

EVOLUTION RECENTE DU RESEAU PIEZOMETRIQUE DE L'INSPECTION GENERALE DES CARRIERES – VILLE DE PARIS

*Recent evolution of the piezometric network of the Inspection générale des
Carrières – City of Paris*

Auteurs : PRUNIER LEPARMENTIER Anne-Marie¹, ANGIBAULT Inès², HANNOYER Marc³

1 IGC, 86 rue Régnault 75013 Paris, France, anne-marie.leparmentier@paris.fr

2 ex IGC, 86 rue Régnault 75013 Paris, France – SGR Marseille

3 IGC, 86 rue Régnault 75013 Paris, marc.hannoyer@paris.fr

Résumé : L'Inspection générale des Carrières, service de la Ville de Paris, gère un réseau piézométrique de 310 piézomètres actuellement. Elle en a assuré l'implantation de façon rigoureuse et assure maintenant sa maintenance. Depuis 1978, l'IGC utilise ces données pour suivre les différents problèmes parisiens, notamment les nappes en période de crue, et participe aux cellules de crise de la Ville de Paris. Pendant les crues de 2016 et 2018, l'IGC a transmis quotidiennement à ses partenaires les graphiques évolutifs des nappes qui les concernent pour la gestion de leurs propres ouvrages. Parallèlement, l'IGC a pu synthétiser les données de ces 2 crues, développer une cartographie proche de la réalité des nappes qu'elle a traduite en nombre de sous-sols impactés. Depuis 2016, l'IGC a équipé progressivement ces piézomètres en télé-relève et peut, depuis l'automne 2022, en faire bénéficier de façon autonome ses partenaires ; ceci permet à l'IGC de se consacrer à la cellule de crise et de faire des prévisions pour la crue en cours, en fonction des données météorologiques et des mesures en amont de Vigicrues. Ce réseau permettra de suivre ce que l'avenir réserve avec le réchauffement climatique.

Mots-clefs : réseau piézométrique, nappes, crues, crise, consultation de données

Abstract : The Inspection générale des Carrières, a city of Paris department, manages a piezometric network of currently 310 piezometers. It ensured its rigorous implantation and manages now its maintenance. Since 1978, the IGC uses this data to monitor the various Parisian issues, such as groundwaters during floods, and participate to the City of Paris crisis unit. During the 2016 and 2018 floods, the IGC transmitted to its partners, on a daily basis, the groundwater evolutive graphs relevant to them for the management of their own work. In parallel, the IGC has been able to synthesize the data of the 2 floods, develop a close to reality map of the groundwaters that it translated into number of impacted undergrounds. Since 2016, the IGC progressively equipped the piezometers with remote readings that its partners can beneficiate autonomously since autumn 2022 ; which allows the IGC to focus on the crisis unit and do forecasts for on going floods, according to meteorological data and unstream measures from Vigicrues. This network will allow to monitor what the future will be like with global warming.

Keywords : piezometric network, groundwaters, flood, crisis, data reading

L'Inspection générale des Carrières (IGC), qui existe depuis 1777, s'est peu à peu imposée comme étant le service le plus adéquate pour traiter les questions géologiques et hydrogéologiques de la Ville de Paris.

Pendant les années 1970, les résidents de la Ville ont rencontré de nombreux problèmes, avec des parkings ennoyés et des dégradations en surface. C'est ce qui a amené l'Agence de Bassin Seine-Normandie de l'époque à missionner l'IGC pour surveiller les niveaux de nappe sous Paris. Ainsi naissait le réseau de la Ville de Paris fin 1978. Depuis il s'est largement développé.

1 - Réseau piézométrique de l'IGC

Avec l'expérience des deux premières phases d'installation des piézomètres sur la plaine alluviale et la Butte Montmartre, l'IGC a compris comment fonctionnait le système hydrogéologique de Paris. Si on dénombre trois nappes principales (Craie - Éocène - Oligocène) séparées par deux niveaux argileux (Argile Plastique sparnacienne et Glaives Vertes stampiennes) bien définis, en site urbain, avec de nombreux chantiers et ouvrages souterrains, il est nécessaire de rechercher également les semi-imperméables ralentissant les échanges verticaux dans le multicouche éocène.

Les principales nappes sont (Figure 1) :

- Nappe de la Craie,
- Nappe de l'Yprésien inférieur (Sables d'Auteuil), avec pour mur les Argiles Plastiques et supérieur (Sables Supérieurs au Sud, Sables de Cuise au Nord) avec pour mur les Fausses Glaives,
- Nappe lutétienne (Calcaire Grossier, Marnes et Caillasses, base des Sables de Beauchamp) ayant pour mur soit l'Argile de Laon, soit la base du Calcaire Grossier grésifiée,
- Nappe du Bartonien (haut des Sables de Beauchamp, Calcaire de Saint Ouen, Sables Verts de Monceau) ayant pour mur l'écran médian argileux des Sables de Beauchamp,
- Nappe des Travertins de Brie ayant pour mur les Glaives Vertes,
- Nappe des Sables de Fontainebleau ayant pour mur les Marnes à Huîtres.

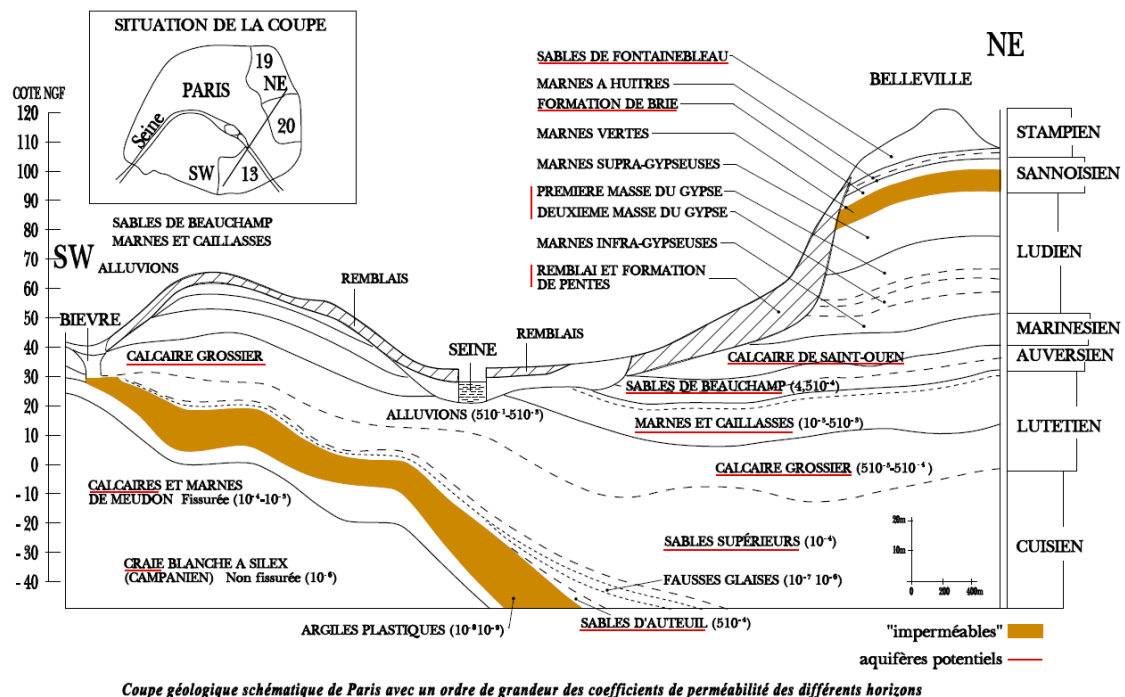


Figure 1: coupe géologique schématique de Paris avec un ordre de grandeur des perméabilités des différents horizons - Prunier Leparmentier AM, 1988 – Référence 10

Géographiquement, se différencient ainsi 3 zones : les deux plateformes, lutétienne au Sud (III) et bartonienne au Nord (V), avec au centre la plaine alluviale (partie du I, II et IV), lit majeur de la Seine. Figure 2.

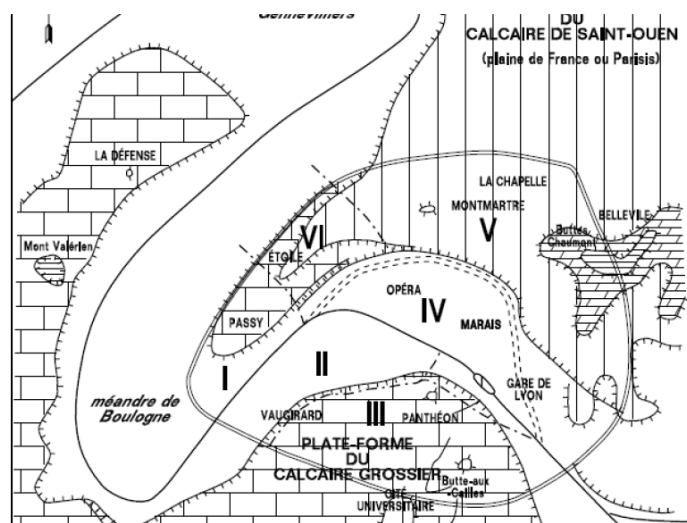


Figure 2: plateformes géologiques sous Paris – Diffre 1979 – Référence 5

Une fois cela bien défini, l'IGC a développé son réseau en fonction des problématiques hydrogéologiques et géotechniques de Paris. La première vague d'installation correspond à la remontée des nappes des années 1970 (11); la seconde à celle de la stabilité des buttes (essentiellement Montmartre). Une troisième, plus importante, de 1988 à 1998 développe l'installation de deux ou trois piézomètres par site (doublets ou triplets) afin de suivre les différentes nappes sur Paris. Elle concerne tout le territoire et vise tous les problèmes : dissolution du gypse antéludien, écoulements des nappes perchées et surtout les crues. Depuis 2021, la quatrième phase correspond à la phase actuelle où on maintient le réseau et on l'adapte à certains partenaires, dans le cadre du programme d'actions de prévention des inondations « Papi 2 » Seine et Marne Francilienne. Le réseau compte aujourd'hui 310 piézomètres (Figure 3), répartis dans les différentes nappes : de la nappe de la Craie à la nappe des Sables de Fontainebleau, la nappe alluviale et les circulations dans les remblais, autour de la Seine, et de carrières à ciel ouvert. Réalisés à partir de sondages carottés, les piézomètres font l'objet d'une surveillance accrue et de nettoyages périodiques. Le réseau devrait encore s'agrandir d'une dizaine de piézomètres autour des sites à grands enjeux de l'APHP (Hôpitaux de Paris) ou problématiques en phase de grande crue (Papi 2), avec la rue Watt (Paris 13^{ème}) par exemple, un des rares sites inondables directement par la surface (zone basse sous les voies SNCF non protégées à ce niveau).

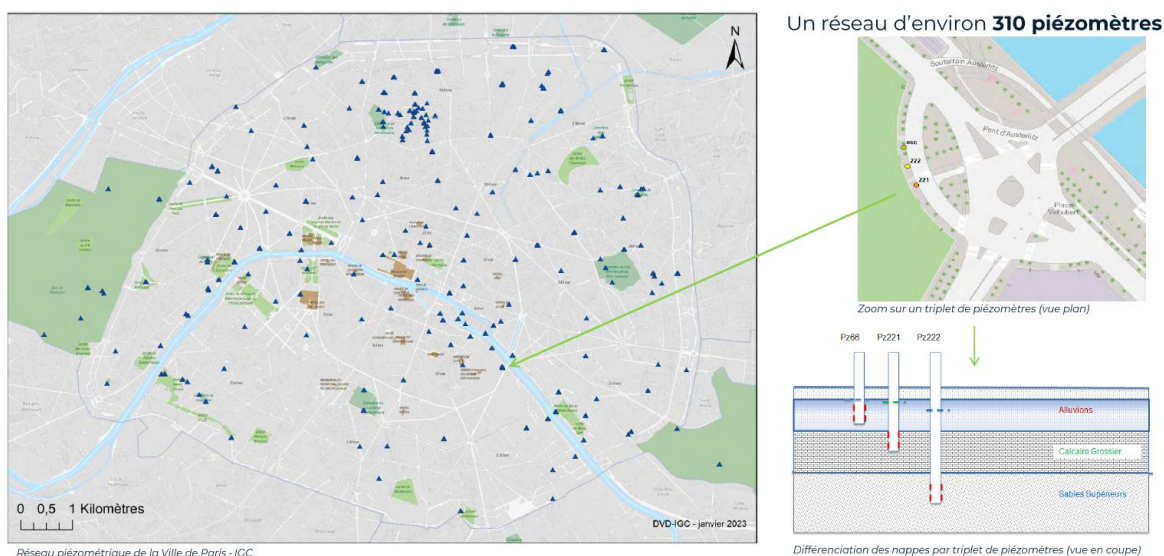


Figure 3 : Réseau piézométrique de l'IGC - Ville de Paris en 2023 - document IGC (1)

2 - Expérience de l'IGC concernant la piézométrie parisienne

Depuis 45 ans l'IGC suit ce réseau de piézomètres, avec des mesures mensuelles au début, quotidiennes en période de crue à partir de 1993, et bi quotidiennes aujourd'hui.

Il faut rappeler que Paris a cette particularité de regrouper, en 100 km², un réseau souterrain dense (carrières, égouts, autres réseaux en tout genre dont de transports en commun), mais aussi de nombreux parkings souterrains, des abris stratégiques enterrés, des ouvrages en théorie décontaminés en sous-sol et enfin un réseau électrique enterré essentiellement entre 0 et -6m. Paris est théoriquement protégé en surface par des batardeaux jusqu'à la crue centennale. Pendant la période d'étiage, le niveau des nappes est toujours le même, seuls varient les débits des pompages, données très difficiles à obtenir et souvent globalisées à l'année.

L'IGC a acquis une certaine expérience sur les variations intra nappes et saisonnières. En période d'étiage les niveaux des différentes nappes peuvent paraître proches, mais en cas de pompage ou de crue, il n'en est plus de même. Chaque nappe va réagir en fonction de sa perméabilité propre et les horizons semi-perméables prennent toute leur puissance.

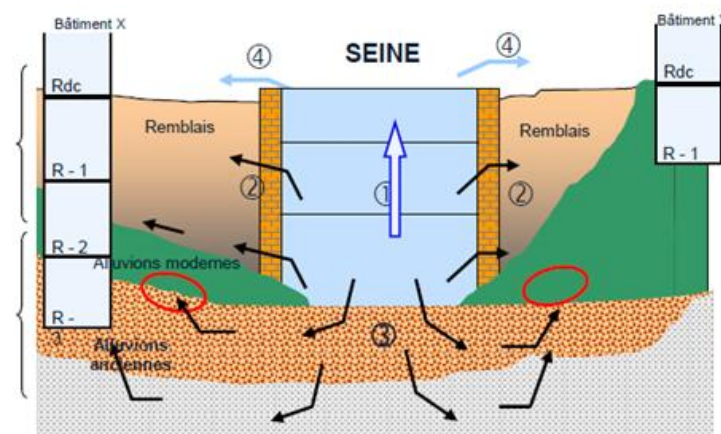


Figure 4: schéma grand public représentant les deux niveaux d'alimentation en eau des sous-sols par la Seine en période de crue - PP de la préfecture de Police 2004 -Référence 9 – zones de blocage sous les alluvions modernes entourées en rouge

Divers incidents, lors des crues même mineures, nous ont montré que le rapport Seine-nappes n'est pas si évident. La nappe alluviale semble déconnectée en période d'étiage (0,5m sous le niveau de la Seine) des deux côtés des berges en centre-ville. En fait, de par son développement sur le fleuve et les marais, Paris a fortement modifié les berges de la Seine, certains anciens bras et les marais. On retrouve par conséquent une forte épaisseur de remblais, qui reposent sur les alluvions modernes fines, vaseuses, tourbeuses même parfois, à la perméabilité globale faible (Figure 4). Le fond de la Seine est dragué, il forme le point de contact avec les alluvions anciennes perméables et le départ des ondes de crue vers le sous-sol.

Toutefois en raison des nombreux pompages actifs en centre-ville (2), la nappe est asséchée dans les premiers arrondissements de Paris. La première nappe rencontrée est la nappe lutétienne. En raison de sa perméabilité de fissure, c'est la dernière à réagir en période de crue. Les sables yprésiens vont transmettre les premiers l'onde de crue. Les alluvions anciennes doivent se remettre en charge avant.

Par conséquent, en cas de crue, la Seine va certes alimenter les nappes à partir du fond de son lit, mais aussi des circulations dans les remblais sur les alluvions modernes, à partir de ses berges. Aussi, en 2003, deux cartes de risques d'inondation des sous-sols ont été établies par l'IGC à partir des retours d'expérience des années 1990 et de la crue de 2001 : une carte d'inondation par la saturation des Alluvions Anciennes et une carte d'inondation par les circulations dans les remblais :

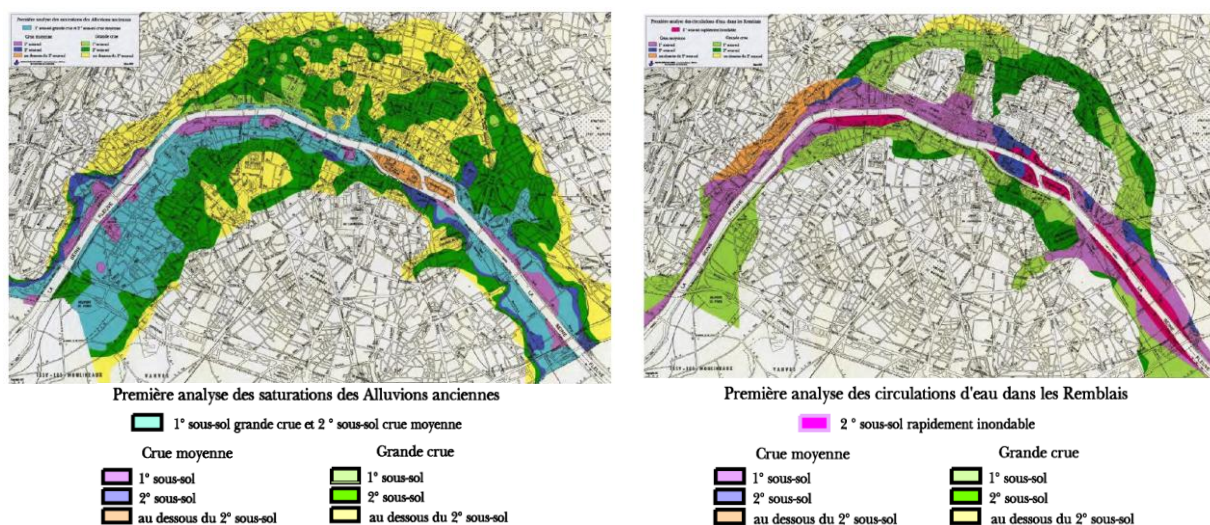


Figure 5: cartes d'inondations des sous-sols réalisées en 2003 par l'IGC pour la cellule de crise de la Préfecture de Police de Paris Référence 1, celle de gauche représente les circulations d'eau en base des remblais sur les alluvions modernes, celle de droite représente les remontées de nappe - IGC mars 2003 – exclusivement en sous-sol- document IGC (1)

La hauteur des sous-sols a été prise forfaitairement égale à 3 mètres. Au-delà de 9 mètres de profondeur, il a été par ailleurs pris pour hypothèse que les propriétaires ont protégé leurs sous-sols.

Une distinction a par ailleurs été faite entre les crues moyennes et les grandes crues. Le basculement en grande crue résulte :

- De l'inondation de la ligne C du RER qui longe la Seine (lorsque la Seine atteint au pont d'Austerlitz une hauteur entre 6,20 6,50 m.
- De l'arrêt des pompages hors RATP suite à coupures électriques

Après consultations sur des sous-sols historiques envoyés pendant la crue de 1910, il s'avère que ces cartes semblent correctes (exemple avec les sous-sols de la Banque de France).

3 – Crues de 2016 et 2018

Treize et quinze ans plus tard après ces cartes, Paris connaissait deux crues décennales, 2016 (6,10m) et 2018 (5,86m), la précédente étant celle de 1982 (6,20m).

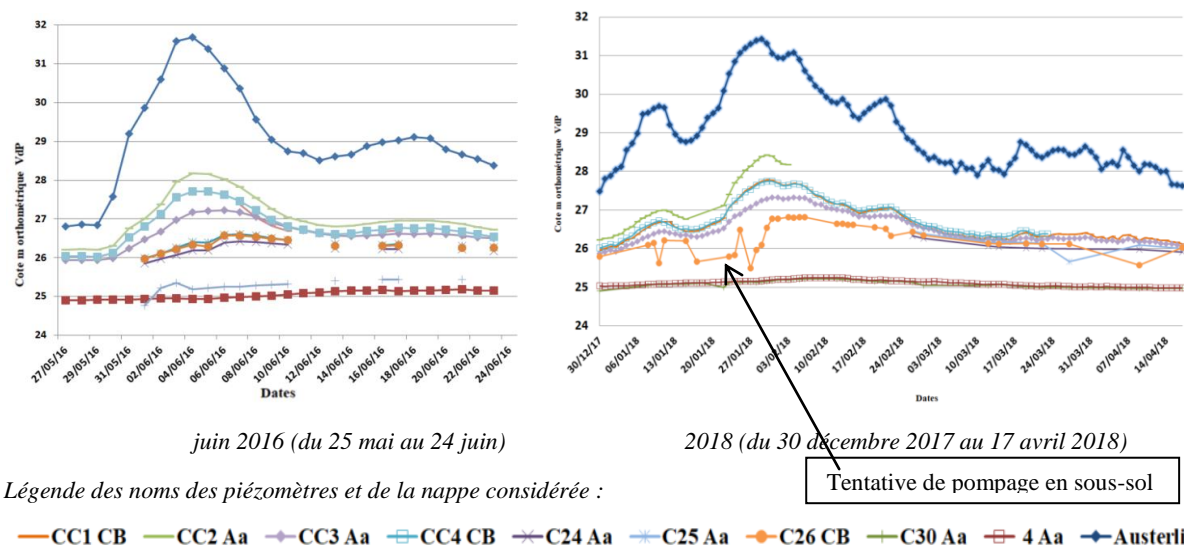


Figure 6: Comparaison des crues de juin 2016 et de janvier 2018, réalisée dans le 15^{ème} arrondissement sur des piézomètres dans les alluvions anciennes et la Craie Blanche, sur une ligne perpendiculaire à la Seine (cotes en VdP= NGF - 0,33m)– Doc IGC (1)

La première est une crue de fin de printemps, brusque (montée de 1m par jour à Paris) et brève, avec un pic majeur, qui n'a concerné que la proche vallée de la Seine. La seconde est une crue classique d'hiver à plusieurs pics, impactant tout le bassin versant (0,50m par jour à Paris).

Ces différences de rapidité et de nombres de pics vont avoir des conséquences particulières sur les nappes à Paris. Le Figure 6 montre les deux enregistrements des nappes des alluvions anciennes et de la Craie dans le 15^{ème} arrondissement. La crue de 2016 influence plus faiblement les nappes au moment du pic et ces dernières retrouvent rapidement leur niveau initial. En 2018, le premier pic amorce en douceur les nappes, le deuxième pic accentue le processus dans les nappes et l'onde de crue s'éloigne davantage du lit mineur. À 1 km environ, l'onde de crue devient trop faible ou profonde.

Si on regarde de plus près la crue de 2018, cette fois ci à côté du Pont d'Austerlitz, on retrouve l'amorçage du premier pic dans les nappes, l'accentuation du deuxième, puis à partir du troisième, les nappes restent au-dessus du niveau de la Seine.

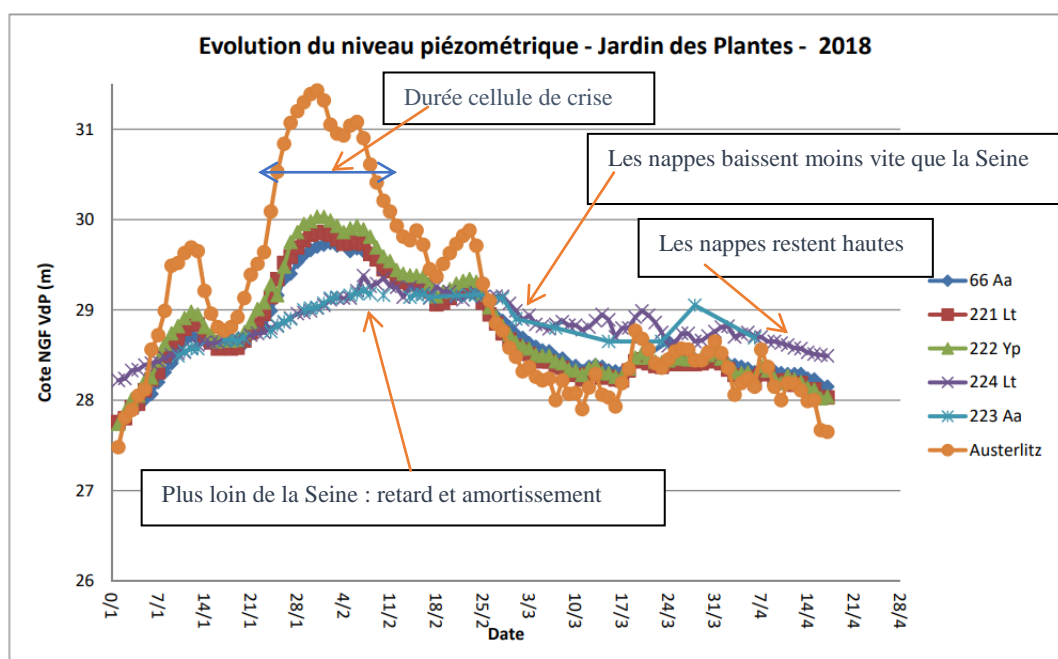


Figure 7: comportement des nappes lors d'une crue longue type 2018 (NGF 69 = VdP +0,33m)– Doc IGC (1)

Autre phénomène, cette crue venant de tout le bassin versant et tôt dans la saison, les barrages réservoirs en amont ont pu jouer leur rôle de régulateur pour amortir les pics hydrologiques, mais ces barrages réservoirs vont être obligés de lâcher en douceur ces eaux cumulées en janvier-février. La Seine est maintenue à un niveau supérieur à la normale et va continuer à alimenter les nappes. Ces dernières restent hautes, ici environ 1m au-dessus de leur cote normale (Figure 7). Le rééquilibrage ne se terminera que 4 mois après le pic le plus important qui concernait la cellule de crise.



Photo 1 : inondation de la carrière du Jardin des Plantes (nappe lutétienne), percolations en ciel (nappe alluviale) – Doc IGC (1)

Cette possibilité de retenue des eaux n'a pas pu être réalisée pendant la crue de 2016, les flots se sont déversés sans retard et rapidement. L'IGC, grâce à ses piézomètres dans les remblais, a observé une remontée importante et rapide autour de la Seine, mais sans atteindre l'ancien bras de Seine Nord totalement remblayé. Cette remontée a souvent impacté des premiers niveaux de sous-sols. Or à Paris, c'est au premier niveau de sous-sol que l'on retrouve les compteurs électriques, les arrivées d'égout et de l'eau potable. Ce phénomène peut semer le désordre rapidement puisque la piézométrie parisienne dépend directement des différents pompages dans les nappes. Cette crue provenait de fortes pluies orageuses essentiellement sur l'Orléanais et l'Essonne. Le changement climatique qui s'amorce aujourd'hui nous promet-il une plus grande fréquence de ce genre de crue ?

4 - Équipement des piézomètres en télé-relève, plateforme IGC et échanges avec les partenaires

Sur ces 310 piézomètres, l'IGC en a équipé 251 dans le lit majeur de la Seine et autres zones susceptibles d'être affectées par les crues. Cet équipement de télé relève a été installé à partir de 2016 (23) avec l'aide du Papi 1 de l'Ile de France. En 2018, nous en avons 120 installés dans le lit majeur Est et Sud, la partie Ouest du réseau était également suivi par le chantier de prolongation de la ligne E du RER.

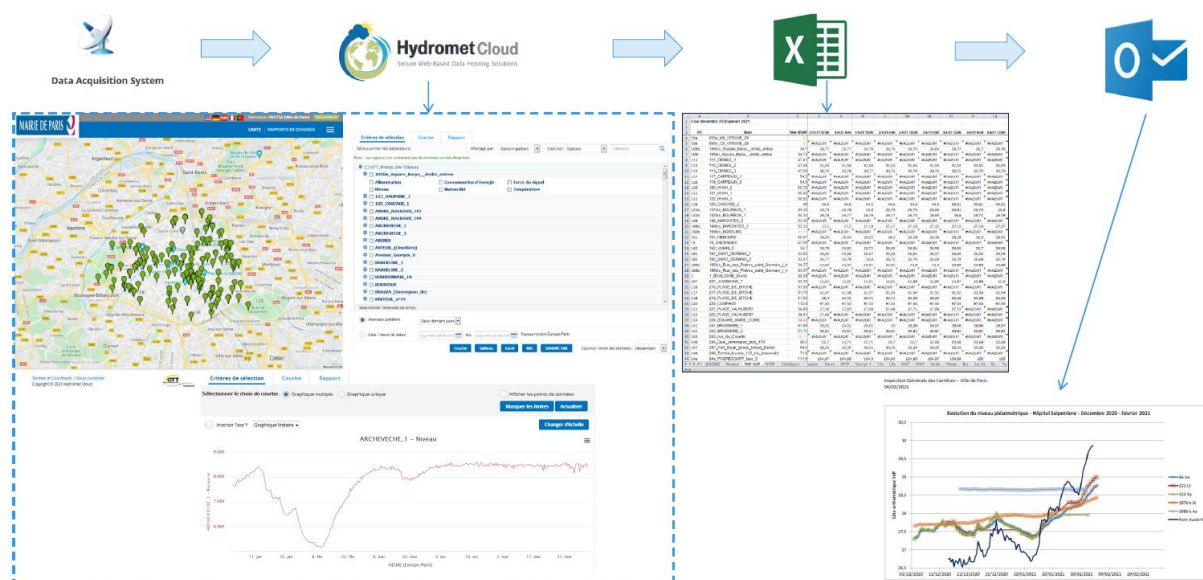


Figure 8: configuration de l'interface piézomètre - IGC - partenaire avant l'automne 2022 - Doc IGC (1)

Les données sont transmises deux fois par jour à une plateforme : hydromet Cloud (plateforme de notre fournisseur d'enregistreurs OTT) jusqu'à l'automne 2022 (Figure 8). À partir de ces données, il était nécessaire de faire plusieurs manipulations de fichiers afin d'obtenir des graphiques Excel, que nous devions envoyer chaque jour à nos correspondants. Nos envois correspondaient aux zones comportant les plus forts enjeux (transports en commun, ouvrages de deux ou trois sous-sols relativement proches de la Seine, Musées, hôpitaux, ouvrages stratégiques). Certaines zones de risques ne sont pas encore équipées, notamment celles où des failles de protection en surface ont été repérées (exemple de la rue Watt précitée), entraînant des alimentations de la première nappe non contrôlées.

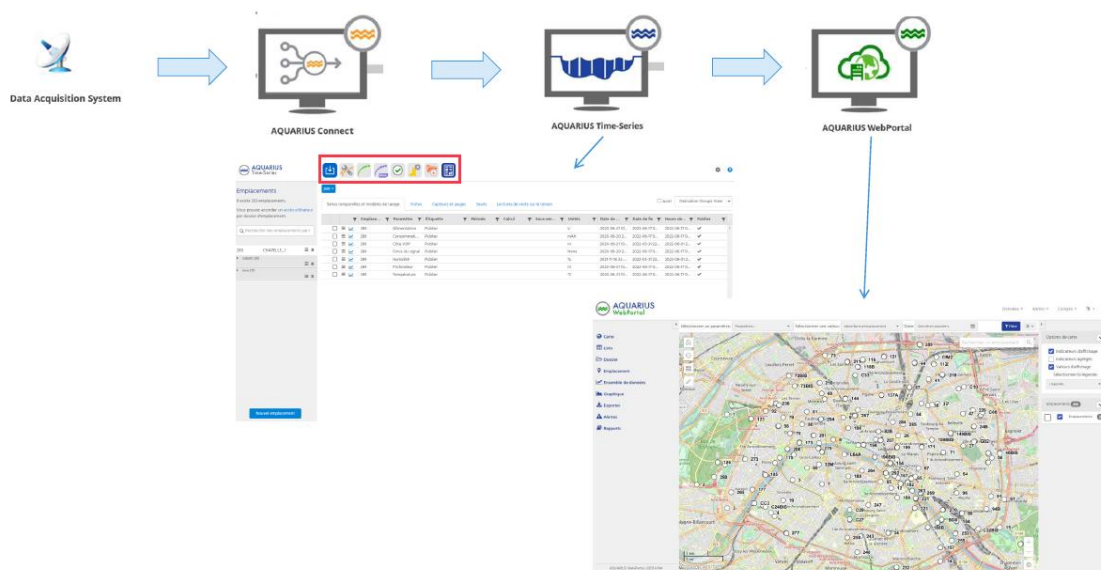


Figure 9: configuration de l'interface piézomètre - IGC - partenaire depuis l'automne 2022 - Doc IGC (1)

Depuis, l'IGC a acquis une plateforme Aquarius (plateforme développée par Aquatic Informatics) avec plusieurs interfaces permettant à l'IGC un meilleur contrôle de son réseau (Figure 9) :

- Une interface de gestion des piézomètres et de traitement des données de terrain (visite sur site, mesures manuelles, ...) – Times Series
- Une interface de partage de la donnée par une visualisation simplifiée. Chaque partenaire de l'IGC possède un compte de connexion qui lui est propre et qui a été créé en fonction de ses besoins. Ainsi, un accès est donné vers les piézomètres proches de leurs ouvrages où ils peuvent consulter en temps réel les données sous forme de carte, de différents graphiques définis à l'avance et de listes - AqWebPortal

Ces partenaires sont : la RATP, la SNCF, quelques ministères, certains Musées parisiens, le service des parkings de Paris, certains bâtiments de la Ville de Paris. Nous échangeons également avec des Musées nationaux, l'APHP, Radio France. D'autres partenariats sont à venir.

Ces partenaires sont liés par une convention d'échanges de données. Certains ont déjà des piézomètres, leur réseau est intégré à la plateforme et à leur accès AqWebPortal. Si le partenaire donne son accord, son réseau peut être ouvert en partie aux autres partenaires.

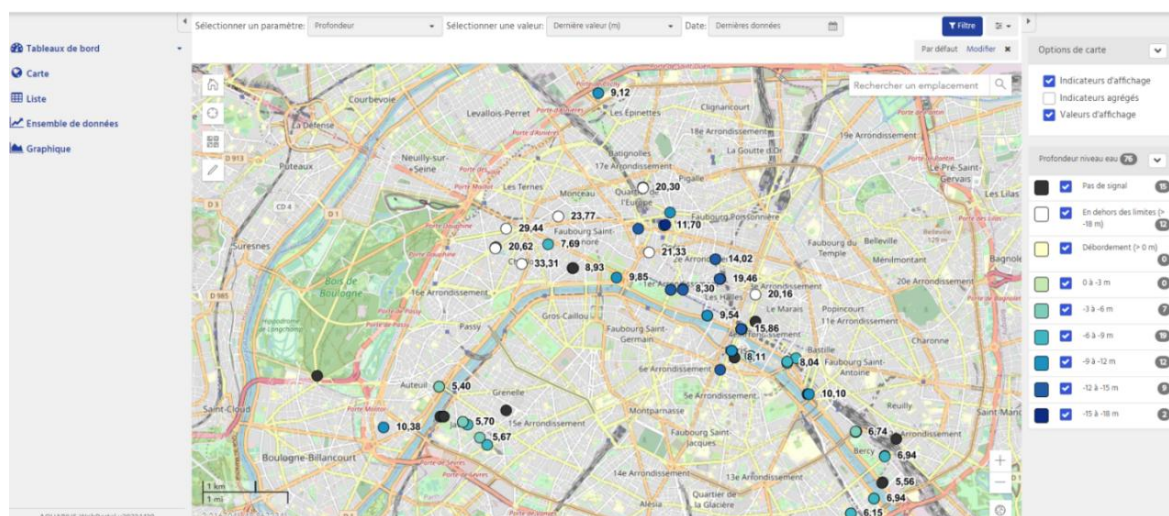


Figure 10 : exemple de la cartographie d'un partenaire sur AqWebPortal - ici à chaque piézomètre est indiquée la profondeur de l'eau mesurée - Doc IGC (1)

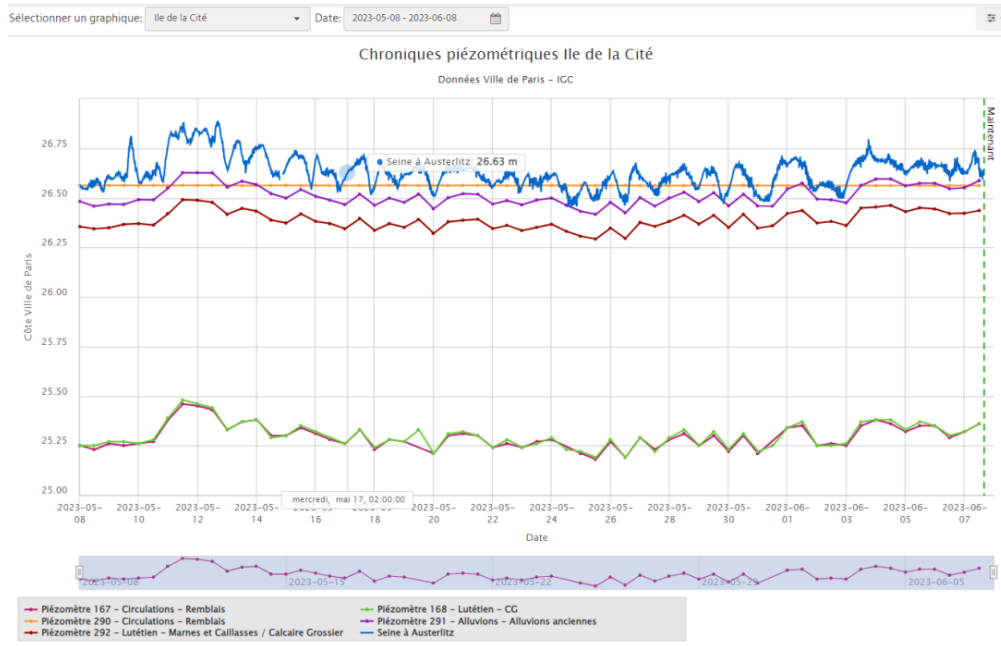


Figure 11: exemple de graphique pré-établi pour un partenaire sur AqWebPortal- le niveau de la Seine à Austerlitz a été ajouté (Vigicrue) - Doc IGC (1)

Cet accès par AqWebPortal libère l'IGC d'une transmission quotidienne en période de crue, où elle doit déjà participer à la cellule de crise de la Ville de Paris, se déplacer sur incidents et réaliser régulièrement des cartes de risques d'inondation des sous-sols pour être publiées sur le site paris.fr (Figure 12). Ces publications sont faites pendant toute la période de la crise mais aussi lors de la décrue, indépendamment de la dissolution de la cellule de crise. Les nappes ont effectivement une réaction lente à la décrue. L'onde de crue continue à avancer dans le sous-sol mais n'est plus alimentée par le fleuve. Il est donc fréquent d'avoir des niveaux de nappes, loin de la Seine qui continuent de monter alors que la décrue est amorcée, ce que le grand public peut avoir du mal à comprendre.

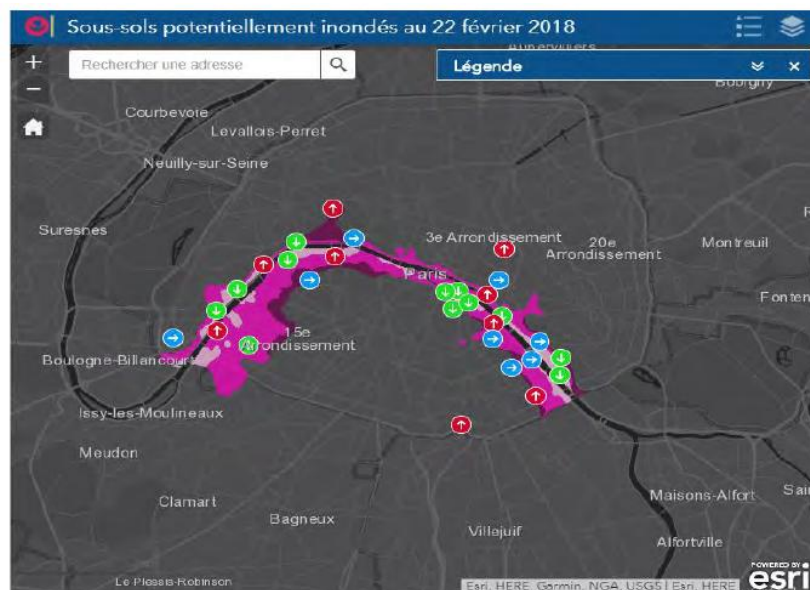


Figure 12: exemple d'une carte des sous-sols potentiellement impactés qui paraît quotidiennement sur paris.fr, après dissolution de la cellule de crise, avec la tendance des nappes - Doc IGC (1)
flèches rouge (continue à monter), bleues (stagne), verte (descend) – rose clair de 0 à -3m, rose fuschia de -3 à -6m, rose foncé de -6 à -9m

Pour l'instant aucun niveau d'alerte n'a été intégré, le logiciel ne permet pas encore d'individualiser cette fonction par partenaire, ce sera probablement un des prochains développements. Par contre, l'IGC est présente en cellule de crise de la Ville, elle-même en relation avec la Préfecture de Police (crise) de Paris, les informations sur les nappes et sur les risques sont relayées en direct.

L'IGC reste encore très prudente dans l'accord de nouveaux accès à la plateforme car le passage à cette plateforme est encore récent. Elle demande un gros investissement d'appropriation, du temps pour introduire toutes les données anciennes (45 ans) et pour les valider, en plus de la maintenance du réseau qui est lourde pour 251 équipements.

Il faut à terme également gérer quelques 2500 données quotidiennes (profondeurs, cotes, températures, signaux de connexion, de piles et même de conductivité pour certains), réaliser les cartes pour chaque crue à la demande expresse de la Ville au fur et à mesure de la montée de la Seine, ou quotidiennement lors de sa descente.

Si l'IGC a une idée générale de l'évolution des nappes dans le sous-sol parisien en cas de crue, elle ne peut prévoir à l'avance les effets sur les sous-sols pour des crues intermédiaires. Trop de facteurs entrent en effet en jeu : les variations des pompages, les coupures électriques, les sous-sols qui seront volontairement ennoyés et ne protégeront plus leurs voisins.... Des arrivées d'eau parasites sont également possibles : rupture de batardeaux, arrivées d'eau par des cheminements mal ou peu prévus, des inondations par ruissellement s'il pleut en même temps sur la capitale. Comme la Ville de Paris dés-imperméabilise de plus en plus les propriétés publiques, les eaux de surface qui débordent peuvent s'infiltrer plus facilement où les prévisions ne les attendaient pas.

L'IGC espère à terme pouvoir développer des interactions avec ses voisins immédiats, au sein de la Métropole, et avec d'autres partenaires. La validation des données est le point capital pour obtenir des prévisions réalistes et des alertes fiables. L'avenir est dans une mutualisation de qualité des données sur les nappes et les circulations, et dans l'établissement d'une équipe pluridisciplinaire dédiée à la compilation et à l'interprétation des données.

5 - Références :

La plupart des documents sont internes (1) à l'IGC et n'ont pas fait l'objet de publication officielle, par choix ou obligation, toutefois afin de suivre la piézométrie parisienne, l'IGC peut citer :

(2) Colin P. L., 1986 : Évolution des nappes peu profondes à Paris depuis un siècle. PFE ENSMP, Paris, juillet 1986, 62 p.

(3) M. Delesse, 1862. Carte hydraulique du département de la Seine. Paris.

(4) P. Diffre, 1969. *Géologie dynamique. Hydrologie de Paris et de sa banlieue*. Thèse de Doctorat 3^{ème} cycle, Paris, 345p.

(5) P. Diffre, 1979 : Désordres dus à la remontée du niveau des nappes peu profondes sous Paris. Doc BRGM n°8, Lyon, mars 1979, pp 593-598.

(6) A. Lamé, 2013. Modélisation hydrogéologique des aquifères de Paris et impacts des aménagements du sous-sol sur les écoulements souterrains. Thèse de l'ENSMP, spécialité Hydrologie et hydrogéologie quantitatives. 186p

(7) M. Maillot, 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. Thèse de Doctorat de l'Université PSL, 211p.

(8) J. Marvy, 1986 : Les problèmes posés par la nappe phréatique à Paris. Rapport interne IGC, 1986, 60 p.

(9) Préfecture de Police et IGC, 2004 *Consignes de crue*. Paris

- (10) AM. Prunier Leparmentier, 1988 : Les problèmes géologiques, hydrogéologiques et géotechniques de la ville de Paris. Thèse de l'ENSMP en géologie de l'ingénieur, Paris 1988, 244 p.
- (11) AM. Prunier Leparmentier, 1991. Évolution de la nappe phréatique depuis un siècle dans Paris et niveaux connus en 1990. Rev Franç Géotech. N°56, juillet 1991, pp 67-75