s^{-1}$) de l'aquifère : $T = K_{eq}e$.

2.2 Conceptualisation du milieu aquifère

La construction du modèle hydrogéologique de Paris et de sa petite couronne se base sur les données de la BD SONGE (Société du Grand Paris, 2019), la banque du sous-sol (BSS), le modèle hydrogéologique construit par Lamé (2013) et le modèle tridimensionnel du Tertiaire du Bassin de Paris du BRGM and DRIEE (2014). Le concept de modèles emboîtés décrit par Flipo et al. (2014) est utilisé afin de s'assurer de la continuité des flux entre le modèle de Paris et de la Petite Couronne (PPC) et le modèle du bassin de la Seine développé lors

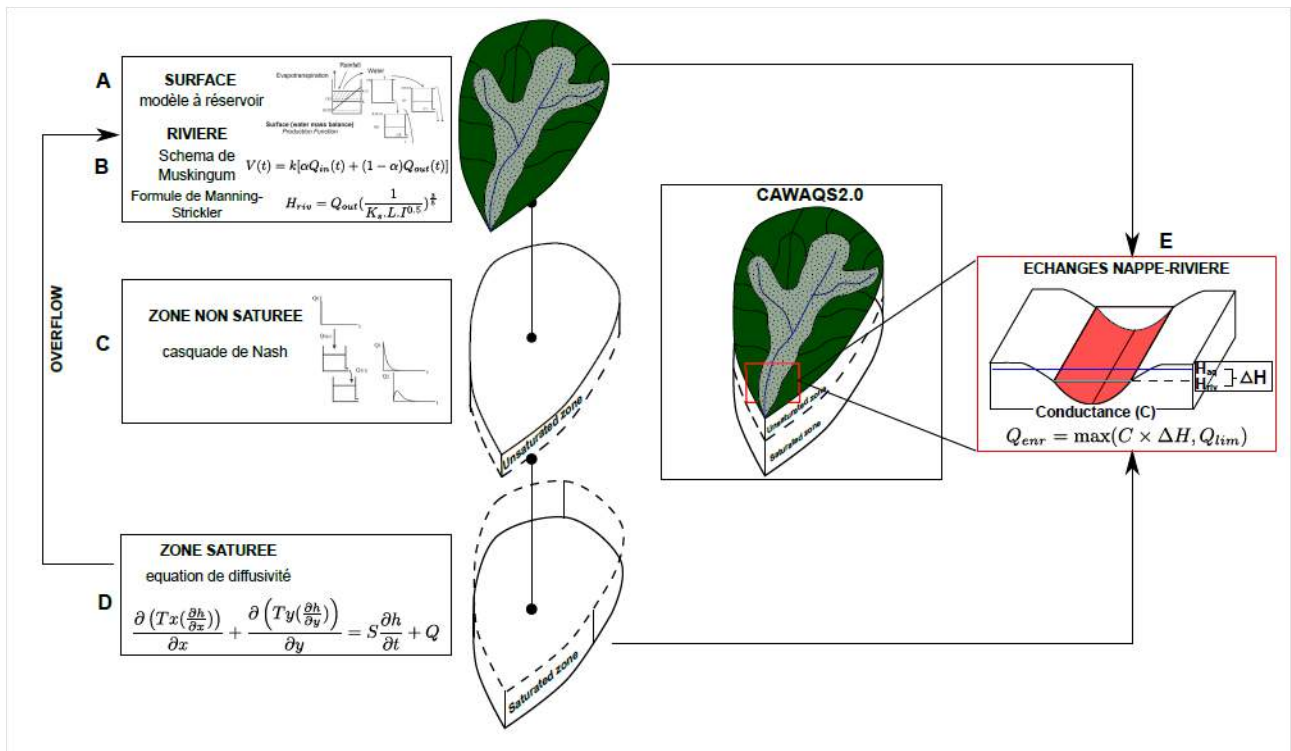


Figure 5. Plateforme de modélisation des hydrosystèmes CaWaQS

de la thèse de [Labarthe \(2016\)](#) et mis à jour dans [Gallois et al. \(2019\)](#) et [Flipo et al. \(2020a\)](#). Les résultats de ce rapport n'intègrent pas encore la dernière mise à jour de [Flipo et al. \(2020b\)](#) obtenue par exploitation de l'analyse hydrologique HYMIT dans le domaine fréquentiel.

Le système aquifère de l'agglomération parisienne est décrite selon trois grands ensembles hydrogéologiques : l'aquifère superficiel en relation avec le réseau hydrographique, les aquifères perchés et la nappe captive sous l'aquifère superficiel. Parmi ces trois ensembles aquifères, l'aquifère superficiel et la nappe captive sont discrétisés selon un maillage carré de type gigogne (Fig.6). Le maillage complet contient 22 657 mailles dont 16 465 correspondent à l'aquifère superficiel et 6 192 à la nappe captive. La nappe perchée est uniquement considérée en tant que composante de recharge de l'aquifère superficiel. Les mailles du modèle sont raffinées selon leur distance au réseau hydrographique, leur largeur maximum est de 2,5 km, et leur largeur minimum est de 50 m à proximité du réseau hydrographique. Les mailles les plus fines de la nappe captive présentent une largeur de 100 m.

Les deux couches aquifères présentées (aquifère superficiel et nappe captive) couvrent la totalité de la zone d'étude. Dans le cas de l'aquifère superficiel, une description de la variation lithologique verticale est également renseignée. La modélisation de la nappe libre requiert la connaissance de l'épaisseur et de l'altitude de chacune des couches géologiques qui la composent. Ces informations sont généralement déduites de données spatialisées (cartes géologiques, modèles géologiques) ou bien de données ponctuelles (sondages). L'emprise des couches géologiques est définie à partir de la carte géologique à 1/50000 de Paris, Corbeil-Essonnes, Lagny et l'Isle-Adam.

2.3 Forçages du modèle

Afin de garantir une cohérence entre les flux entrants et sortants de l'hydrosystème, une approche de modèles emboîtés ([Flipo et al., 2014](#); [Labarthe, 2016](#)) a été adaptée pour déterminer les conditions aux limites

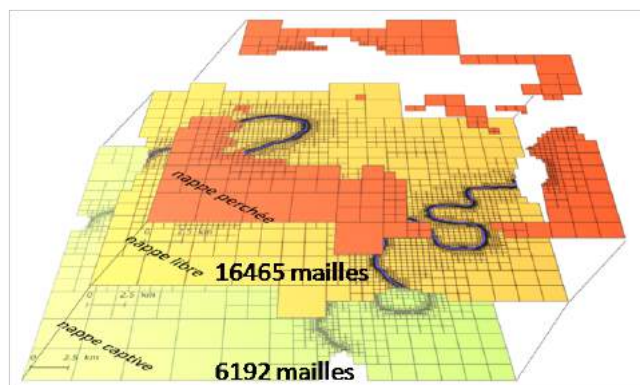


Figure 6. Superposition des maillages du modèle de Paris et de la Petite Couronne.

du modèle. Cette approche assure une cohérence entre les flux d'eau des modèles de différentes extensions spatiales. Les conditions aux limites latérales et inférieures du modèle de Paris et de sa petite couronne – PPC – (900 km²) ont été extraites du modèle du bassin versant de la Seine (65 000 km²) qui représente le système aquifère multicouche du bassin sédimentaire de Paris discrétisé selon sept couches aquifères allant des formations alluviales en surface jusqu'à la formation de la craie du Crétacé supérieur (Labarthe, 2016; Flipo et al., 2020a; Gallois et al., 2019)

Les conditions aux limites du modèle hydrogéologique PPC sont les flux échangés aux limites nord, sud, est, ouest et la recharge par le toit de l'aquifère superficiel. Chacun de ces flux est déduit de la modélisation de bassin versant en extrayant les flux des mailles du modèle régional de la Seine situées aux limites du modèle hydrogéologique PPC (Fig. 7). Les aquifères considérés sont les alluvions et le Lutétien pour la couche de l'aquifère superficiel du modèle PPC. Dans le cas de la craie, ce sont les flux de la couche craie du modèle Seine qui sont considérés. Les échanges avec les aquifères sus-jacents sont considérés comme les échanges par drainance entre la couche du Lutétien et la couche des calcaires de Champigny. Ce flux de drainance moyen est rapporté à l'emprise du modèle PPC. La recharge est reportée de manière homogène sur les mailles couvertes par le plateau Oligocène.

Seules la Seine et la Marne sont considérées dans le modèle hydrogéologique, étant donné les incertitudes concernant les échanges entre les entités hydrographiques artificielles ou artificialisées et la nappe. Ainsi, les cours d'eau sont considérés en tant que conditions aux limites mixtes (de type Robin, d'après Jazayeri and Werner (2019)). La condition aux limites mixte correspond à une charge imposée conditionnée par un débit d'infiltration limite. Le débit d'infiltration dépend du gradient de charge entre la valeur imposée en rivière et la valeur calculée dans l'aquifère sous-jacent à chaque itération de calcul et du paramètre de conductance du lit du cours d'eau. Lorsque le débit d'infiltration calculé dépasse une valeur seuil, la condition mixte est un flux imposé correspondant à la valeur de ce débit seuil. Ceci permet de conceptualiser l'évolution de l'infiltration entre une rivière et son aquifère durant la déconnexion.

La valeur de charge imposée en régime permanent correspond à la cote de la Seine et de la Marne en retenue normale, c'est-à-dire régulée par l'action des barrages de navigation en amont et en aval de la zone d'étude. Dans le cas des simulations en régime transitoire, les charges imposées sont définies par la modélisation hydraulique des différents événements hydrologiques pris en compte. Les modèles hydrauliques employés pour définir les hydrogrammes en entrée sont le modèle HYDRARIV développé par Hydratec pour l'EPTB Seine Grands Lacs et le modèle ProSe développé au centre de Géosciences (Even et al., 1998; Flipo et al., 2004; Vilmin et al., 2015a,b).

La figure 8 présente un récapitulatif de l'ensemble des conditions imposées aux limites du modèle.

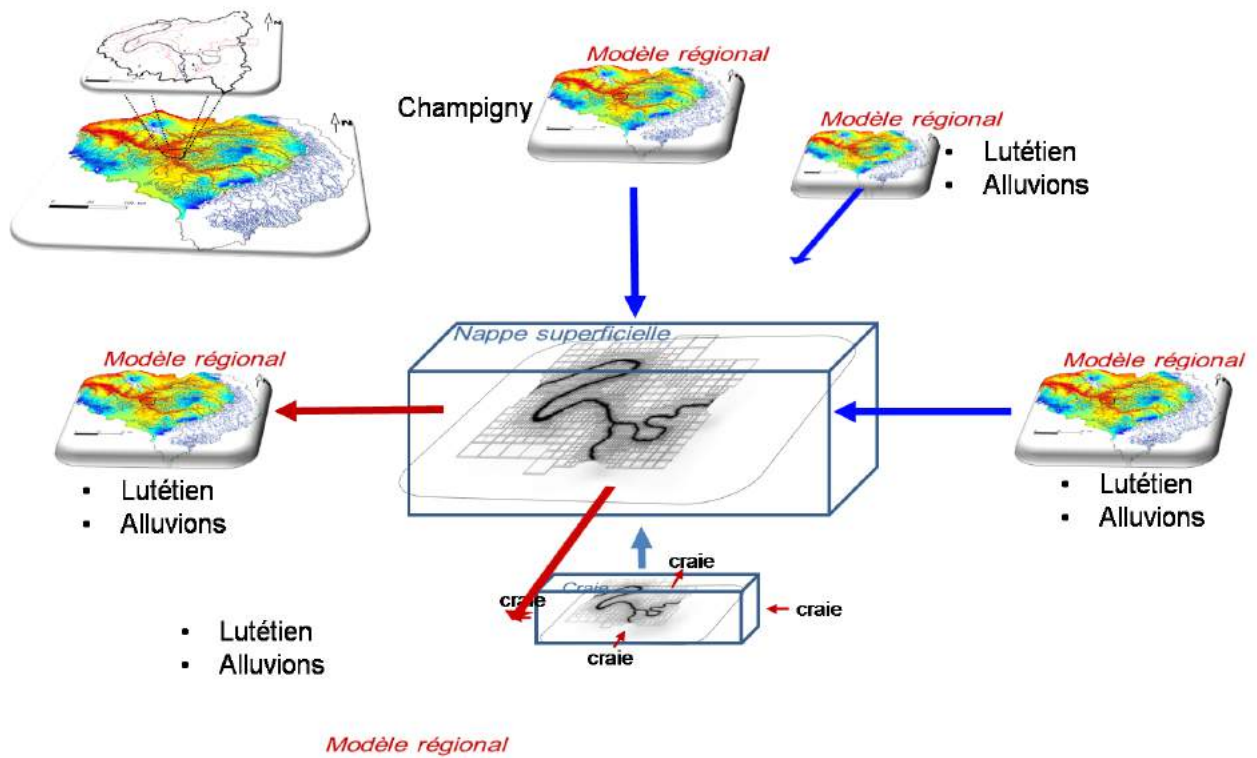


Figure 7. Représentation de la stratégie de modélisation emboîtée pour la prise en compte des flux régionaux aux limites du modèle hydrogéologique.

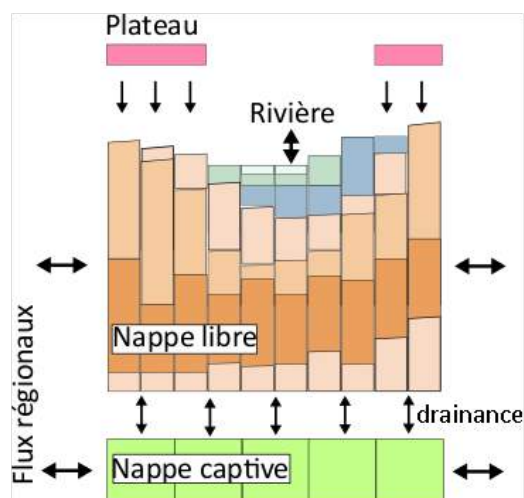


Figure 8. Représentation des conditions aux limites latérales, de la recharge et de la prise en compte du cours d'eau dans le modèle hydrogéologique de Paris et de la Petite Couronne.

Tableau 2. Tableau récapitulatif des crues associées à leur période de retour établies lors de la révision du PPRI de Paris de 2007

Année de la crue	Période de retour représentée	Hauteur d'eau à l'échelle d'Austerlitz	Débit
1910	100 ans	8,62 m	2 400 m ³ /s
1924		7,30 m	2 100 m ³ /s
1955	50 ans	7,12 m	2 120 m ³ /s
1945		6,85 m	1 990 m ³ /s
1982	10 ans	6,18 m	1 800 m ³ /s
1970		5,63 m	1 700 m ³ /s
2001	5 ans	5,21 m	1 510 m ³ /s

3 Scénarisation de l'hydrogéologie de l'agglomération parisienne en période de crue

Les niveaux d'eau atteints par la Seine à Paris, en période de crue, sont enregistrés depuis le XVII^{ème} siècle avec notamment la crue de 1658. À ce jour, celle-ci constitue la crue de la Seine la plus importante jamais enregistrée à Paris. Depuis la fin du XIX^{ème} siècle, plus de 40 crues majeures ont été dénombrées à Paris. En parallèle, l'urbanisation des zones inondables augmente constamment depuis 1930. De nombreuses activités humaines et économiques, des infrastructures de transports, des réseaux et des équipements urbains, ainsi que des centres de décision économiques et politiques se concentrent dans ces zones. Les zones inondables sont bien connues et cartographiées, mais l'évaluation précise de la vulnérabilité des aménagements et des infrastructures souterraines au risque inondation par remontées de nappes est encore très incomplète.

3.1 Définition des scénarios de crue

Depuis la mise en place d'un réseau de suivi hydrologique par l'ingénieur Belgrand (Belgrand, 1872), les niveaux d'eau en rivière sont suivis de manière rigoureuse. À partir de la synthèse hydrologique de la Seine à Paris (Banque HYDRO), plusieurs crues ont été retenues par la DRIEE (Direction régionale et Interdépartementale de l'Environnement et de l'Énergie) d'Île-de-France en tant que crues de référence. Lors de la révision de 2007 du PPRI (Plans de Prévention du Risque Inondation) du département de Paris, ces crues ont été répertoriées (Tab. 2).

Dans le cadre de la gestion des barrages-réservoirs, l'EPTB Seine Grands Lacs pilote des actions de modélisation hydraulique afin de déterminer l'effet de régulation des lacs sur ces crues de référence. Le programme de modélisation mobilisé est le modèle HYDRARIV (Setec Hydratec, 2019). Ce modèle calcule la hauteur d'eau en rivière par la résolution des équations de Barré de Saint-Venant. À l'occasion des comités de pilotage de l'action 1.1.5 du PAPI SMF, les scénarios employés en entrée du modèle hydrogéologique ont été définis. Deux crues de référence ont été retenues : la crue de janvier 1910 et la crue de 1955. La crue de janvier 1910 correspond à la crue la plus importante de la Seine observée depuis le XIX^{ème} siècle, elle est considérée comme une crue de type centennale. La période de retour de la crue de 1955 est de cinquante ans. Trois scénarios hydrauliques ont ainsi été identifiés pour la scénarisation des remontées de nappe :

- La modélisation des débits estimés pour la crue de janvier 1910 (scénario R1.0). Ce scénario produit des hauteurs d'eau inférieures à celles qui furent observées en 1910, du fait de la géométrie du cours d'eau actuel (figure 9.a).
- La modélisation des hauteurs d'eau observées pour la crue de janvier 1910 (scénario R1.15) correspond à une crue plus importante que la crue de janvier 1910 en matière de débit. Ce scénario suit la dynamique de crue de janvier 1910 en compensant la perte de hauteur d'eau due aux modifications de la géométrie du cours d'eau par une augmentation du débit (figure 9.a).

— La modélisation de la crue de 1955 reproduit les débits observés en janvier 1955 (figure 9.b).

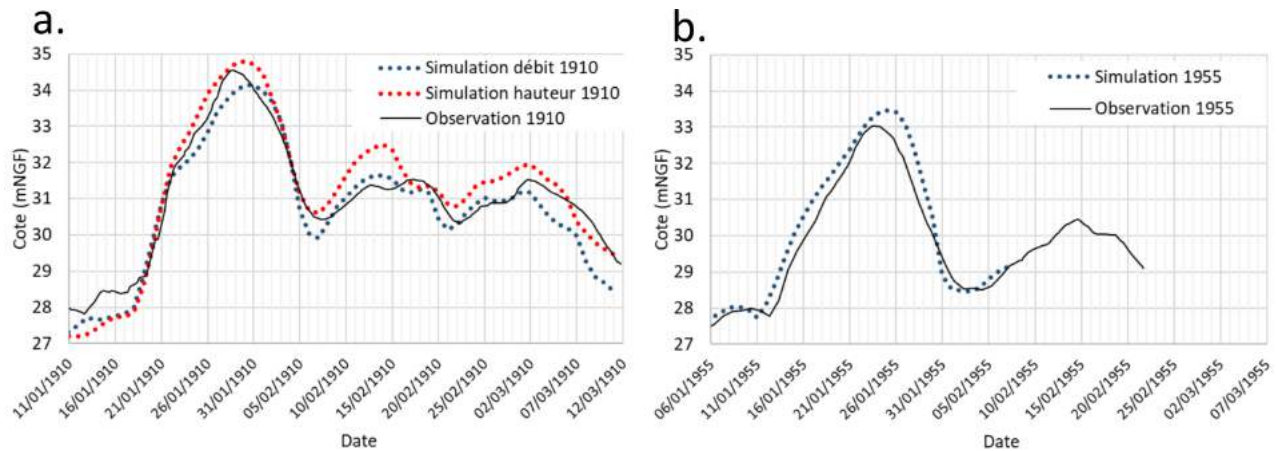


Figure 9. Hydrogrammes de crue simulés et observés. a) Crue de janvier 1910. b) Crue de janvier 1955

La crue de janvier 1910 est formée par trois évènements pluvieux successifs sur les bassins amont de la Seine, de la Marne et de l'Yonne. Ces précipitations font suite à un automne 1909 particulièrement humide, ce qui, en raison de la saturation des sols, aurait favorisé le ruissellement rapide des précipitations (Marti and Lepelletier, 1997). Ceci explique la forme complexe et l'amplitude de l'hydrogramme de crue (Fig. 9.a). Le contexte hydrologique de la crue de 1955 est très différent de celui de janvier 1910, l'automne de 1954 n'était pas très humide contrairement à l'automne qui a précédé la crue de 1910. De ce fait, l'hydrogramme de crue de janvier 1955 à Paris présente un pic de crue inférieur de 1,50 m à celui de la crue de janvier 1910 et une montée plus régulière et légèrement plus lente. Cette crue est majoritairement générée par un seul épisode de précipitations importantes (Babinet, 1955) dont le ruissellement aurait été favorisé par la présence de sols gelés à cette période (Marti and Lepelletier, 1997).

3.2 Description des scénarios de pompage

Les retours d'expérience relatifs aux crues récentes de la Seine à Paris (juin 2016 et janvier 2018) n'ont pas fait état de dégâts majeurs liés aux remontées de nappe, car les niveaux de nappe observés durant ces épisodes de crue sont restés maîtrisés grâce aux pompages permanents ou qui ont été déclenchés spécifiquement à cette occasion pour protéger les infrastructures souterraines des remontées de nappe. Néanmoins, l'arrêt de ces pompages est une éventualité dont il convient d'évaluer les répercussions pour des crues plus importantes susceptibles de causer des coupures localisées, voire généralisées, de l'alimentation électrique. Afin de balayer les différentes possibilités, trois scénarios de pompage ont été appliqués aux scénarios de crue modélisés :

- l'action permanente des pompages ;
- l'arrêt des pompages une fois le pic de crue atteint (le 26 janvier 1955 et le 31 janvier 1910) ;
- l'absence de pompages.

Les débits pompés imposés pour les deux premiers scénarios correspondent aux débits de pompage ayant été réévalués lors de la calibration du modèle (Maillot, 2019), ce qui correspond à un volume total annuel pompé de $28 \text{ Mm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$, auquel s'ajoutent $1.4 \text{ Mm}^3 \cdot \text{mois}^{-1}$ pompés spécifiquement durant les périodes de crue. L'application des trois scénarios de pompages (pompages constants, absence de pompages et arrêt de pompage) aux trois scénarios de crue (1910 R1.0, 1910 R1.15 et 1955) permet de décliner la simulation de neuf contextes hydrologiques différents.

4 Risque inondation par remontées de nappe de l'agglomération parisienne

Le risque inondation par remontée de nappe est défini par la combinaison de l'aléa, relié aux mouvements de nappe au passage d'une crue, et de la vulnérabilité des structures à ces battements de nappe. L'aléa lié aux remontées de nappe est donné par les résultats de modélisation des scénarios définies dans la section précédente. Les remontées de nappes affectent dans un premier temps les structures souterraines. Dans un second temps, lorsque la nappe affleure, les débordements de la nappe vers la surface peuvent également causer des inondations de surface. Afin de cartographier le risque inondation par remontées de nappe, les niveaux de nappe simulés et les informations disponibles sur l'occupation du sol et du sous-sol sont comparés dans cette section.

4.1 Cartographie de l'aléa lié aux inondations par remontées de nappe

La cartographie des remontées de nappe consiste d'abord à situer le niveau de nappe par rapport à la surface du sol. Dans ce but, le niveau piézométrique simulé a été comparé au MNT (Scan 25 m) de l'agglomération parisienne. L'altitude moyenne de chaque maille du modèle PPC a été retenue pour être comparée à la charge simulée. À partir de cette comparaison, il existe deux configurations possibles : dans le cas où le niveau piézométrique dépasse l'altitude du sol, l'emprise de la maille est susceptible de présenter des inondations par débordements de nappe, sinon, seules les structures souterraines sont concernées.

4.1.1 Identification des zones de débordement de nappe

Les zones de débordements de nappe peuvent également correspondre à des zones de débordement du cours d'eau. Dans le but de discerner les zones uniquement impactées par les débordements de nappe de celles à la fois impactées par le débordement du cours d'eau et de la nappe, les zones de débordement de nappe sont comparées à l'emprise des inondations par débordement des cours d'eau. Les plus hautes eaux connues (PHEC) constituent la référence de l'emprise maximum du débordement des cours d'eau. En agglomération parisienne, les PHEC correspondent à l'emprise des inondations causées lors de la crue de 1910. La comparaison des PHEC avec les débordements de nappe permet de déterminer si les débordements de nappe simulés sont associés aux débordements des cours d'eau.

4.1.2 Vulnérabilité en fonction du niveau de sous-sol

Dans le cas où le niveau piézométrique simulé se situe sous l'altitude du sol, l'utilisation de niveau de sous-sol de référence est nécessaire pour cartographier le risque inondation. En agglomération parisienne, la majorité des bâtiments présente entre un et trois niveaux de sous-sol. Le niveau piézométrique simulé a donc été comparé à l'altitude du plancher de trois niveaux de sous-sol en considérant une hauteur de 3 m par niveau de sous-sol, conformément à la hauteur standard de l'étage d'un immeuble. Les zones de caves impactées par les inondations de 1910 ont été reconstituées par la Direction de la Prévention et de la Protection (Ville de Paris) à partir des archives de la crue de 1910. L'emprise simulée des sous-sols impactés est comparée aux données concernant les caves effectivement impactées en 1910 pour évaluer la fiabilité des simulations.

4.2 Données employées pour l'étude de la vulnérabilité au risque inondation par remontées de nappe

La détermination de la vulnérabilité aux remontées de nappe requiert l'utilisation de données géolocalisées de la profondeur des structures souterraines. La comparaison de ces informations avec les résultats de modélisation donne une description de la vulnérabilité locale de ces structures, sous les scénarios modélisés. Les structures vulnérables aux remontées de nappe sont principalement représentées par les sous-sols (caves et parkings) et le réseau du métro. En l'absence de données concernant la profondeur du réseau d'assainissement, ce réseau n'a pas pu être analysé dans cette étude.

4.2.1 Données sur le bâti souterrain

Une base de données sur l'occupation du sous-sol à Paris intra-muros a été élaborée au cours de la thèse de [Lamé \(2013\)](#). Cette base de données mobilise la spatialisation du bâti parcellaire de surface, à laquelle s'ajoute l'information du nombre de sous-sols de chaque bâtiment. La profondeur du radier est ensuite déterminée en appliquant une hauteur standard de 3 m par niveau de sous-sol. Cependant, cette base de données ne couvre pas l'ensemble de l'agglomération parisienne. Dans cette étude, cette base de données est intégrée à un profil décrivant les remontées de nappe en rive droite au centre de Paris, de la Seine à la gare Saint-Lazare. Ce type de représentation permet de visualiser les effets locaux des remontées de nappe sur les structures, en considérant les différents contextes de pompage.

4.2.2 Données sur le réseau du métro

Le réseau du métro de l'agglomération parisienne couvre l'intégralité de la zone d'étude en reliant Paris intra-muros aux communes des départements de petite couronne. Le tracé linéaire total atteint une longueur de près de 200 km, en majorité située dans le sous-sol parisien. Les premières lignes de métro furent construites au début du XX^{ème} siècle et le réseau du métro est aujourd'hui constitué de 14 lignes. À l'exception de la ligne 14, les lignes de métro sont construites à une faible profondeur et se situent au-dessus du niveau piézométrique hors période de crue. La ligne 14 et les RER A, B, D et E se situent principalement sous le niveau piézométrique y compris hors période de crue. Le RER C, dont le tracé longe la Seine en rive gauche du XIII^{ème} au XVI^{ème} arrondissement de Paris, constitue un cas spécifique, car il est pratiquement intégré aux berges de la Seine. Ce contexte le rend particulièrement vulnérable aux inondations lors des crues, à la fois par le débordement de la Seine, et également par l'infiltration au travers des berges de la Seine. Cependant, les processus à l'œuvre lors de l'inondation du RER C relèvent davantage de l'infiltration localisée par les berges que d'écoulements hydrogéologiques. Le cas du RER C a notamment fait l'objet d'une étude approfondie dans le rapport Hydrogeobat ([Cojean et al., 2009](#)). Un jeu de données fourni par la RATP regroupe les cotes maximales et minimales de 330 stations de métro souterraines. Ces données sont croisées avec les niveaux de nappe obtenus par la modélisation hydrogéologique. Lorsque le niveau piézométrique atteint une cote comprise entre la cote du radier de la station et la cote du toit de la station, cela signifie que la nappe est susceptible de s'infiltrer vers les galeries de métro. Dans les cas où le niveau piézométrique dépasse le toit des stations de métro, cela signifie que la zone saturée occupe les terrains encaissants de la station de métro. Dans ces deux configurations, les remontées de nappes sont susceptibles de causer des venues d'eau dans les galeries de métro. Dans le second cas, les venues d'eau peuvent affecter la totalité des parois des galeries, tandis que dans le premier cas elles n'affectent que les parties baignées par la nappe. La seconde configuration implique donc une infiltration plus importante depuis la nappe vers les galeries.

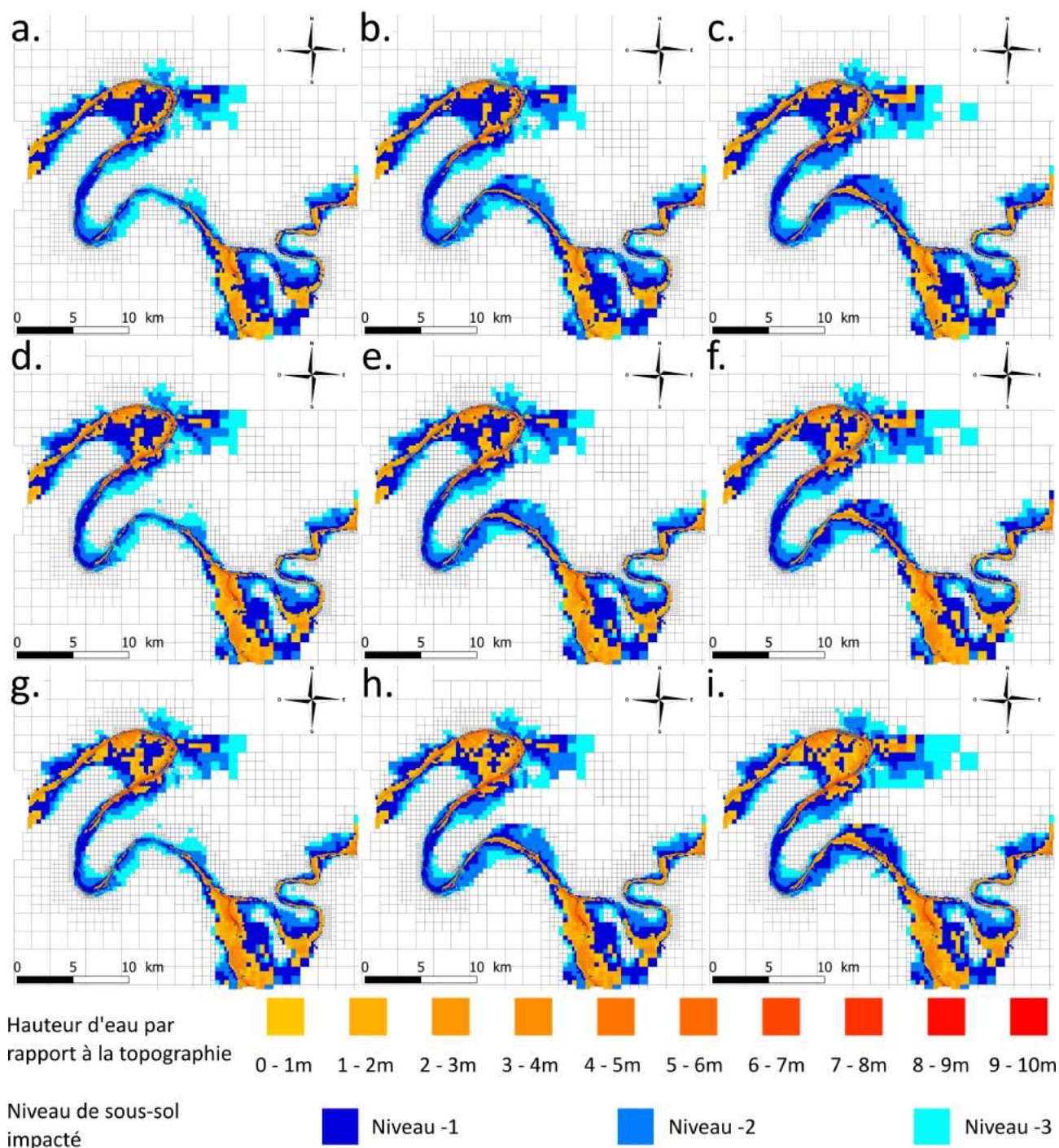


Figure 10. Cartes de distribution des zones inondées par débordement de nappe; les zones colorées du jaune au rouge représentent les hauteurs d'eau atteintes à partir de la surface, les zones colorées en bleu représentent les niveaux de sous-sol inondés. a) Crue de 1955 avec pompages, b) Crue de 1955 avec arrêt de pompages, c) Crue de 1955 sans pompages, d) Crue de 1910 (R1.0) avec pompages, e) Crue de 1910 (R1.0) avec arrêt de pompages, f) Crue de 1910 (R1.0) sans pompages, g) Crue de 1910 (R1.15) avec pompages, h) Crue de 1910 (R1.15) avec arrêt de pompages, i) Crue de 1910 (R1.15) sans pompages

4.3 Vulnérabilité des niveaux de sous-sol de l'agglomération parisienne

Les différences entre les zones concernées par les débordements de nappe en fonction du scénario de crue sont en cohérence avec les différences d'amplitudes des trois crues considérées (Fig. 10). En effet, les zones de débordement de nappe suivent le réseau hydrographique et sont plus larges dans le cas de la crue de 1910 (1.15) que dans le cas de la crue de 1910 (1.0) et de la crue de 1955. La répartition suivant le réseau hydrographique de ces zones suggère que les débordements de nappe affectent des zones déjà concernées par le débordement du cours d'eau. Il est à noter que lors des scénarios sans pompage pour les deux types de crues de 1910 (Fig. 10.f et Fig. 10.i), des zones éloignées du cours d'eau (lac de Créteil, vallée de la Vieille Mer et ancien bras de la Seine au niveau de la gare St-Lazare) présentent un risque de débordement de nappe.

Les scénarios de pompage introduisent une forte variabilité des niveaux de nappe, et par conséquent du risque d'inondation des infrastructures du sous-sol. Dans le cas des scénarios de pompage permanent (Fig. 10.a,d,g), le maintien des pompes abaisse suffisamment le niveau de nappe pour préserver les trois premiers niveaux de sous-sol de la zone centrale de Paris intra-muros. Dans les autres cas, les trois premiers niveaux de sous-sol sont affectés dans l'ensemble de la plaine alluviale de la Seine et de la Marne. Lors du scénario d'arrêt de pompage, les sous-sols sont affectés de la même manière pour les scénarios d'arrêt partiel ou total des pompages. La différence réside dans le niveau de sous sol possiblement envahi par les eaux dans le centre de Paris : niveau -2 pour crue de type 1910 (1.15) avec arrêt des pompages (Fig. 10.h), et niveau -1 en l'absence de pompages (Fig. 10.i).

4.4 Discussion

Les résultats obtenus pour le scénario de crue de type 1910 (1.15) sans pompage sont comparés aux niveaux de référence (Fig. 11). Les volumes pompés en 1910 sont certainement plus faibles que les débits de pompage estimés lors de la modélisation, c'est pourquoi le scénario d'absence de pompage se rapproche le plus de la configuration de l'époque.

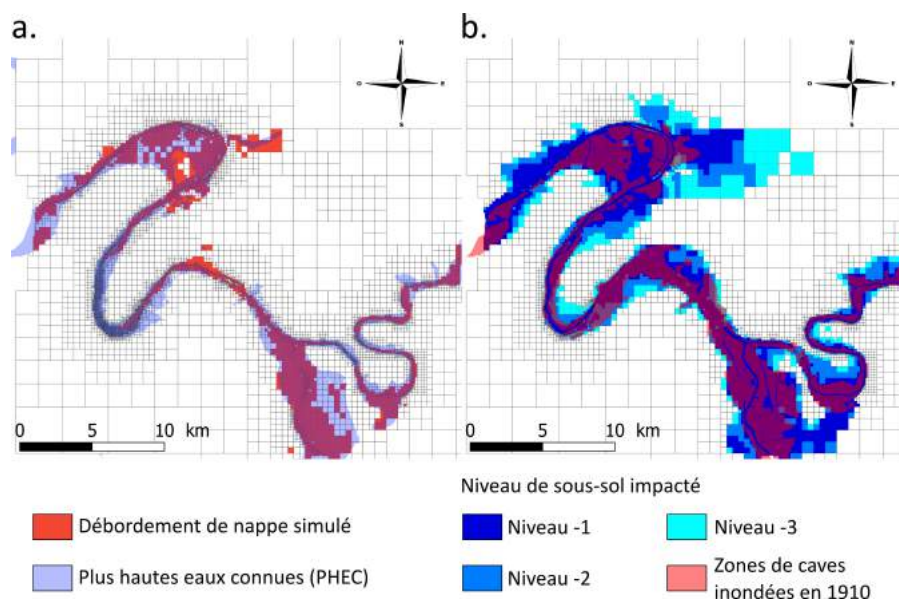


Figure 11. Comparaison des résultats de simulation du scénario de crue 1910 (1.15) avec les plus hautes eaux connues (a) et l'emprise des caves inondées lors de la crue de 1910 (b).

Les zones de débordement de nappe dépassent rarement l'extension des plus hautes eaux connues (PHEC) à l'exception d'une bande atteignant 400 m de large au centre de Paris, au niveau de la place de la Concorde

(Fig. 11.a). Cette bande correspond également à la section la plus étroite des PHEC, où les berges du cours d'eau sont protégées par des aménagements hydrauliques. Cela signifie qu'en l'absence de pompages, cette bande est vulnérable aux débordements de la nappe et peut donc être inondée, y compris sans débordement direct du cours d'eau. Cette zone de débordement de nappe ne correspond pas forcément à une zone inondée, mais à une zone dans laquelle le niveau piézométrique dépasse la surface du sol. Ainsi, les résultats montrent que la nappe déborde vers la surface, cependant, le débit d'exfiltration est contrôlé par la perméabilité de la chaussée. De plus, une partie des eaux exfiltrées a pu être pompée à l'époque afin de protéger cette zone des inondations. Les autres zones à la fois inondées et séparées du cours d'eau (vallée de la Vieille Mer, gare Saint-Lazare, lac de Créteil) apparaissent également dans l'emprise des PHEC. L'emprise des PHEC confirme donc les résultats produits par la modélisation sur ces zones.

L'emprise simulée des sous-sols impactés par la nappe dépasse globalement l'emprise des caves inondées lors de la crue de 1910 (Fig. 11.b). Les résultats de simulation indiquent une extension plus large des remontées de nappe, notamment dans la vallée de la Vieille Mer et dans la plaine alluviale de la Seine à l'amont de la confluence. En revanche, une bonne correspondance est observée entre les zones de caves inondées lors de la crue de 1910 et la zone d'impact du premier niveau de sous-sol. En faisant l'hypothèse que les sous-sols excédaient rarement une profondeur d'un niveau en 1910, cette correspondance confirme également les résultats obtenus par la modélisation. Il apparaît donc possible que les niveaux de sous-sol plus profonds (deuxième et troisième niveau) soient vulnérables dans les zones figurées sur la carte sans action de pompage. La correspondance entre la répartition simulée de l'inondation du niveau -1 et des zones de caves inondées en 1910 est bonne dans Paris. Les différences peuvent s'expliquer par le fait que les niveaux de sous-sol inférieurs au -1 étaient plus rares à cette époque qu'aujourd'hui. Dans les cas du Val-de-Marne et de la Seine-Saint-Denis, une possible explication est la présence de zones industrielles qui génèrent un rabattement de nappe initial à la crue.

4.5 Profils piézométriques de la zone centrale de Paris

La zone centrale de Paris correspond à la région la plus impactée par les pompages, y compris durant les périodes de crue. La comparaison entre les résultats des différents scénarios de pompages témoigne de leur influence lors de la propagation d'une onde de crue au sein de l'aquifère. Dans le cas du scénario de crue de type 1910 (1.15), cette comparaison est représentée sous la forme d'un profil piézométrique perpendiculaire au cours d'eau en rive droite de la Seine au centre de Paris (Fig. 12).

Trois états piézométriques caractéristiques des scénarios de pompages sont représentés (Fig. 13) : l'état initial à la montée des eaux (le 15 décembre 1909), l'état correspondant au maximum piézométrique atteint durant la crue, et l'état final atteint après la décrue (le 21 mars 1910). De plus, les données sur l'altitude du radier des bâtiments (Lamé, 2013) et la surface topographique sont représentées. Dans le cas des scénarios intégrant les pompages (Fig. 13.a.b), un débit de pompage est imposé sur chaque maille à partir de la place de la Concorde. Les pompages produisent deux cônes de rabattement d'une profondeur de près de 10 m à l'état initial. Le premier est centré sur la place de la Madeleine et le second au niveau de la gare Saint-Lazare. Sans l'action de ces pompages (Fig. 13.c.), la surface piézométrique à l'état initial suit la surface topographique avec une épaisseur de zone non saturée de trois mètres (Fig. 13.c).

La piézométrie augmente uniformément sur le profil de près de 4 m dans le cas de pompages continus (Fig. 13.a), les cônes de rabattement demeurent inchangés. Le niveau piézométrique à l'état final est légèrement supérieur à celui simulé à l'état initial. Dans le cas d'un arrêt des pompages après le pic

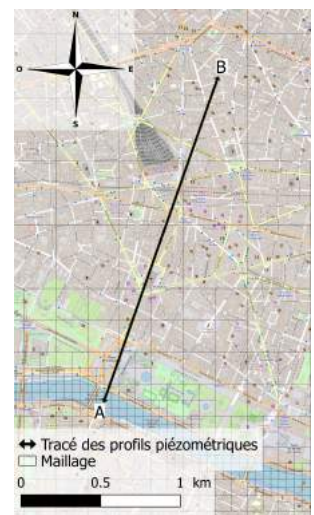


Figure 12. Carte de localisation du profil piézométrique de Paris

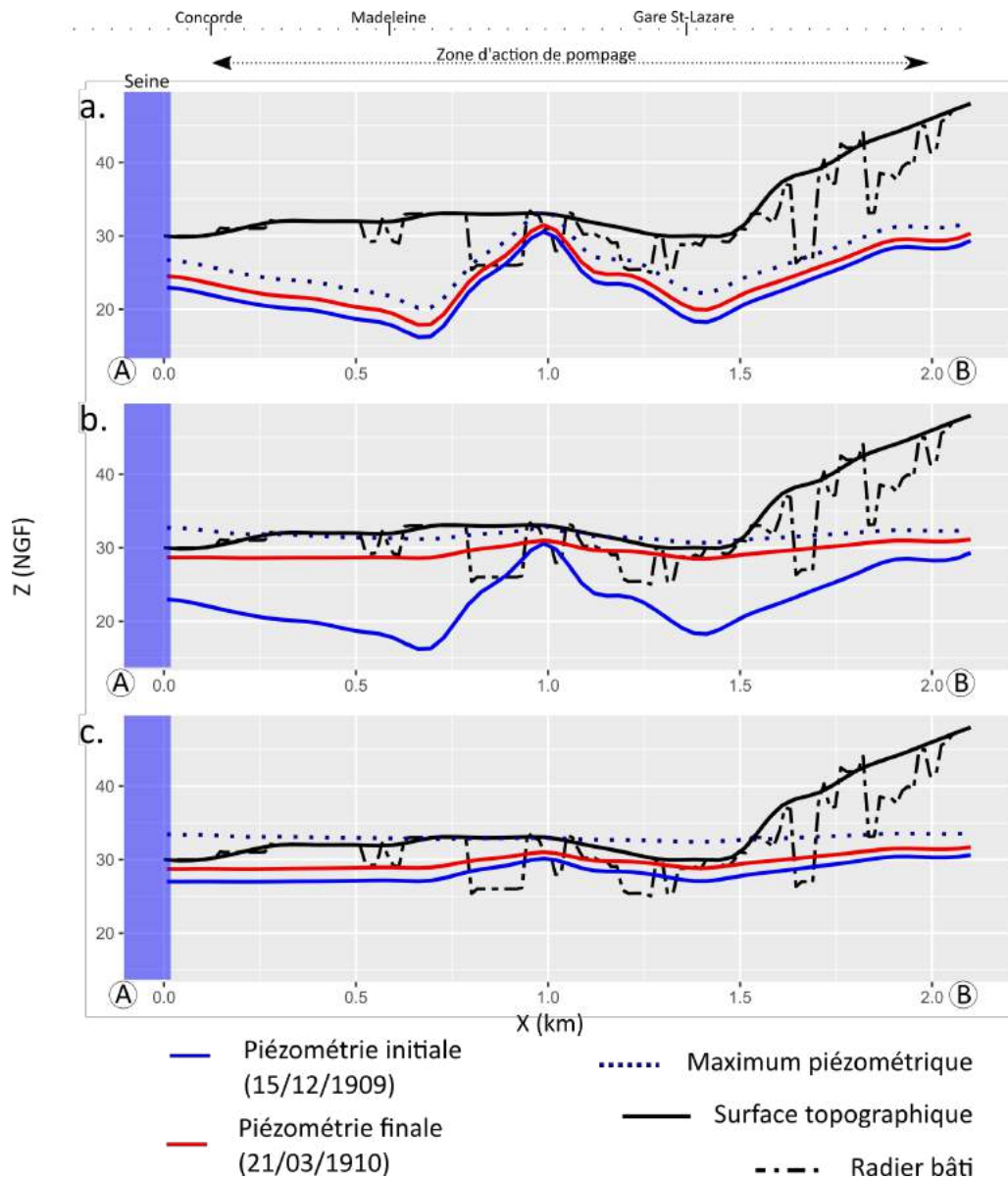


Figure 13. Profils piézométriques situés au centre de Paris, allant de la place de la Concorde à la gare St-Lazare (Fig. 12). a) Crue de 1910 (R1.15) avec pompages. b) Crue de 1910 (R1.15) avec arrêt de pompages. c) Crue de 1910 (R1.15) sans pompages.

de crue (Fig.13.b), la piézométrie maximum dépasse la topographie au niveau de la place de la Concorde ainsi que de la gare Saint-Lazare d'une hauteur inférieure à 1 m. Le niveau piézométrique diminue ensuite jusqu'à rester sous la topographie à l'état final. En l'absence de pompages (Fig.13.c), la piézométrie est initialement haute. Le maximum piézométrique observé dans ce scénario dépasse la topographie de 1 m de la Concorde à la Madeleine, et la dépression de la gare Saint-Lazare se situe 3 m sous le niveau de la nappe. Lors de la décrue, le niveau piézométrique repasse sous le niveau topographique.

La présence, l'absence ou l'arrêt des pompages a des conséquences sur l'état de connexion nappe-rivière au centre de Paris. Les pompages permanents maintiennent la déconnexion nappe-rivière durant toute la période de simulation. Dans ce contexte, la montée des eaux n'a pas d'effet direct sur la piézométrie. L'augmentation du niveau piézométrique est plus faible et plus diffuse que dans les autres scénarios, car l'augmentation du flux d'infiltration de la rivière vers la nappe a lieu sur des tronçons de rivière éloignés sur lesquels la reconnexion a lieu lors de la simulation. Sous l'action des pompages, le niveau piézométrique atteint localement l'altitude des sous-sols les plus profonds de Paris lors du maximum de crue. À la suite de l'arrêt des pompages, l'infiltration de la rivière vers la nappe n'est plus compensée par l'action des pompages ce qui entraîne une remontée importante du niveau de nappe. La reconnexion a lieu lorsque la différence de charge entre la nappe et la rivière est suffisamment faible. Ceci entraîne une diminution du débit d'infiltration depuis la rivière vers la nappe et le niveau de nappe est alors impacté par les variations rapides du niveau d'eau en rivière. Dans les trois scénarios de pompage, les sous-sols représentés sur ces profils sont, au moins temporairement, affectés par la nappe au maximum piézométrique même si cette atteinte est minime si les pompages sont maintenus durant l'épisode de crue. L'inondation des caves est prolongée dans le temps dans le cas des scénarios d'arrêt des pompages et d'absence de pompages, et l'ampleur des inondations de sous-sol est nettement plus importante (Fig.13.b, et c).

4.6 Vulnérabilité du réseau de transport souterrain

Pour chacun des scénarios de crue et de pompage, les cotes des stations de métro sont comparées au maximum de crue obtenu (Fig.14). Sur la figure 14.a est représenté le nombre de simulations pour lesquelles le niveau piézométrique a dépassé la cote inférieure de chaque station. Sur la figure 14.b est représenté le nombre de simulations pour lesquelles le niveau piézométrique a dépassé la cote supérieure de chaque station.

Une représentation du pourcentage de stations impactées par ligne de métro et sur l'ensemble du réseau est fournie (Fig. 15). Un quart du total du réseau du métro apparaît affecté par des venues d'eau pour tous les scénarios. À l'inverse, 62% des stations ne sont jamais affectées par les remontées de nappe. Ces stations se situent principalement sur les périphéries de la plaine alluviale de la Seine ou bien sur les zones de plateau (Fig.14.a). Le nombre total de stations impactées diffère peu en fonction du scénario de crue envisagé. En revanche, les pompages permettent une réduction de près de 10% du nombre total de stations touchées par les venues d'eau. La vulnérabilité des stations de métro aux remontées de nappe est très contrastée en fonction des lignes de métro. Les lignes 2 et 6, en partie aériennes, sont les moins impactées, tandis que 60 % des lignes 1, 8 et 10 peuvent être concernées par des venues d'eau lors des scénarios d'absence ou d'arrêt des pompages. Les cas d'immersion complète des stations de métro sont beaucoup moins fréquents que les cas de simples venues d'eau. En effet, seuls 2% du total des stations sont affectés par ce degré de remontée de nappe dans tous les scénarios représentés. Ces stations se situent sur les extrémités des lignes 13, 3 et 8, en dehors de la zone d'action des pompages du centre de Paris. Ce pourcentage est fortement influencé par l'absence ou la présence de pompage, car il s'élève à près de 10% pour les scénarios intégrant un arrêt ou une absence de pompages (Fig.15.b). Les stations les plus impactées lors de ces scénarios se situent au centre de Paris sur les lignes 6, 7, 8, 9, 10 et 12 (Fig.15.b) À l'exception des stations situées dans les départements de la petite couronne et à proximité de la Seine, les pompages permettent ainsi de préserver la quasi-totalité du réseau du métro.

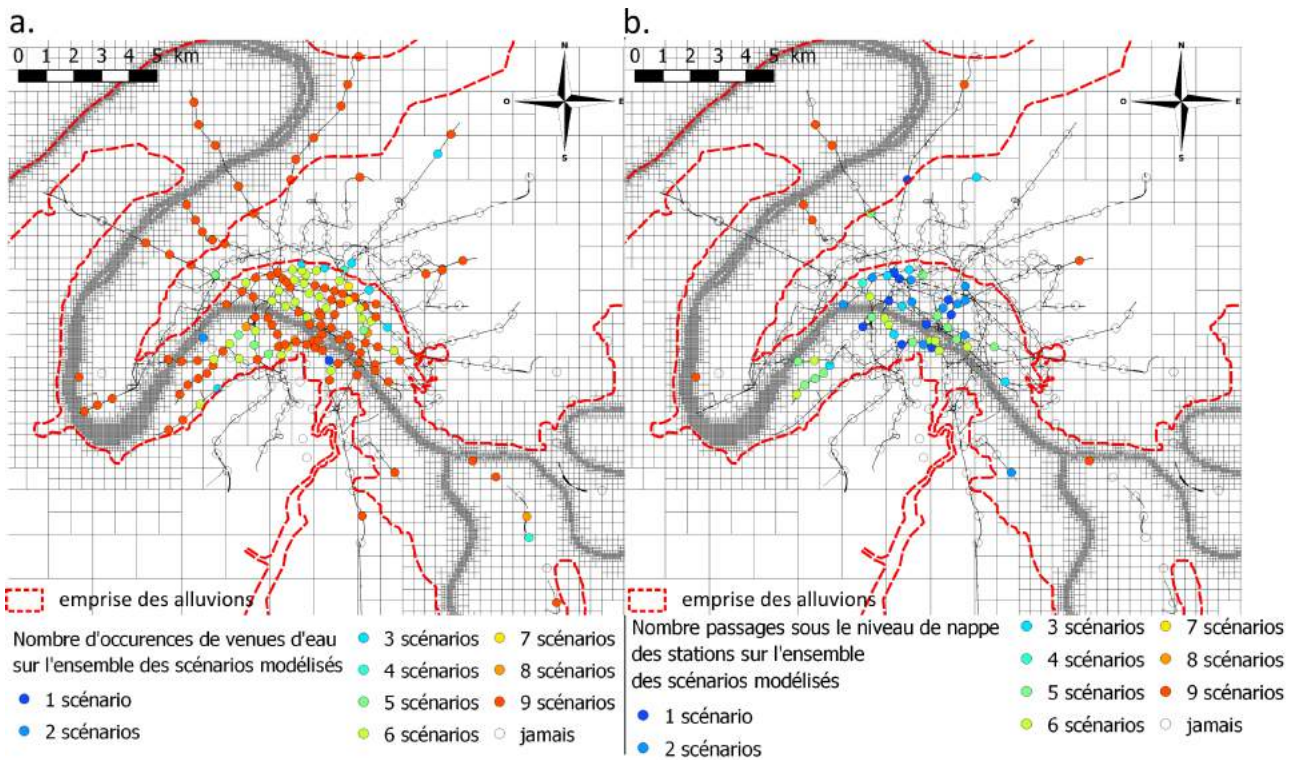


Figure 14. Carte des stations de métro impactées (hormis la ligne 14) par les remontées de nappe lors des scénarios modélisés. Nombre de scénarios ayant entraîné des venues d'eau dans les stations (a), nombre de scénarios ayant entraîné le passage de la nappe au-dessus de la station (b).

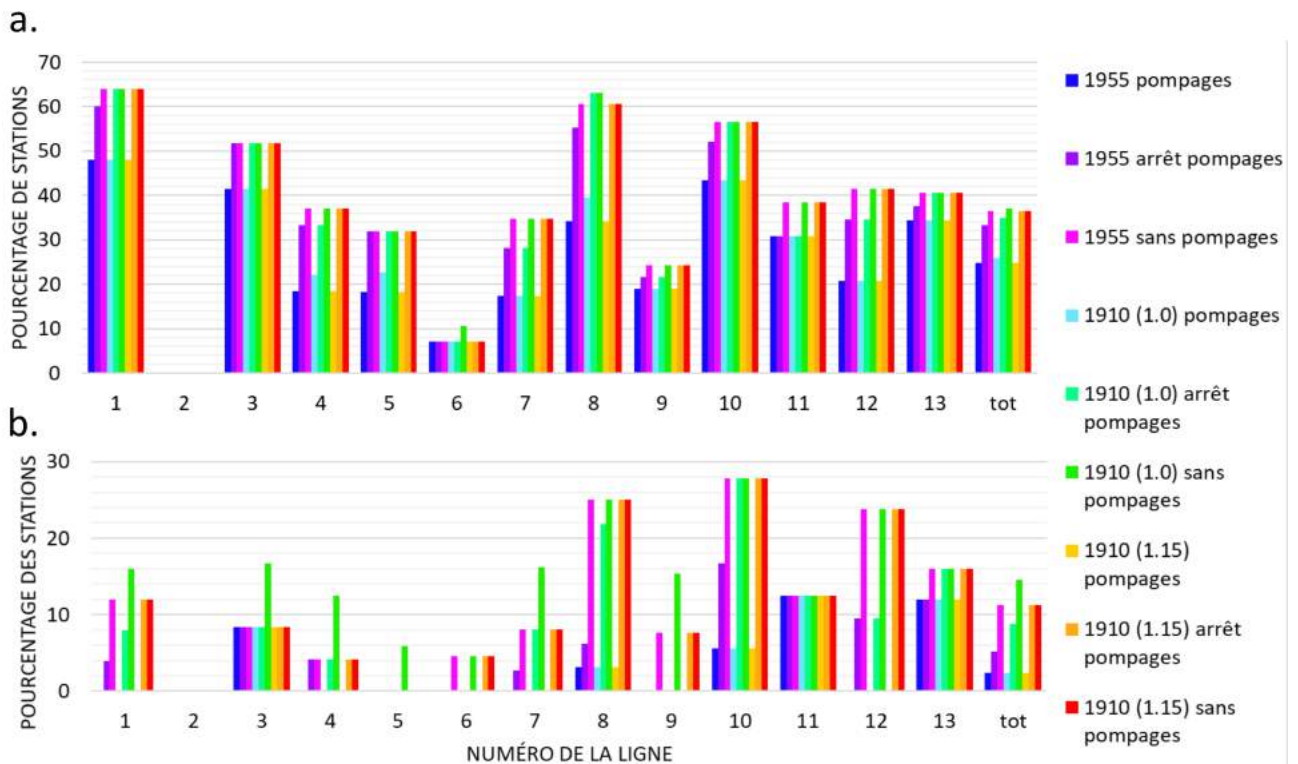


Figure 15. Pourcentages de stations touchées par des venues d'eau (a) ou situées sous le niveau de nappe (b) lors des différents scénarios modélisés pour chaque ligne de métro ainsi que pour l'ensemble du réseau.

Conclusion

Dans l'optique de mieux comprendre les impacts des crues majeures, le fonctionnement hydrogéologique de Paris et de la petite couronne a été étudié. Cette étude actualise et améliore les connaissances hydrogéologiques acquises par [Prunier-Leparmentier \(1988\)](#) et [Lamé \(2013\)](#) durant leurs travaux de thèse, et apportent de nouvelles interprétations sur les conséquences des crues. Ces travaux de recherche s'inscrivent dans le Programme d'actions de prévention des inondations de la Seine et de la Marne franciliennes (PAPI SMF) porté par l'EPTB Seine Grands Lac, et plus précisément dans l'action 1.1.5 de ce programme. Cette action se focalise sur l'étude de la propagation de l'onde de crue dans la nappe alluviale de la Seine en cas de crue dans l'agglomération parisienne. L'étude des processus hydrogéologiques mis en cause lors des crues a conduit à identifier les zones les plus vulnérables et à une meilleure caractérisation du risque d'inondation par remontées de nappe dans l'agglomération parisienne. Cette étude se base sur :

- les données synchrones acquises par les différents membres du comité de suivi de l'action 1.1.5 en octobre 2015, avril 2016, et juin 2016, rassemblées à l'occasion des travaux de cette étude ;
- la carte géologique de Paris ([Soyer, 1953a](#)) ;
- le modèle hydrogéologique de Paris ([Lamé, 2013](#)) ;
- le modèle géologique tridimensionnel du Tertiaire du Bassin Parisien ([BRGM and DRIEE, 2014](#)) ;
- la base de données SONGE ([Société du Grand Paris, 2019](#)).

Les principaux résultats de ces travaux sont : (1) l'élaboration d'une méthode cartographique innovante et générique de la nappe phréatique dans un environnement alluvial urbanisé ([Maillot et al., 2019](#)) ; (2) la caractérisation du fonctionnement hydrogéologique de l'agglomération parisienne à l'aide de cartes piézométriques établies pendant cette étude ; (3) l'amélioration de la plateforme de modélisation CaWaQS par l'incorporation de la conceptualisation de la nappe libre et de la stratification des paramètres physiques d'une couche aquifère ; (4) le développement du premier modèle hydrogéologique couvrant Paris et la petite couronne appliqué en régime transitoire ; (5) l'optimisation des paramètres physiques en tenant compte des valeurs de la base de données SONGE ; (6) la quantification de l'amplitude des remontées de nappe par la simulation de scénarios variés de crues et de pompages ; (7) l'évaluation du risque inondation pour les infrastructures du sous-sols parisien comme les caves, parkings, et stations de métro.

Bibliographie

Babinet, H. (1955). La crue de la Seine de janvier 1955. *La Houille Blanche*, 293–300.

Belgrand, E. (1872). *La Seine : études hydrologiques*. Dunod.

BRGM and DRIEE (2014). Modèle tridimensionnel du Tertiaire du Bassin de Paris.

CCR Caisse Centrale de Réassurance (2018). Retour sur les inondations de janvier et février 2018 - Modélisation des dommages et évaluation des actions de prévention. *Service R&D modélisation*.

Cojean, R., B. Deffontaines, E. Ledoux, P. Combes, M. Deveughèle, D. Diarrassouba, B. Fruneau, P. Goblet, F. Kaveh, A. Levassor, S. Magalhaes, S. Salim, and P. Zokimila (2009). HYDROGEOBAT : Impacts géologiques et géotechniques des mouvements de nappes phréatiques sur le bâti : analyse, mesure, simulation, prévention. Rapport final. Technical report. 285 p.

de Marsily, G., E. Ledoux, A. Levassor, D. Poitral, and A. Salem (1978). Modelling of large multilayered aquifer systems : Theory and applications. *Journal of Hydrology* 36(1), 1 – 33.

Diffre, P. (1969). *Géologie dynamique. Hydrologie de Paris et de sa banlieue*. Thèse de doctorat, Faculté des sciences de l'université de Paris.

- EPTB - Seine Grands Lacs (2014). Programme d'actions de Prévention des Inondations de la Seine et de la Marne Franciliennes (PAPI) - Synthèse.
- Even, S., M. Poulin, J. Garnier, G. Billen, P. Servais, A. Chesterikoff, and M. Coste (1998). River ecosystem modelling : Application of the PROSE model to the Seine river (France). *Hydrobiologia* 373(0), 27–45.
- Filliat, G. (1981). *La pratique des sols et fondations*.
- Flipo, N. (2005). *Modélisation intégrée des transferts d'azote dans les aquifères et les rivières : application au bassin du grand morin*. Thèse de doctorat, École des mines de Paris, UPMC. Hydrologie et hydrogéologie quantitatives.
- Flipo, N., S. Even, M. Poulin, M.-H. Tusseau-Vuillemin, T. Ameziane, and A. Dauta (2004). Biogeochemical modelling at the river scale : Plankton and periphyton dynamics : Grand Morin case study, France. *Ecological Modelling* 176(3), 333–347.
- Flipo, N., N. Gallois, B. Labarthe, F. Baratelli, P. Viennot, J. Schuite, A. Rivière, R. Bonnet, and J. Boe (2020a). Pluri-annual water budget on the Seine basin : past, current and future trends. In F. N., L. P., and L. L. (Eds.), *The Seine River Basin*, Handbook of environmental chemistry. Springer.
- Flipo, N., N. Gallois, and J. Schuite (2020b). Recalibration du bilan hydrologique de surface du bassin de la seine à l'aide de la méthode HYMIT. Technical report, PIREN Seine.
- Flipo, N., A. Mouhri, B. Labarthe, S. Biancamaria, A. Rivière, and P. Weill (2014). Continental hydrosystem modelling : the concept of nested stream-aquifer interfaces. *Hydrology and Earth System Sciences* 18(8), 3121–3149.
- Flipo, N., A. Rivière, N. Gallois, B. Labarthe, F. Baratelli, S. Wang, M. Maillot, T. Verbeke, P. Goblet, A. Jost, and L. Abasq (2019, December). CATCHMENT WATER QUALITY SIMULATOR : CaWaQS. In P. Seine (Ed.), *Rapports de synthèse de fin de phase VII du programme PIREN Seine*, Volume 4 of *Mesures hydrogéophysiques et biogéochimiques haute-fréquence et "time lapse" des interfaces nappe-rivière : évolution des ressources en eau*, pp. 11–46.
- Gallois, N., N. Flipo, J. Schuite, A. Rivière, P. Viennot, F. Baratelli, B. Labarthe, R. Bonnet, and J. Boe (2019, December). 200 ans d'évolution de la ressource en eau du bassin de la Seine. In P. Seine (Ed.), *Rapports de synthèse de fin de phase VII du programme PIREN Seine*, Volume 4 of *Mesures hydrogéophysiques et biogéochimiques haute-fréquence et "time lapse" des interfaces nappe-rivière : évolution des ressources en eau*, pp. 233–257.
- Jazayeri, A. and A. D. Werner (2019). Boundary Condition Nomenclature Confusion in Groundwater Flow Modeling. *Groundwater* 57(5), 664–668.
- Keating, A., R. Mechler, J. Mochizuki, H. Kunreuther, J. Bayer, S. Hanger, I. McCallum, L. See, K. Williges, S. Hochrainer-Stigler, and C. Egan (2014, May). Operationalizing resilience against natural disaster risk : Opportunities, barriers, and a way forward.
- Labarthe, B. (2016). *Quantification des échanges nappe-rivière au sein de l'hydrosystème Seine par modélisation multi-échelle*. Thèse de doctorat, Mines ParisTech, PSL Research University.
- Lamé, A. (2013, December). *Modélisation hydrogéologique des aquifères de Paris et impacts des aménagements du sous-sol sur les écoulements souterrains*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Ledoux, E. (1980). *Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements sur un bassin hydrologique*. Thèse de doctorat, École des mines de Paris, UPMC.

- Lerner, D. and M. Barrett (1996, Jan). Urban groundwater issues in the United Kingdom. *Hydrogeology Journal* 4(1), 80–89.
- Maillot, M. (2019). *Étude des remontées de nappe de Paris et de la Petite Couronne lors des épisodes de crue de la Seine et de la Marne*. Ph. D. thesis. Thèse de doctorat dirigée par Flipo, Nicolas Rivière, Agnès et Vincent, Marc Géosciences et géoingénierie Paris Sciences et Lettres (ComUE) 2019.
- Maillot, M., N. Flipo, A. Rivière, N. Desassis, D. Renard, P. Goblet, and M. Vincent (2019). Technical note : Water table mapping accounting for river-aquifer connectivity and human pressure. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 2019, 1–21.
- Marti, R. and T. Lepelletier (1997). L'hydrologie de la crue de 1910 et autres grandes crues du bassin de la Seine. *La Houille Blanche* (8), 33–39.
- Mégnién, C. (1980). *Synthèse géologique du bassin de Paris : Lexique des noms de formation*, Volume 3. BRGM.
- Prunier-Leparmentier, A.-M. (1988). *Les problèmes géologiques et géotechniques de la ville de Paris*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris. dirigée par Arnould, Marcel.
- Renard, D., N. Bez, N. Desassis, H. Beucher, F. Ors, and X. Freulon (2001 - 2019). RGeostats : The Geostatistical R package [11.2.9]. Free download from : <http://cg.ensmp.fr/rgeostats>.
- Setec Hydratec (2002-2019). HYDRARIV. Outil de simulation des systèmes fluviaux.
- Société du Grand Paris (2019). BD SONGE - Interface de Saisie et de Gestion des Données de Sondages Géotechniques et Environnementaux.
- Soyer, R. (1953a). Carte géologique de la France à 1/50000. In *Feuille 183 Paris*. Bureau des Recherches Géologiques et Minières Orléans.
- Soyer, R. (1953b). *Géologie de Paris*. Impr. nationale.
- Vilmin, L., N. Aissa-Grouz, J. Garnier, G. Billen, J. M. Mouchel, M. Poulin, and N. Flipo (2015b). Impact of hydro-sedimentary processes on the dynamics of soluble reactive phosphorus in the Seine River. *Biogeochemistry* 122, 229–251.
- Vilmin, L., N. Flipo, C. de Fouquet, and M. Poulin (2015a). Pluri-annual sediment budget in a navigated river system : The Seine River (France). *Science of The Total Environment* 502, 48–59.