



HAL
open science

Le lac de Créteil dans son environnement bâti : SIG 3D et modèle hydrogéologique

Olivier Fouché, Jérôme Brun, Behzad Nasri

► **To cite this version:**

Olivier Fouché, Jérôme Brun, Behzad Nasri. Le lac de Créteil dans son environnement bâti : SIG 3D et modèle hydrogéologique. Cnam ESGT, Laboratoire Géomatique et Foncier. 2019, pp.66. <hal-04132278>

HAL Id: hal-04132278

<https://hal.science/hal-04132278v1>

Submitted on 19 Jun 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

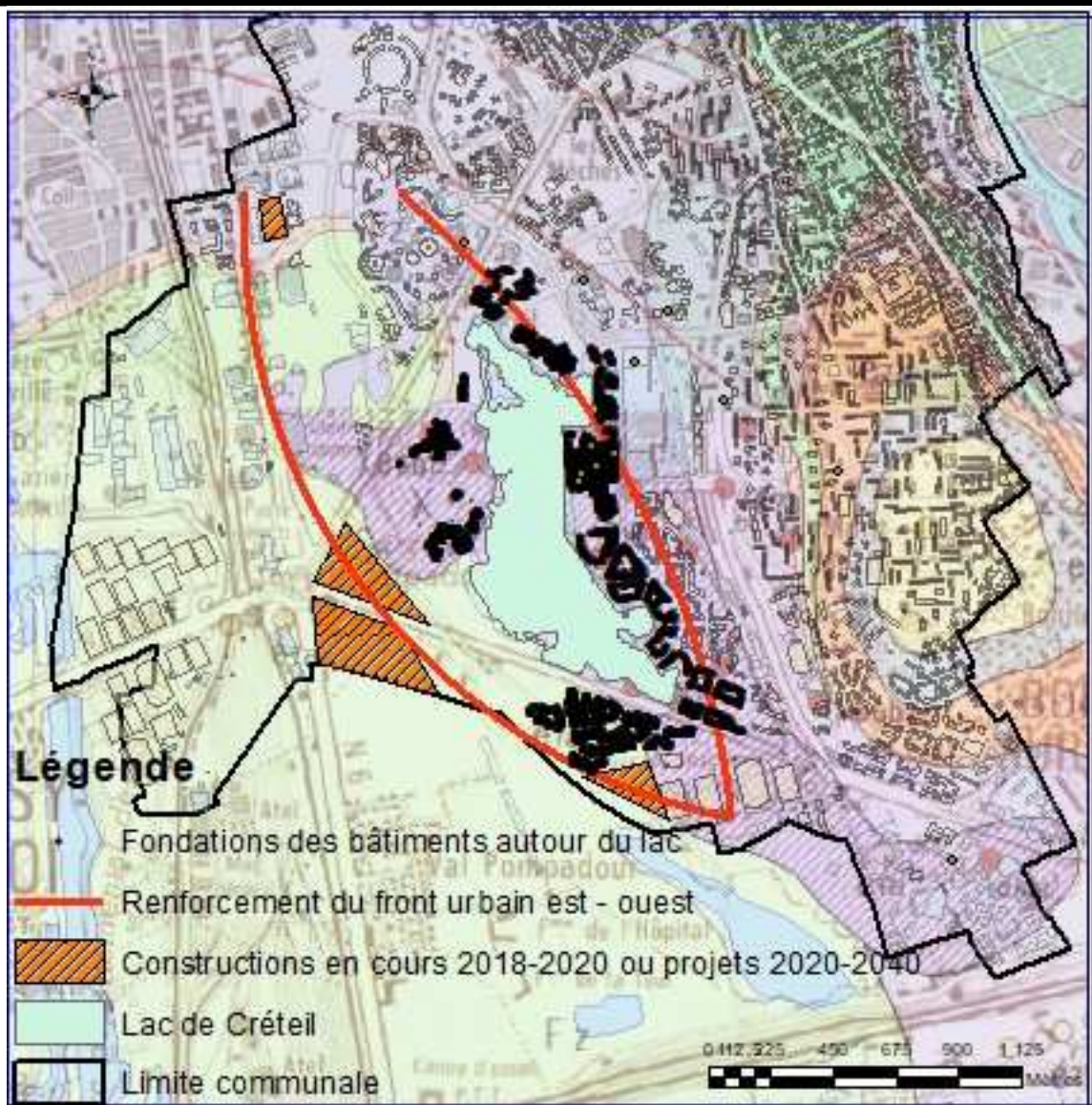


Distributed under a Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0 - Attribution - Non-commercial use - No Derivative Works - International License

Rapport final du projet ModLac

2017-2019

Le lac de Créteil dans son environnement bâti : SIG 3D et modèle hydrogéologique



Fouché O., Brun J., Nasri B.
(Le Cnam)
2017-2019

NB. Illustration de couverture

Mise en perspective du lac de Créteil dans son environnement urbain immédiat : bâti existant, constructions en cours et projets immobiliers 2018 – 2040. Superposition de deux cartes de sources indépendantes, aux contours non harmonisés. Brun, 2019.

1 **Avant-propos**

2

3 En octobre 2017 démarrait le projet ModLac sur le fonctionnement hydrogéologique
4 du lac de Créteil, émergence de la nappe alluviale dans l'aire de confluence de la Marne à la
5 Seine. Ce projet a été porté par la ville de Créteil et par le Conservatoire national des arts et
6 métiers (Cnam). Il est né d'un groupe de travail qui réunissait les acteurs du lac : le territoire
7 GPSEA, la ville de Créteil, la SEMAEC, la DSEA pour le département 94, le SMEAG (Île-de-loisirs)
8 pour la Région Île-de-France, et le Cnam pour le MESRI.

9 Après trois réunions préparatoires du groupe de travail qui ont eu lieu à partir de 2015,
10 une série de 5 réunions d'avancement sur 9 mois en 2017-2018 se sont tenues, la dernière le
11 02 juillet 2018, avec un diaporama de résultats complet (Fouché et al., 2018) et une animation
12 hydrogéologique au pas journalier. Une note bibliographique a été rédigée (Nasri & Fouché,
13 2018) pour inventorier les méthodes de quantification de flux à l'interface lac / nappe
14 phréatique, en soulignant le cas des lacs de gravières, et pour comparer les ordres de grandeur
15 de flux dans différentes circonstances. Un mémoire d'ingénieur du Cnam a été réalisé (Brun,
16 2019) sur la partie géomatique et géologique du projet. Une communication scientifique a eu
17 lieu en juin 2019 au colloque SimHydro qui s'est tenu à Sophia Antipolis (Fouché et al., 2019 a).

18

19 **Le groupe de travail**

- 20 • Daniel Roffé, Denise Bouyou, Marion Jazouli : Ville de Créteil
- 21 • Dominique Rio, Serge Parra, Cédric Gravelle : GPSEA
- 22 • Mathieu Desetres et Marjolaine Blaise : Suez Eau France
- 23 • Jean Claude Riehl et Albert Thalgott : Région Ile de France
- 24 • Jérôme Brun : Syndicat mixte Ile de loisirs
- 25 • Pascale Germain : Créteil habitat SEMIC
- 26 • Sandrine Bénézet et Christian Préaux : Val de Marne
- 27 • Olivier Fouché et Behzad Nasri : Le Cnam

28

29 **Invités**

- 30 • Nathalie Vernin et Seddik Meddour-Gougeon : DSEA
- 31 • Benoît Ducreux : AESN

32

33

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

Remerciements

Les auteurs et les membres du groupe de travail (GT) remercient les établissements et les personnes qui ont fourni des données ayant contribué, peu ou prou, à mener à bien ce projet. En-dehors du GT et notamment de la DSEA qui maintient un réseau piézométrique et pluviométrique dans le secteur d'étude, des données ont été transmises par SAFEGE (Suez), la RATP, la SGP et l'association Aquif'Brie, ainsi que le Cerema. On remercie aussi le BRGM pour son site InfoTerre et pour le prêt du logiciel GDM. Par ailleurs, le RGE-Alti de l'IGN a été utilisé.

Table des matières

1		
2		
3	Glossaire	5
4	Contexte et problématique générale	7
5	Introduction	9
6	Chapitre 1	10
7	1. Acquérir des points sur les plans et coupes des phases d'aménagement du lac	11
8	2. Préciser la nature et la pente des rives sur le contour et les cartographier en 3D	12
9	3. Enrichir, au moyen de mesures de terrain, la base de données de bathymétrie	14
10	4. Produire un MNT du fond du lac compatible avec celui de l'IGN	15
11	5. Calculer le volume d'eau selon les conditions fixées au voisinage des rives	17
12	Chapitre 2	23
13	6. Constituer une BD géologique d'après la BSS et des données propriétaires	23
14	7. Construire un modèle géologique 3D du domaine d'étude (72 km ²)	26
15	8. Insérer des ouvrages souterrains dans le modèle géologique 3D	30
16	9. Questionner la régulation du niveau du lac : un plan d'eau qui n'est pas plan ?	32
17	10. Etablir un lien entre le cratère et le niveau du lac : la drainance de la nappe	34
18	Chapitre 3	36
19	11. Constituer une base de données hydrologique et piézométrique sur le domaine	37
20	12. Fixer les conditions aux limites, caler et vérifier le modèle hydrogéologique 3D	38
21	13. Créer des variantes du modèle pour comprendre l'influence du lac	42
22	14. Simuler des scénarios recherchant l'effet des ouvrages souterrains insérés	45
23	15. Discuter le modèle en le confrontant à un piézomètre dans le secteur nord	47
24	Propositions et perspectives	49
25	Questions et réponses	50
26	Conclusion	54
27	Publications et références	56
28	ANNEXES	58
29	Résumé	64
30		
31		

1
2
3

Glossaire

Le **coefficient de drainance** (*leakage coefficient*) est un paramètre régissant le transfert d'eau à travers un aquitard (une couche semi-perméable) saturé, donc aussi l'échange d'eau entre un aquifère et une couche semi-perméable. Selon Schoeller (1962), c'est le quotient du flux d'eau vertical (débit unitaire) traversant une couche semi-perméable horizontale sous l'effet d'une unité de gradient de potentiel, par la puissance de cette couche. Il se calcule comme le quotient du coefficient de perméabilité verticale **K_v** du milieu semi-perméable par l'épaisseur **b** de la couche. Sa dimension est celle d'une fréquence (unité : s⁻¹). Sous l'influence des tutoriels de logiciels de calcul, il est de plus en plus appelé **coefficient de transfert**, notamment dans le cadre des interactions nappe-cours d'eau à travers une interface partiellement colmatée (semi-perméable), mais où l'horizontalité de la « couche colmatée » n'est pas réaliste et son épaisseur n'est elle-même pas définie. L'inverse de ce paramètre est physiquement mieux saisissable et a été nommé « durée de drainance de référence » par Cazenove (1973). Un risque de confusion existe avec le **facteur de drainance** (*leakage factor*), d'ailleurs mal nommé car un « facteur » devrait être sans dimension, qui est la racine carrée du produit de la transmissivité de l'aquifère par la durée de drainance de référence de l'aquitard (donc en mètres).

Île-de-loisirs. Mot composé en 2014 en remplacement de base de loisirs dans une stratégie de communication institutionnelle. Toutes les « île-de-loisirs » disposent d'un plan d'eau quienserme une ou plusieurs îles. Mais les Île-de-loisirs ne sont pas des îles au sens de masses de terre entourées d'eau de manière permanente ou de manière temporaire en fonction des marées.

Krigeage. En géostatistique, méthode d'estimation linéaire garantissant le minimum de variance. Le krigeage réalise l'interpolation spatiale d'une variable régionalisée par calcul de l'espérance mathématique d'une variable aléatoire, utilisant l'interprétation et la modélisation du variogramme expérimental. La variance sert à caractériser la dispersion d'un échantillon ou d'une distribution. Pour calculer la variance d'une série statistique, on calcule les écarts entre la série et sa moyenne (ou espérance) puis on prend la moyenne (ou l'espérance) de ces écarts élevés au carré. La variance est le carré de l'écart-type. L'interpolation est une opération mathématique permettant de construire une courbe à partir de la donnée d'un nombre fini de points, ou une fonction à partir de la donnée d'un nombre fini de valeurs. L'application en SIG est graphique grâce à la projection sur une grille, c'est-à-dire dans un plan utilisable en 2D ou en 3D.

Perméabilité (de Darcy). Facilité d'un milieu poreux (un sol, une roche) à se laisser traverser par l'écoulement d'un fluide (gaz, liquide) de viscosité et de densité données, sous l'effet d'un gradient de charge. Dans les conditions de Darcy, le flux traversant est en raison directe et proportionnelle du gradient de charge. La perméabilité du milieu, et en conséquence la vitesse de pénétration ou de transit du fluide, dépendent de la composition du milieu poreux.

1

2

Contexte et problématique générale

Partout dans le monde, des quantités considérables de sables et de graviers sont extraites à des fins industrielles ou de construction (Mollema et Antonellini, 2016). En 2013, la demande en Europe a généré un chiffre d'affaires annuel estimé à 15 milliards d'euros et un emploi pour environ 200 000 personnes (UEPG, 2017). Lorsque ces granulats sont extraits sous le niveau piézométrique de la nappe phréatique, un nouveau lac apparaît dans l'excavation et on le nomme « lac de gravière » (Søndergaard et al., 2018). Les lacs de gravières sont généralement petits (1 à 100 hectares) et peu profonds, 2 à 12 mètres, avec de rares cas où la profondeur peut atteindre 40 mètres. Créés dans la plaine alluviale d'un système fluvial, les lacs de gravières sont alimentés par la nappe phréatique (Peaudecerf, 1975).

En France, l'excavation du sable et du gravier est passée de $18,6 \times 10^6$ tonnes en 1949 à 192×10^6 tonnes en 1970, puis a décliné : en 2007, la production nationale de granulats alluvionnaires était descendue à 148×10^6 tonnes. La production du Bassin de Paris représentait environ 30% de la production nationale au début des années 1980 (Amigues, 1985). Les lacs de gravières sont devenus de plus en plus nombreux en raison de la fermeture d'un grand nombre des vieilles gravières. En France, la superficie totale de ces lacs était de 25 km² en 1985 et a augmenté avec un taux de 1 km² par an (Garnier & Billen, 1994) et cette tendance s'est poursuivie au cours des trois dernières décennies.

En Ile-de-France, après un pic en 1990 (22×10^6 tonnes sur un total national identique à celui de 1970), la production de granulats naturels a enregistré une baisse importante jusqu'en 1998 liée notamment à la récession des activités du bâtiment et des travaux publics. Entre 1998 et 2000, la production régionale a progressé de 25 % passant de $11,2$ à $14,0 \times 10^6$ tonnes avant de connaître un léger fléchissement ; en 2002, elle s'est établie à $12,7 \times 10^6$ tonnes répartis en : 64 % de matériaux alluvionnaires (les chailles sont incluses) soit environ 8×10^6 tonnes, 22 % de sablons, et 14 % de matériaux concassés de roches calcaires (Beau et al., 2004). Après une décrue progressive jusqu'à 2008 et une chute après la crise de cette année-là, la production régionale annuelle de matériaux alluvionnaires s'est stabilisée entre 2009 et 2014 à un peu plus de 6×10^6 tonnes. En 2016, les carrières alluvionnaires réalisent 40 % de la production régionale de matériaux de carrière et sur environ 90 sites autorisés sous le régime des carrières, un tiers produisent des sables et graviers alluvionnaires (pour la fabrication de bétons hydrauliques). L'ensemble des sites autorisés de carrières occupent pour leurs activités une superficie totale de l'ordre de 1000 hectares (10 km²) à l'échelle de la région Ile-de-France qui reste stable d'une année sur l'autre. Il s'agit des zones en chantier (zones défrichées, décapées et en extraction) ainsi que l'emprise des installations de traitement (bassins de décantation etc...). Environ 60 % des carrières de la région IdF se situent en Seine-et-Marne.

En raison du coût du transport du sable sur de grandes distances, beaucoup de lacs de gravières ont été créés à proximité des villes. Au cours de l'urbanisation, ces lacs ont été intégrés comme des éléments essentiels du paysage et des fonctions de la ville. Les lacs urbains et périurbains fournissent plusieurs services écosystémiques tels que la ressource en

1 eau brute, le paysage, la biodiversité, la pêche et les autres activités de loisirs. Malgré
2 l'abondance de ces plans d'eau et leur utilité pour la société, on note un manque de recherche
3 sur ces lacs par rapport aux lacs naturels, plus profonds.

4 Les lacs en général sont conçus comme des masses d'eau de surface. Dans la plupart
5 des études sur les lacs, le transfert direct d'eau entre les lacs et les eaux souterraines est vu
6 comme peu important ou pas du tout considéré. Au mieux, les contributions des eaux
7 souterraines sont grossièrement estimées en tant que résidus d'équations de bilan hydrique
8 ou massique (Vanek, 1987). Mais un lac de gravière est un affleurement d'une masse d'eau
9 souterraine. Donc, ces lacs interfèrent de façon sensible avec le régime hydrodynamique des
10 nappes. Ils sont en général déconnectés des cours d'eau permanents, sauf lors d'inondation
11 exceptionnelle. Dans le cadre de l'étude documentaire, une requête avec le mot clé *gravel pit*
12 *lake* dans le titre a été faite au moyen d'un moteur de recherche dans la littérature scientifique
13 internationale. Parmi 800 documents trouvés, il n'y en a que 8 qui ont étudié la problématique
14 des lacs de gravières en relation avec la nappe. Ce facteur est donc moins connu dans
15 l'hydrologie et l'écologie des lacs, même les lacs de gravières.

16 Une évaluation précise du fonctionnement hydrogéologique de ces masses d'eau de
17 surface permettrait de soutenir une stratégie intégrée de prise de décision. L'étude des lacs
18 de gravières dans les milieux urbains et périurbains est ici illustrée par le cas du lac de Créteil,
19 situé dans le Val de Marne, juste avant l'entrée de la Seine dans Paris. La problématique
20 principale est la variation de niveau et les transferts occultes de ce lac de 40 ha depuis et vers
21 le sous-sol (alluvions, remblais) et la compréhension de ses interactions avec le bâti et les
22 ouvrages souterrains (palplanches, fondations, parkings) le long des berges. Au cours de ce
23 projet et de l'élaboration du rapport se sont posées des questions conceptuelles – de
24 compréhension des phénomènes, des questions quantitatives – d'estimation de niveaux, de
25 surfaces ou de volumes d'eau – et des questions opérationnelles. On trouvera des réponses
26 au fil de la lecture, qui sont récapitulées à la fin du rapport avec les réponses que l'on peut
27 apporter à ce jour.

28

29

Introduction

Depuis une dizaine d'années, les acteurs du lac de Créteil se mobilisent dans le but d'identifier un moyen de prévoir le niveau du lac et de le réguler. Certains voudraient l'abaisser par moments, espérant ainsi éviter des dommages liés à l'inondation en sous-sol dans les établissements publics et propriétés riveraines du lac. D'autres ou les mêmes s'inquiètent de la récurrence d'événements de descente spontanée du niveau du lac pendant des saisons sèches, qui mènent au déchaussement d'ouvrages géotechniques de bordure nécessitant de lourds travaux de réparation, et favorisent le développement d'algues et de cyanophycées qui pénalisent les usages de loisirs du lac et la vie végétale et animale. Pour interpréter les résultats des études déjà effectuées sur la qualité de l'eau du lac, une meilleure compréhension hydraulique du lac et de son marnage s'avérait nécessaire. Dans le but de déterminer s'il est possible de réguler son niveau et comment chaque acteur pourrait y contribuer, une étude détaillée du fonctionnement hydrogéologique du lac devait donc être menée. Au-delà des besoins d'une gestion courante du niveau du lac, c'est le risque émergent « inondation par remontée de nappe » qui était questionné, et on s'interrogeait enfin sur le rôle que jouerait le lac en période d'inondation par crue majeure du système Seine + Marne. Dans cet ensemble de questions, une observation particulière demandait à être interprétée : quelques points nettement plus profonds dans la bathymétrie de 2001 nous ont amené à l'hypothèse d'un « cratère » dont l'origine hydrogéologique et le rôle hydraulique sont problématiques.

Techniquement, il s'agissait de construire un modèle de la nappe alluviale centrée sur le lac (ancienne gravière), couplant un système d'information géographique (chapitre 1) qui inclut les ouvrages géotechniques (ArcGIS © ESRI) et un modèle géologique 3D (GDM © BRGM) (chapitre 2), préalable à l'emploi d'un outil de calcul en hydrogéologie (FeFlow © DHI) (chapitre 3). Grâce à la collaboration active d'acteurs du territoire, la collecte des données nécessaires a abouti. Le volet géomatique du projet prévoyait d'intégrer dans le SIG 3D les objets bâtis et les modelés aménagés, ainsi que des données de sondages de la base de données nationale du sous-sol (BSS), la carte géologique harmonisée du BRGM, et le modèle géologique 3D construit avec ces données. Le volet hydrogéologique du projet n'a pas utilisé pleinement le SIG 3D et en est resté, faute de résolution des données géotechniques et géologiques, à une modélisation en champ lointain où le détail du contour et du voisinage du lac ne sont pas visibles. Le modèle en champ lointain permet néanmoins de répondre à la plupart des questions posées.

La réalisation du projet est présentée en suivant l'ordre des objectifs intermédiaires et illustrée par leurs principaux résultats. Le chapitre 1 réunit les objectifs 1 à 5 et le chapitre 2 les objectifs 6 à 10. Le chapitre 3 réunit les objectifs 11 à 15.

Chapitre 1 – Construction du SIG 3D

Le lac mesure un peu plus de 1 500 m de long (direction nord-sud) pour une largeur moyenne de 250 m (direction ouest-est). Sa surface est 40 ha et sa profondeur moyenne 4 m.

Le chapitre 1 de ce rapport présente la construction d'un SIG en 3D qui aide à répondre aux demandes du groupe de travail. Cela nécessitait d'inclure dans un environnement géomatique avancé plusieurs types d'informations sur la surface de la ville et son sous-sol : les aménagements du lac (rives en 3D depuis le fond du lac jusqu'à la surface bâtie), les infrastructures (réseaux d'assainissement, axes routiers voisins en remblai ou en déblai) et les éléments souterrains du bâti (fondations). La plaine alluviale de Créteil a fait l'objet de 1971 à 1976 d'aménagements lourds dont on a digitalisé les plans : construction du Nouveau Créteil (tranche 1) et aménagement des rives nord et est du lac. On a aussi disposé de données propriétaires récentes, plans d'exécution et sondages préalables aux travaux de construction de l'Île de loisirs, du Nouveau Créteil (tranche 2), et de la ZAC en pointe sud du lac. Toutes ces informations ont été intégrées dans le SIG 3D.

Les valeurs issues de plans tracés sur papier de projets anciens qui sont supposés avoir été respectés lors des travaux ont une exactitude altimétrique de 2 m. D'autres données, les relevés GPS récents effectués sur le terrain le long des rives du lac, ont une exactitude altimétrique de 1 m. L'ensemble de ces données a en gros la même exactitude planimétrique, environ 5 m. Ces contenus du SIG sont déterministes. En ce sens, ce SIG 3D contribue à la création d'un proto-BIM sur le tour du lac, BIM que la loi ÉLAN¹ imposera à l'horizon 2022 pour toute nouvelle construction.

Cette information déterministe devait être combinée avec un modèle topographique de la surface de fond du lac qui a une forte composante statistique. On disposait au départ des données d'une campagne de bathymétrie manuelle effectuée depuis un bateau par Safege (2001). Une seconde campagne d'acquisition a été réalisée par J. Brun en 2016, en suivant le contour du lac. Un 3^e jeu de données a été constitué par J. Brun en 2016 par saisie sur les plans de 1976. L'évaluation de la topographie du fond du lac s'appuie sur ces trois jeux de données.

Le modèle, produit par interpolation à partir de la base de données de bathymétrie ainsi constituée, admet un degré d'incertitude conséquent et supporte une résolution d'un pixel par 25 à 100 m² à condition de fixer des valeurs réalistes de hauteur d'eau au contour du lac (conditions aux limites). Le tout devait s'intégrer dans le cadre du dernier référentiel altimétrique de l'IGN (le RGE Alti) fourni dans un raster de pixel 1 m².

La construction d'un SIG 3D permet de représenter la surface topographique du fond du lac qui est le toit du modèle géologique dans l'emprise du lac, et de l'intégrer dans le MNT de l'IGN qui est le toit du modèle géologique en-dehors du lac. Grâce à ce MNT du fond du lac, on pourra faire varier le niveau du plan d'eau dans une forme en volume totalement déterminée, comme une bassine aux bords irréguliers et non verticaux, et analyser les effets

¹ Loi Évolution du Logement, de l'Aménagement et du Numérique, dite loi ÉLAN.

1 potentiels en termes de débordement et d'étalement dans des scénarios d'inondation
2 statiques (i.e. sans modèle d'écoulement).

3

4 Dans le volet géomatique du projet, toutes les coordonnées concourant à la
5 description géométrique des données répondent aux caractéristiques suivantes :

- 6 • système géodésique : RGF 93,
- 7 • ellipsoïde : Clarke 1880,
- 8 • méridien d'origine : Greenwich,
- 9 • projection : Lambert 93, conique conforme,
- 10 • unité : mètre.

11

12 Objectifs intermédiaires du volet géomatique (chapitre 1)

- 13 1. Acquérir des points sur les plans et coupes des phases d'aménagement du lac
- 14 2. Préciser la nature et la pente des rives sur le contour et les cartographier en 3D
- 15 3. Enrichir, au moyen de mesures de terrain, la base de données de bathymétrie
- 16 4. Produire un MNT du fond du lac compatible avec celui de l'IGN
- 17 5. Calculer le volume d'eau selon les conditions fixées au voisinage des rives

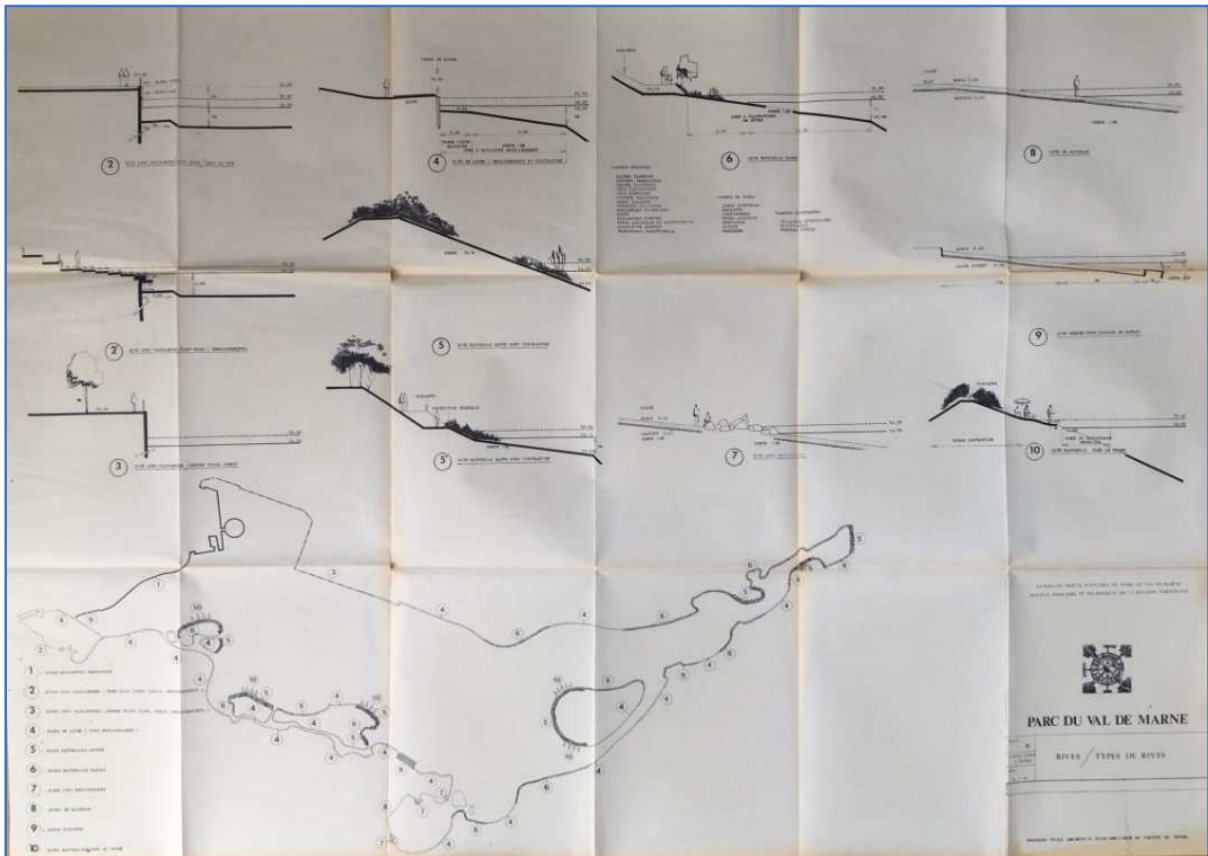
18

19 1. [Acquérir des points sur les plans et coupes des phases d'aménagement du lac](#)

20 Le SIG 3D inclut les modelés de terrain (figure 1) qui ont fait d'une ancienne sablière
21 une base de plein air et de loisirs. Les données numérisées sur des plans et coupes couvrent
22 la totalité de la période de remodelage, depuis la phase initiale du projet jusqu'à sa dernière
23 phase d'exécution, donc de 1971 à 2005.

24 Les données intégrées permettent de représenter non seulement la partie émergée
25 des rives sur le pourtour du lac, mais aussi la partie immergée des rives sur une bande allant
26 de 10 à 100 m de la rive ouest (côté Île-de-Loisirs). De plus, le SIG 3D inclut les alignements de
27 palplanches, le long de la rive est (côté centre commercial), au nord et au sud. Le long du quai
28 de la rive est, des palplanches de 4,50 m de hauteur sont représentées puis un décrochement
29 avec les palplanches de 7,50 m : cette différence est adaptée à la remontée de terrain, au
30 mode de construction et au budget alloué aux ouvrages de soutènement en BTP.

31 On ne peut pas parler ici de « données disponibles » au départ du projet. Il ne s'agit
32 pas même d'une simple numérisation qui serait une acquisition automatique de données. Ce
33 travail manuel d'acquisition de points cotés n'a été possible que grâce au temps investi par
34 l'un des auteurs, Jérôme Brun, pour qui la réalisation du SIG a été le support de son mémoire
35 d'ingénieur du Cnam. Les figures du premier chapitre sont reprises de son mémoire (Brun,
36 2019) que l'on incite le lecteur à consulter pour mieux comprendre le travail de géomatique,
37 d'analyse de données géologiques et de modélisation, y trouver plus d'illustrations, mais aussi
38 pour entrer dans la documentation cartographique historique du site.



2

3 Figure 1. Types de rives dans le projet initial du parc du Val-de-Marne, future base de plein air et
 4 de loisirs. AFTRP & Vitale (1973). Dans : J. Brun (2019).

5

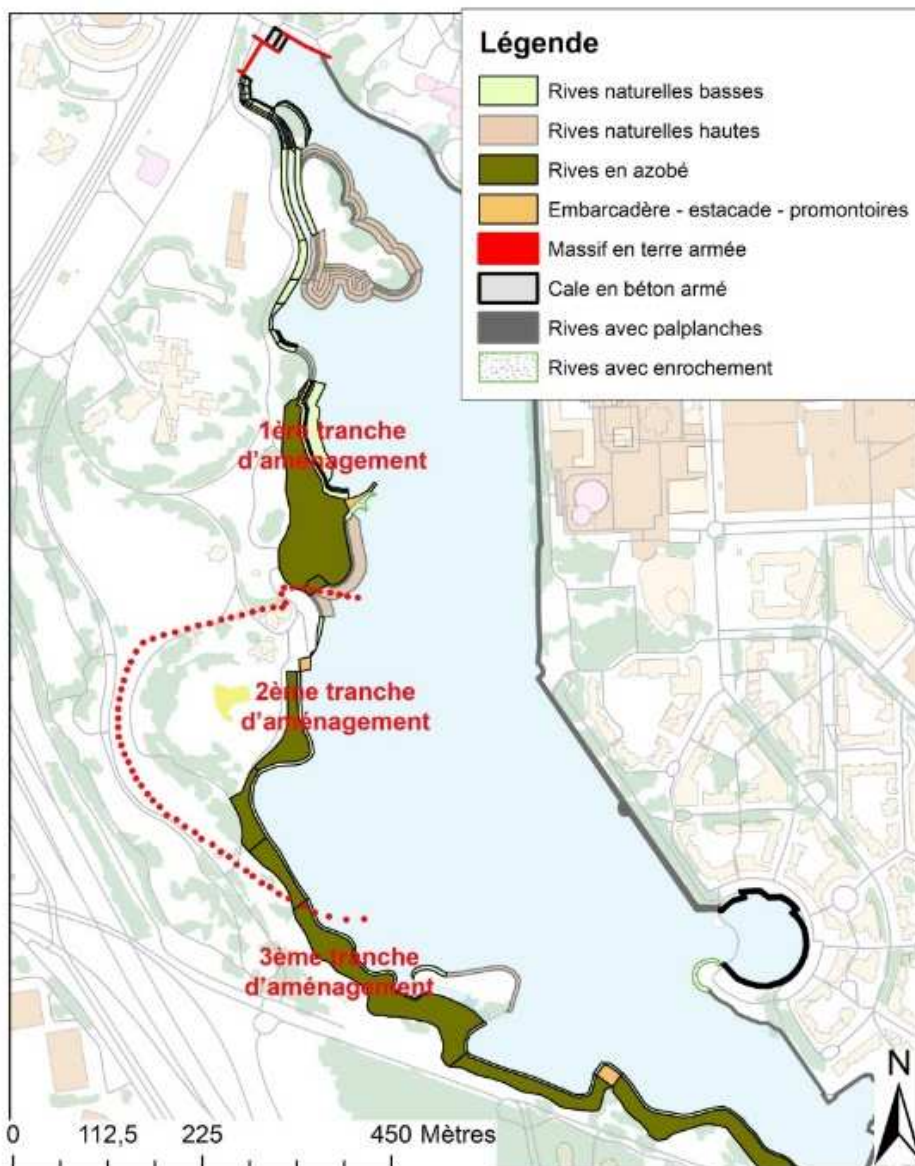
6 2. [Préciser la nature et la pente des rives sur le contour et les cartographier en 3D](#)

7 Les rives du lac ont été aménagées au cours de trois grandes phases de travaux (figure
 8 2) et neuf types de rives sont distingués : massifs en terre armée, cale en béton armé, semelle
 9 de réglage en béton, rives avec palplanches (PAL), rives en azobé, rives naturelles basses
 10 (RNB), rives naturelles hautes (RNH), rives avec enrochement, embarcadère, estacade,
 11 promontoire. Pour les représenter dans le SIG 3D, les rives ont été conçues comme des
 12 parallélépipèdes rectangles. Les pentes des rives représentées sont conformes aux coupes
 13 projets. Par exemple, la digitalisation de la rive sud de l'île de la rivière sèche est
 14 reconnaissable à sa triple avancée dans le lac. On veille à la découpe des rives immergées pour
 15 préserver la représentation du canal (figure 3). Sur cette vue 3D, on aperçoit au nord
 16 l'embarcadère et au nord-est les palplanches de la rive côté préfecture.

17 Cela permet d'effectuer des calculs pour estimer la surface immergée des rives. Pour
 18 chaque parallélépipède rectangle, la surface en contact avec l'eau du lac est un
 19 parallélogramme. La hauteur immergée de chaque parallélogramme est calculée jusqu'à une
 20 cote considérée comme la cote de référence du plan d'eau Z_{pe_ref} . Si l'on choisit par exemple
 21 la cote 30 NGF du projet de 1976, sur une surface totale de rives se montant à 65 246,63 m²,
 22 les surfaces de rives immergées totalisent 24 550,70 m². Les trois contributions principales

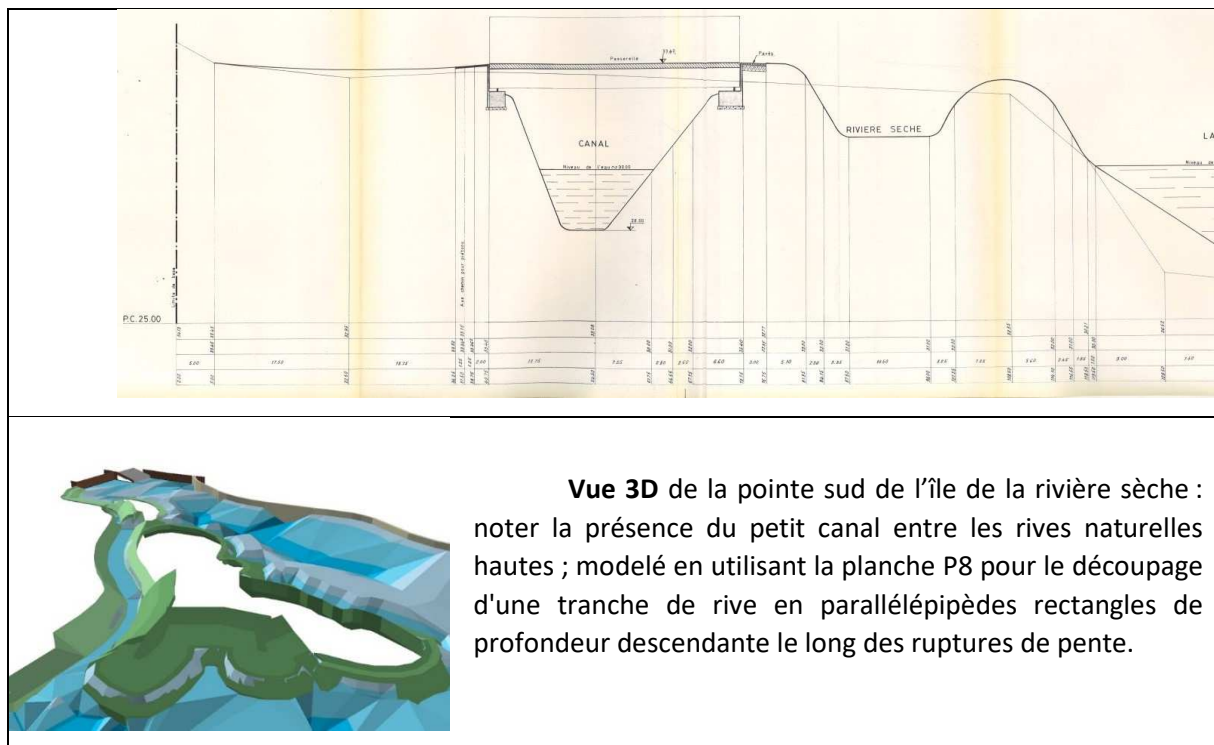
1 sont RNB, RNH et PAL respectivement : 10 605,02 ; 9 150,14 ; 3 768,32 m² ; les rives
2 recouvertes de terre végétale (RNB et RNH) en pente douce comptent donc pour 80% dans la
3 surface immergée totale. En pratique, d'après la chronique enregistrée, le niveau du plan
4 d'eau a vite été au-dessus (environ 70 cm plus haut) de la cote de référence fixée en 1976
5 donc ces surfaces immergées sont sous-estimées, mais les proportions entre les types ne
6 changent pas.

Rives du lac de Créteil: tranches d'aménagement



J. Brun. ArcGis. 16/09/2016

7
8 Figure 2. Cartographie des rives et situation des trois tranches d'aménagement de l'île de loisirs
9 de Créteil. ArcGIS 2016. Dans : J. Brun (2019).



2 Figure 3. Coupe de la pointe sud de l'île de la rivière sèche, planche P8, DDE94 & Charpentier
3 (1975). Vue 3D de l'île de la rivière sèche dans ArcScene 2017. Dans : J. Brun (2019).

4

5 3. Enrichir, au moyen de mesures de terrain, la base de données de bathymétrie

6 Une fois les rives représentées, on modélise la surface de fond du lac. Elle a été cartographiée
7 partiellement sous forme de TIN suite à la campagne de bathymétrie réalisée par Safege
8 (2001). Cependant, cette campagne ne s'est pas intéressée à la périphérie de cette surface
9 nommée fond du lac. Or, on a besoin d'une couverture plus complète par des données pour
10 construire une surface continue depuis les rives émergées jusqu'au milieu du lac.

11 On a donc complété les données (358 points) de 2001 par un relevé bathymétrique (55 points)
12 en 2016 dans la bande de 1 à 5 m depuis les chemins de promenade des rives et autour des
13 îles du lac. De plus, on ajoute des données (852 points) saisies en 2016 sur les plans et coupes
14 de 1976. On obtient ainsi une base de 1 265 points de mesure. À cela s'ajoute la création de
15 522 points de référence, espacés de 10 m, au contour du lac : il s'agit de conditions limites au
16 droit des rives où la hauteur d'eau est fixée arbitrairement selon six scénarios : 0 m partout ;
17 1 m partout ; 2 m partout ; 0 m à l'ouest et 1 m à l'est ; 0,70 m à l'ouest et 1,70 m à l'est, 1 m
18 à l'ouest et 2 m à l'est.

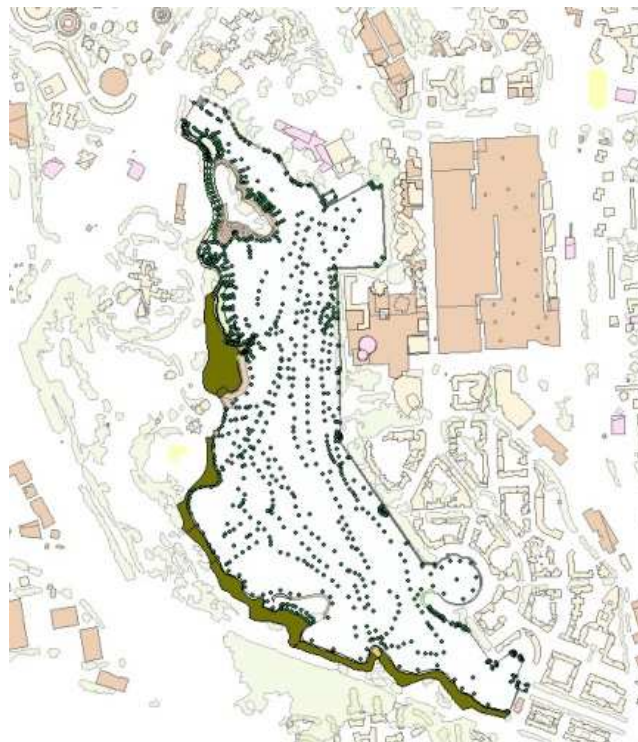
19 Le nombre total des points de profondeur connue s'élève alors à $1\,265 + 522 = 1\,787$ pour une
20 surface de 40 ha (figure 4). De la sorte, on couvre plus précisément la bathymétrie du fond du
21 lac dans sa périphérie, et on peut faire la jonction spatiale avec les rives du lac et modéliser
22 un MNT du fond du lac.

23

1

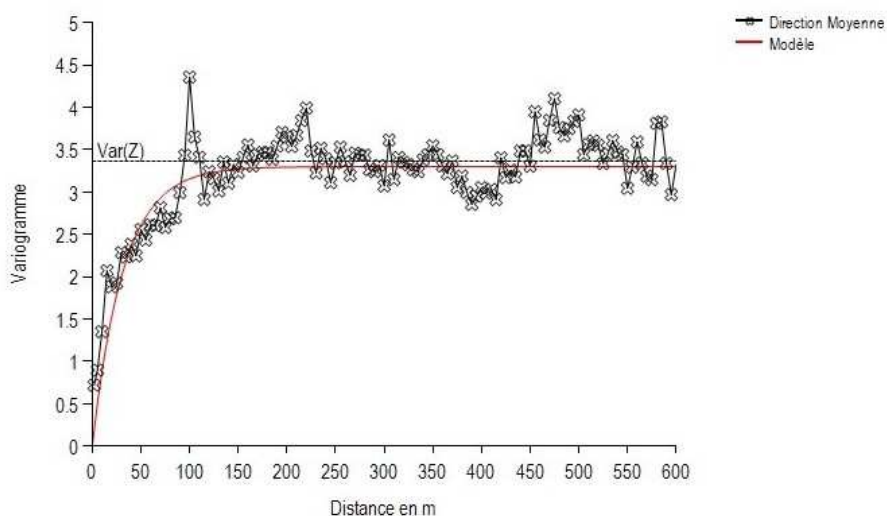
2 4. Produire un MNT du fond du lac compatible avec celui de l'IGN

3 On a effectué l'analyse variographique des données de bathymétrie puis, après filtrage
4 des données non robustes (points doubles), le variogramme de « direction moyenne » a été
5 modélisé par un modèle exponentiel sans pépite (figure 5). A l'aide de ce modèle de
6 variogramme, une interpolation par krigeage a produit le MNT du fond du lac (figure 6),
7 MNT_FDL_1m_BRN. A partir des données brutes, il y a eu deux étapes de traitement de
8 données : filtrage des points doubles et fusion des couples de points proches. Le traitement
9 est détaillé dans l'encadré ci-dessous.



10

11 Figure 4. Points de bathymétrie (campagnes de 2001, 2016). ArcGis 2017. Dans : J. Brun (2019).



12

13 Figure 5. Variogramme de l'altitude du fond du lac, au pas de 5 m, ajusté avec le modèle
14 exponentiel sans pépite après filtrage des points doubles. GDM © BRGM. Dans : J. Brun (2019).

1

2 Encadré 1 – Pour en savoir plus – Analyse détaillée du krigeage

3 Les « points doubles » sont ici définis comme des couples de points situés à une distance
4 inférieure à 1 m. Une inspection du jeu de données d'entrée permet de mettre en évidence 210 points
5 sur 1 265 qui présentent une distance horizontale nulle ou inférieure à 1 m avec au moins un point
6 voisin. Si certains couples de points sont *quasi* confondus, essentiellement des points relevés sur les
7 plans de 1976, on note que la plupart des points doubles appartiennent aux données de Safege (2001).
8 Il n'y a pas de points doubles appartenant à deux campagnes différentes (2001 et 2016) car on a conçu
9 la campagne de 2016 de façon complémentaire à celle de 2001. Sur les données brutes, le
10 variogramme expérimental était affecté par un effet de pépite. Les données sont alors filtrées pour
11 supprimer les doubles par une requête sur la base de données Access : il reste 1 055 points et on trace
12 de nouveau le variogramme expérimental dans plusieurs directions. On note la disparition de l'effet
13 de pépite initial, simple artefact, ce qui facilite l'ajustement d'un modèle exponentiel finalement avec
14 un palier de 3,4 et une portée de 190 m.

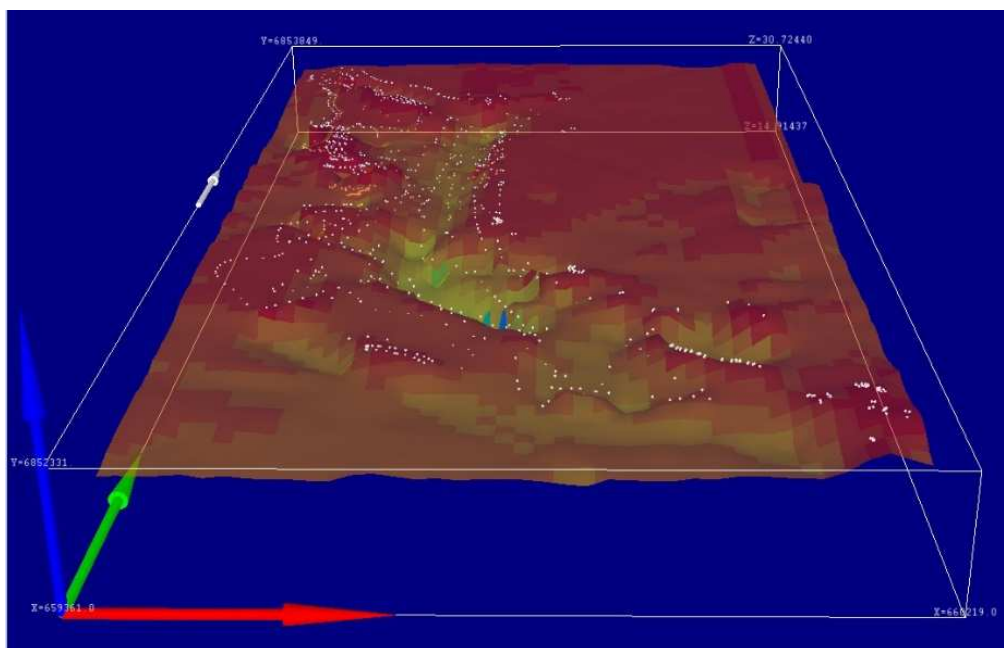
15 Le krigeage est opéré par voisinage glissant. La recherche des points de données dans le
16 voisinage est effectuée par octant plutôt que par rectangle. Ce type de voisinage est conseillé pour
17 interpoler des données réparties de façon non uniforme comme dans le cas d'espèce.

18 Après le filtrage, une deuxième étape de traitement a été la fusion. Dans le cas de données
19 groupées (*clusters*), la fusion de points trop proches permet d'éviter les instabilités numériques lors
20 du krigeage. Lors de la fusion de deux points, la valeur moyenne de ces points est calculée et le point
21 fusionné est positionné aux coordonnées du premier point. Le seuil de fusion de 2 points a été de 1,408
22 lors du calcul. Le programme signale qu'il y a eu 14 points fusionnés (1 041 points ont été utilisés sur
23 1 055). Le programme annonce que 24 voisins ont servi à estimer chaque maille. Avec un tel degré de
24 précision et quelques zones plus faibles en données, 31 mailles n'ont pas été estimées. Le résultat
25 graphique est adapté à la maille initiale (1 m) mais avec une précision locale, c'est-à-dire que l'on
26 observe sur la carte de l'altitude de la surface dénommée fond du lac un effet de pixellisation lié à la
27 faiblesse de la quantité de données en entrée.

28 Grâce au filtrage et à la fusion, le nombre de données non robustes du krigeage est passé de
29 145 à 64. Le minimum et le maximum de l'erreur réduite sont respectivement de -7,151 et + 8,223 et
30 l'écart-type de l'erreur réduite est passé de 2,648 avant filtrage et fusion à 1,297 après ces traitements.
31 On s'est rapproché de la valeur de référence 1 qui correspond à l'idéal d'une distribution gaussienne
32 des erreurs (en pratique, les erreurs ne sont donc qu'approximativement gaussiennes).

33

34 Le modèle topographique du fond du lac ainsi réalisé s'intègre dans le cadre du
35 référentiel altimétrique de l'IGN (MNT_RGE_1m_IGN ; le RGE Alti, fourni dans un raster de
36 pixel 1 m²), avec une erreur-type d'altitude de 1,58 m aux points du contour. Cette erreur est
37 modeste en comparaison de l'écart-type d'altitude intrinsèque estimé à 7,72 m qui est produit
38 par la dégradation du MNT de l'IGN de la résolution 1 m à la résolution 20 m. La dégradation
39 de la résolution du MNT apparaîtra nécessaire par cohérence avec la densité de points de
40 bathymétrie (section 5) et avec l'exactitude planimétrique de positionnement des sondages :
41 l'erreur horizontale serait de 10 à 50 m selon les sondages (métadonnées de la BSS). Quant à
42 l'altitude de la tête des forages, elle produira avec le MNT à 20 m un écart-type de 2,98 m
43 (section 7) restant acceptable en comparaison de l'écart-type intrinsèque du MNT (7,72 m).



1
 2 Figure 6. Altitude du toit du modèle géologique sous le lac : MNT obtenu par krigeage,
 3 développement en 3D de la carte 2D. Un coefficient de dilatation de 10 a été appliqué à l'altitude
 4 pour faire ressortir la volumétrie sur l'image. GDM © BRGM. Dans : J. Brun (2019).

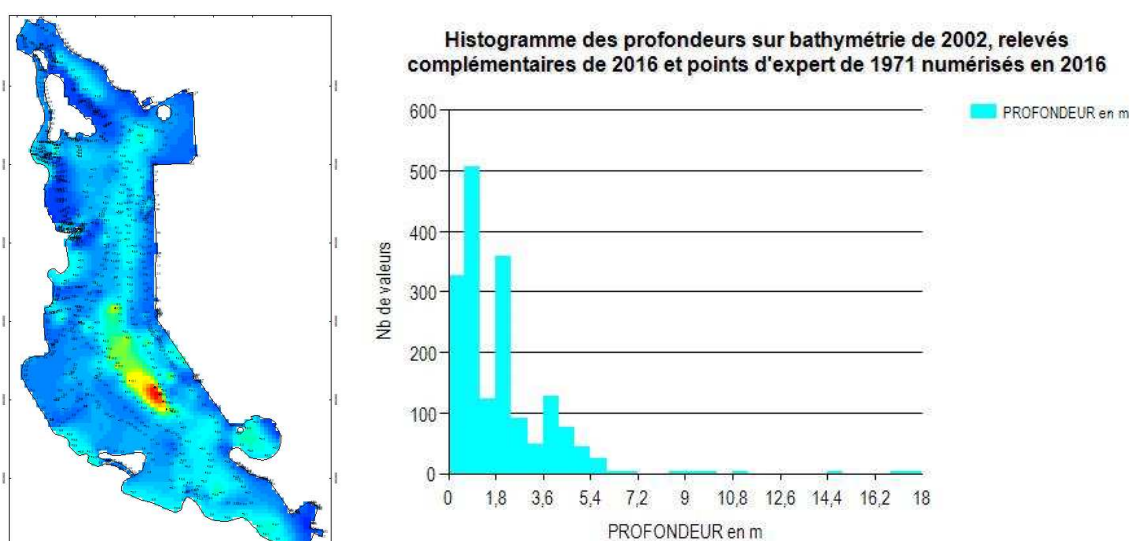
5
 6 5. Calculer le volume d'eau selon les conditions fixées au voisinage des rives

7 En plus de l'estimation du volume du lac, un objectif est d'estimer le volume du cratère
 8 au fond du lac et d'évaluer s'il traverse l'écran argileux de la formation des sables de
 9 Beauchamp, d'après les données géotechniques locales dans un premier temps.

10 Une première approche pour calculer le volume du lac est de multiplier la valeur
 11 moyenne de la profondeur par la superficie du plan d'eau. Auparavant, la profondeur doit être
 12 interpolée par krigeage et extrapolée jusqu'aux rives dans une grille coïncidant avec la forme
 13 du lac. Dans le géomodeleur GDM, on a dégradé petit à petit le MNT de 1 à 10 m puis de 10 à
 14 20 m pour faire entrer les points de bathymétrie dans des pixels d'aire connue. La grille 2D de
 15 maille 10 x 10 m est illustrée par la figure 7A. Vers la périphérie du lac, malgré l'acquisition de
 16 points complémentaires en 2016 (in situ + sur plans et coupes de 1976), des données de
 17 bathymétrie manquent : on a donc ajouté une condition de profondeur réaliste au voisinage
 18 des rives pour affiner le calcul volumique.

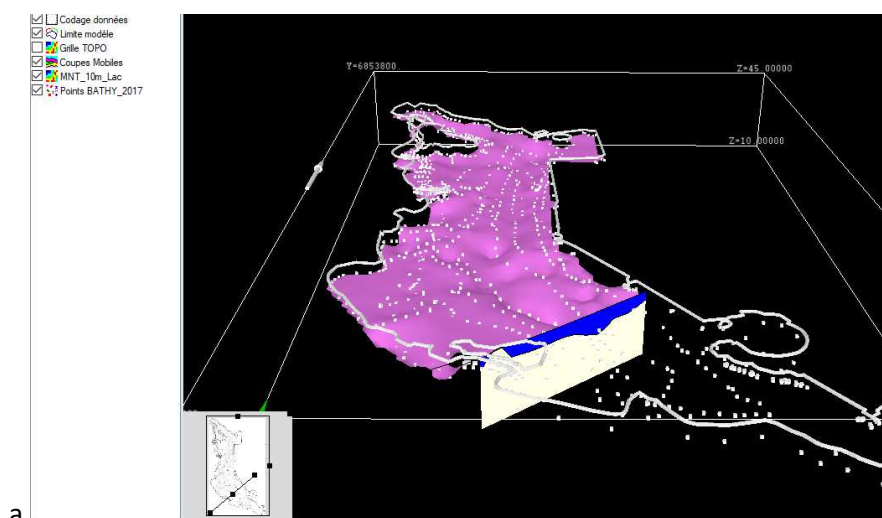
19 On a testé 6 conditions de profondeur possibles : en imposant une valeur 0 m d'eau
 20 sur les rives (ce qui équivaldrait à mettre à nu les rives immergées), ou 1 m (qui est la hauteur
 21 d'eau constatée sur la majeure partie des rives ouest), ou 2 m (soit la hauteur d'eau supposée
 22 par Safège en 2001), ou 0 m à l'ouest (rive île de loisirs, avec coupe en biseau) et 1 m à l'est
 23 (rive de centre-ville avec palplanches verticales), 0,70 m à l'ouest et 1,70 m à l'est, ou enfin 1
 24 m à l'ouest et 2 m à l'est. On prend comme référence les rives de l'école de voile de l'île de
 25 loisirs sur la rive ouest et les rives du quartier du port sur la rive est ; la rive de l'hôtel de ville
 26 est exclue pour cause de proximité à des zones de fond plus difficilement sondables sans
 27 outillage.

1 Une coupe transversale à travers le modèle de profondeur visualisé en 3D met en
 2 évidence une zone de forte profondeur qu'il a été convenu de dénommer « cratère » (figure
 3 8). Ce cratère atteignant presque 15 m, voire 18 m si l'on se fie au point le plus profond, n'a
 4 jamais été mentionné, ni d'après les archives consultées ni lors des échanges avec les plus
 5 anciens acteurs de l'aménagement du nouveau Créteil. Aucune source n'a cité l'existence d'un
 6 ouvrage d'exploitation à cet endroit. Il reste à la faire explorer in situ par un plongeur
 7 professionnel. Il s'agira de vérifier l'hypothèse d'une communication artificielle ou naturelle
 8 entre le fond du lac et la nappe des sables de Beauchamp inférieurs et des marnes et caillasses.
 9 Si aucun ouvrage n'était trouvé, cela confirmerait notre conclusion que ce « cratère » est un
 10 entonnoir karstique naturel formé sous l'effet d'un phénomène de drainance à travers des
 11 couches contenant du gypse et mettant en relation l'aquifère alluvial et l'aquifère des marnes
 12 et caillasses. Le calcul du volume du cratère est détaillé dans l'encadré 2 qui suit.

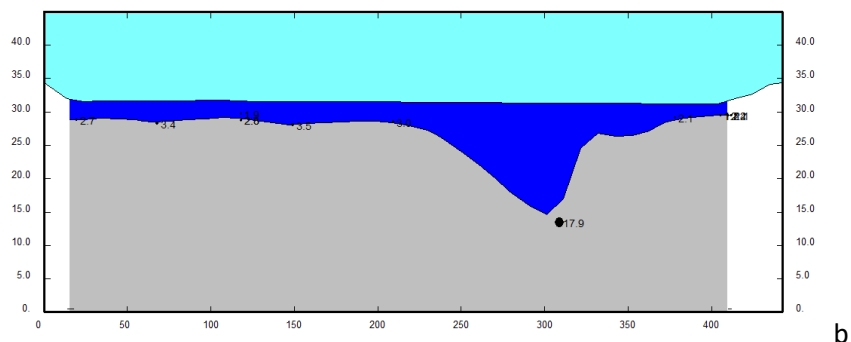


13 a b
 14 Figure 7. Profondeur d'eau du lac. a. Grille 2D de maille 10 x 10 m, obtenue par krigeage sans
 15 dérive, variogramme linéaire et modèle exponentiel, GDM © BRGM. b. Histogramme du jeu
 16 complet des valeurs de profondeur. Dans : J. Brun (2019).

17



18



1
2 Figure 8. a. Vue 3D des points de bathymétrie et de la surface de fond du lac. b. zoom sur la
3 coupe transversale révélant le cratère. Multilayer, GDM © BRGM. Dans : J. Brun (2019).

4

5 Encadré 2 – Pour en savoir plus – Estimation du volume du « cratère »

6 On a identifié grâce à notre analyse en 2018 des données de Safege (2001) une zone de cratère.
7 Celle-ci s'individualise à partir de 16 points de bathymétrie du jeu de données. Sans preuve du
8 comblement éventuel du cratère par la sédimentation depuis 2001, on est en mesure de calculer son
9 volume. Pour ce faire, on fait l'histogramme des valeurs de profondeur sur la base complète (2001,
10 2016) avec un voisinage aux rives de 1 m à l'ouest et 2 m à l'est (figure 7B).

11 En examinant les statistiques attachées à l'histogramme, on constate que la valeur moyenne
12 de profondeur s'élève à 1,87 m. Le cratère est identifié à partir de la classe 11 de l'histogramme (à 6
13 m de profondeur). On effectue donc un filtre sur les données : profondeur < 6 m pour éliminer le
14 cratère. On interpole en suivant la méthode du géomodeleur déjà vue. Ce filtre prend en compte 1 493
15 enregistrements de profondeur inférieure à 6 m sur les 1 787 de la base de données : on obtient un
16 volume de 1 124 777 m³ en-dehors du cratère. Avec le volume du lac de 1 233 268 m³, le cratère a
17 donc pour volume $1\,233\,268 - 1\,124\,777 = 108\,491\text{ m}^3$.

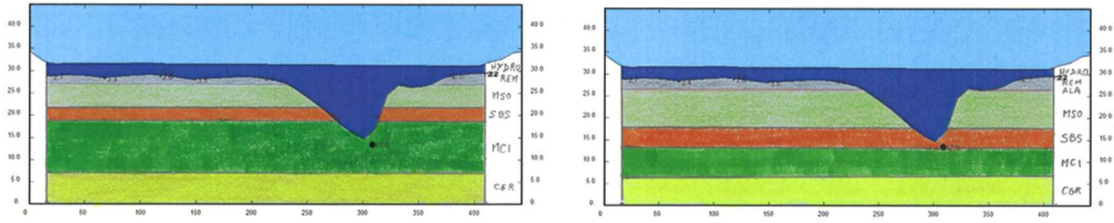
18 L'apparition du cratère a contribué à l'évolution du volume total sur 40 ans : 108 000 m³ de
19 création depuis 1982 contre au moins 300 000 m³ de disparition (par envasement sans doute, mais
20 aussi par erreur d'estimation initiale). Cela reste un phénomène fascinant, dû par hypothèse à la
21 dissolution de gypse qui se poursuit sans doute, par ses conséquences telles que la drainance accrue
22 entre deux nappes, l'instabilité mécanique potentielle, le développement d'un nouvel écosystème, etc.

23 De plus, pour anticiper sur le chapitre 2 (géologie), les données de sondages géotechniques de
24 part et d'autre du lac (croix rouges, figure 12) traduisent l'incertitude géologique à 250 m de distance :
25 ainsi, une interpolation entre les deux schémas de la figure 9 placera le fond du cratère à l'interface
26 des sables de Beauchamp (orange) et des marnes et caillasses (vert foncé), ce qui veut dire que l'écran
27 argileux des sables de Beauchamp est traversé.

28

29 La profondeur moyenne du lac est de 4 m à la 2^e décimale près, pour une profondeur
30 qui varie entre 0,8 et 18 m. Les résultats de l'estimation du volume d'eau du lac selon la
31 condition de profondeur (6 cas) fixée au voisinage des rives, en fonction de la méthode
32 appliquée (géomodeleur ou SIG) sur le jeu de données bathymétriques complet (2001, 2016),
33 sont récapitulés au tableau 1.

34



1
2 Figure 9. Coupe verticale géotechnique du lac de Créteil : le cratère atteint-il les marnes et
3 caillasses (vert foncé) ? Interprétation simpliste en couches horizontales selon les sondages
4 géotechniques en rive ouest (à gauche) et en rive est (à droite). Dessin J. Brun, 2018.

5

6 Tableau 1. Volume d'eau du lac estimé sur le jeu de données de bathymétrie complet

Profondeur d'eau imposée au voisinage des rives	Volume en m ³ Interpolation de la profondeur d'eau par géomodeleur	Cote NGF du fond de l'eau imposée au voisinage des rives dans les 6 conventions de profondeur	Volume en m ³ Interpolation de l'altitude sous un plafond de 30,80 NGF par SIG	
			Maille 10 m	Maille 1 m
Sans condition de profondeur au voisinage	1 243 931	Non pertinent pour des limites de raster avec valeurs non nulles		
0 m des deux côtés	1 175 147	30,80 m	1 115 635	1 156 256
1 m des deux côtés	1 209 882	29,80 m	1 138 804	1 191 259
2 m des deux côtés	1 244 658	28,80 m	1 161 972	1 226 262
0 m à l'ouest, et 1 m à l'est	1 198 492	30,80 m à l'ouest et 29,80 m à l'est	1 131 132	1 178 226
0,70 m à l'ouest, et 1,70 m à l'est	1 222 847	30,10 m à l'ouest et 29,10 m à l'est	1 147 350	1 202 727
1 m à l'ouest, et 2 m à l'est	1 233 268	29,80 m à l'ouest et 28,80 m à l'est	1 154 301	1 213 228

7

8 La réduction de la taille du pixel pour représenter le fond du lac a permis une meilleure
9 représentation du raster mais l'interpolation fondée sur un faible nombre de mesures (1 265
10 points de bathymétrie) et une faible surface par pixel (1 m²) conduit à calculer le volume du
11 lac à partir de 99% de points de bathymétrie virtuels ; les valeurs de bathymétrie vérifiées
12 étant faibles (< 5 m) majoritairement, les 99% de points créés ont tendance à exagérer
13 l'altitude du fond du lac ; le volume calculé à partir de valeurs de Z plus élevées sera plus faible.

14 Par suite, le volume calculé 1,233 m³ à partir d'un MNT dans le géomodeleur à la
15 résolution 10 m est sans doute plus proche de la réalité que le 1,213 m³ du SIG à 1 m. On

1 suppose que le volume d'eau réel est plus faible que celui calculé avec ces données de
2 bathymétrie qui datent de bientôt 20 ans, car il faudrait retrancher une épaisseur de vase.

3 Ces résultats sont à comparer avec des résultats antérieurs ou des estimations que l'on
4 a faites sur des jeux de données moins complets. Sans relevé de bathymétrie, le volume était
5 estimé par Chesterikoff et al. (1981) à environ 1 500 000 m³, valeur reprise à son compte par
6 Safege dans son rapport de 2001 malgré sa propre campagne de bathymétrie ! Avec les 358
7 points de bathymétrie relevés en 2001 par Safege, on obtient par deux méthodes les
8 résultats : 1 137 665 m³ par le SIG (haute résolution : 1 m²), ou 1 146 777 m³ par le
9 géomodeleur (moyenne résolution : 10 m²).

10 Les points ajoutés en 2016 (852 + 55 points de rive), tous à proximité des berges,
11 annulent l'hypothèse de verticalité des bords. Avec les mêmes deux méthodes appliquées et
12 l'apport de données supplémentaires, on devrait obtenir un résultat volumétrique plus juste.
13 On trouve comme résultats : 1 213 228 m³ par le SIG (haute résolution) et 1 233 268 m³ par le
14 géomodeleur (moyenne résolution). La différence de volume entre les deux jeux de données
15 s'élève à 75 563 m³ en plus avec la méthode à haute résolution employant le SIG (resp. à 86
16 491 m³ en plus avec le géomodeleur) soit une majoration de 6,6% (7,5%) du volume.

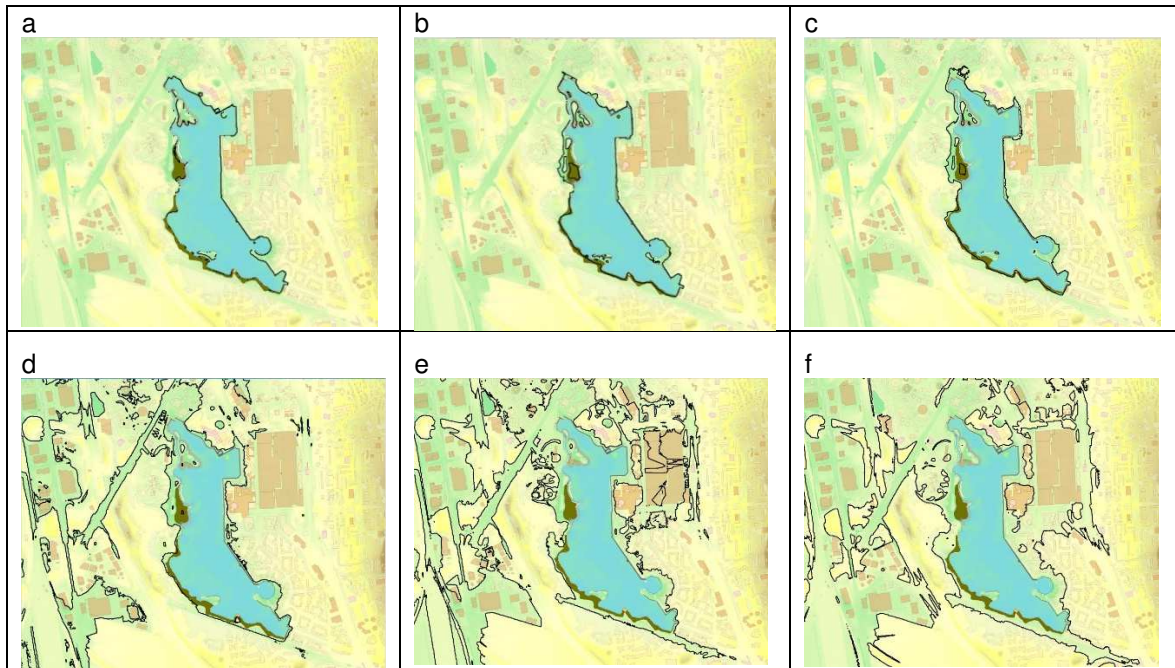
17 À ce stade, ayant une connaissance précise des pentes des rives dans le premier mètre
18 de tranche d'eau (pentes prises en compte dans le MNT réalisé au toit du modèle géologique),
19 pour le jeu de données de bathymétrie complet en entrée du processus, il est possible
20 d'estimer le volume différentiel d'eau entre le niveau annuel minimal du lac et son niveau
21 annuel maximal, soit 1 233 268 – 1 198 492 = 34 776 m³ d'après la méthode du géomodeleur,
22 contre 35 002 m³ estimé à haute résolution avec le SIG. Pour ce calcul, on a pris deux
23 conditions aux limites sur le contour avec 1 m de dénivelé, soit un marnage extrême. Ce
24 différentiel (qui sera interprété au chapitre 3, section 10, comme le solde du « refus ») est
25 faible (÷3) devant le volume estimé du cratère (cf. l'encadré ci-dessus) et très faible (÷30)
26 devant le volume total d'eau qui transite par le lac (estimé au chapitre 3). La capacité tampon
27 du lac face au risque « inondation par débordement du lac » est très faible.

28 Pour estimer un volume du lac actualisé associé à une cote de crue, voire à une cote
29 supérieure au maximum des rives du lac, il faut déterminer la limite d'extension du plan d'eau
30 pour une cote donnée. On peut utiliser les courbes de niveau du MNT pour faire une première
31 estimation. Jusqu'à la cote 32 NGF, le niveau d'eau produit un polygone fermé qui représente
32 le plafond du lac : interpoler dans ce polygone permet de calculer le volume du lac (figure 10).

33 À partir de la cote 33 NGF, le lac sort du cadre d'un polygone simple en se connectant
34 à d'autres zones situées à la même altitude, c'est un multipolygone, inutilisable pour établir
35 un plafond du lac et pour calculer un volume : trop de sources hydrauliques interfèrent alors
36 pour pouvoir différencier l'eau qui proviendrait du lac et l'eau qui proviendrait d'autres zones.
37 Cela n'en est pas moins une cartographie intéressante de l'inondation par remontée de nappe
38 en l'absence théorique de toute autre influence.

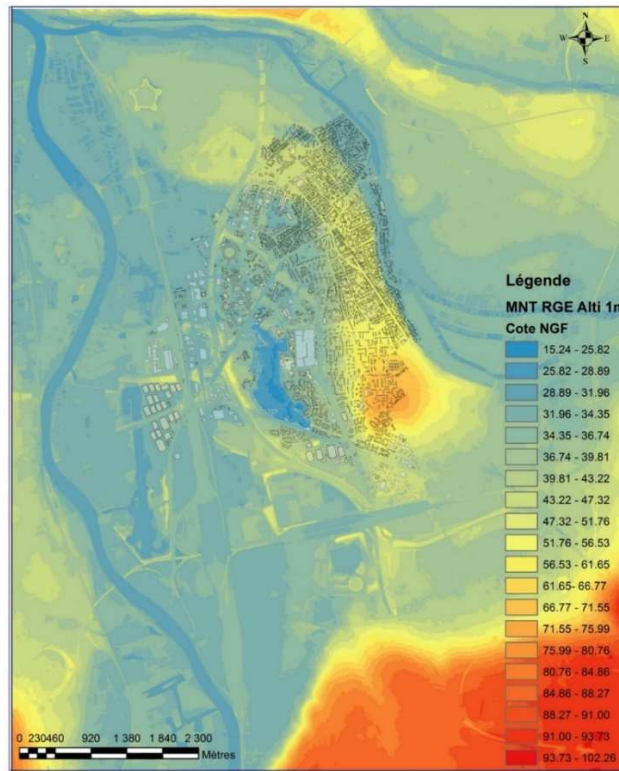
39 Enfin, on a intégré le MNT_FDL_1m_BRN dans le MNT_RGE_1m_IGN sur le domaine
40 d'étude. Le MNT unifié, surface topographique qui sera le toit du modèle géologique, est
41 illustré à la figure 11. Considérant une altitude allant d'une cote NGF de 15 à 102, on passe à

- 1 20 classes d'altitude. Cette échelle donne une classe tous les 4,4 m qui permet de visualiser
- 2 des différences dans la surface de fond du lac (nuances de bleu, figure 11).



- 3 Figure 10. Simulation de la déformation du lac sous l'effet d'une remontée de nappe : de a à f,
- 4 isovalues d'altitude croissante, de la cote 31 à la cote 36 NGF. ArcGIS pro. Dans : J. Brun (2019).

Toit du modèle géologique
 Seine - Marne - Calcaire de Champigny
 Modèle numérique de terrain



Brun - ArcGIS - 27/02/2018

- 5
- 6 Figure 11. Altitude sur l'ensemble du domaine d'étude : MNT_RGE_1m_IGN avec intégration du
- 7 MNT_FDL_1m_BRN (fond du lac). ArcGIS 2017. Dans : J. Brun (2019).

Chapitre 2 – Construction du modèle géologique

La phase suivante a consisté à accoler sous la surface topographique modélisée, dans le volume du domaine d'étude d'aire environ 90 km², un modèle géologique stratifié. Les interfaces stratigraphiques ont par essence une nature probabiliste et sont modélisées sous un outil dédié, le géomodeleur GDM, par interpolation des cotes acquises dans des logs de sondages de la base de données du sous-sol (BSS), sous contrainte de la carte géologique harmonisée (BRGM). Enfin, ces interfaces et cette carte seront intégrées dans le SIG 3D.

Objectifs intermédiaires du volet géologique (chapitre 2)

6. Constituer une BD géologique d'après la BSS et des données propriétaires
7. Construire un modèle géologique 3D du domaine d'étude (72 km²)
8. Insérer des ouvrages souterrains dans le modèle géologique 3D
9. Questionner la régulation du niveau du lac : un plan d'eau qui n'est pas plan ?
10. Etablir un lien entre le cratère et le niveau du lac : la drainance de la nappe

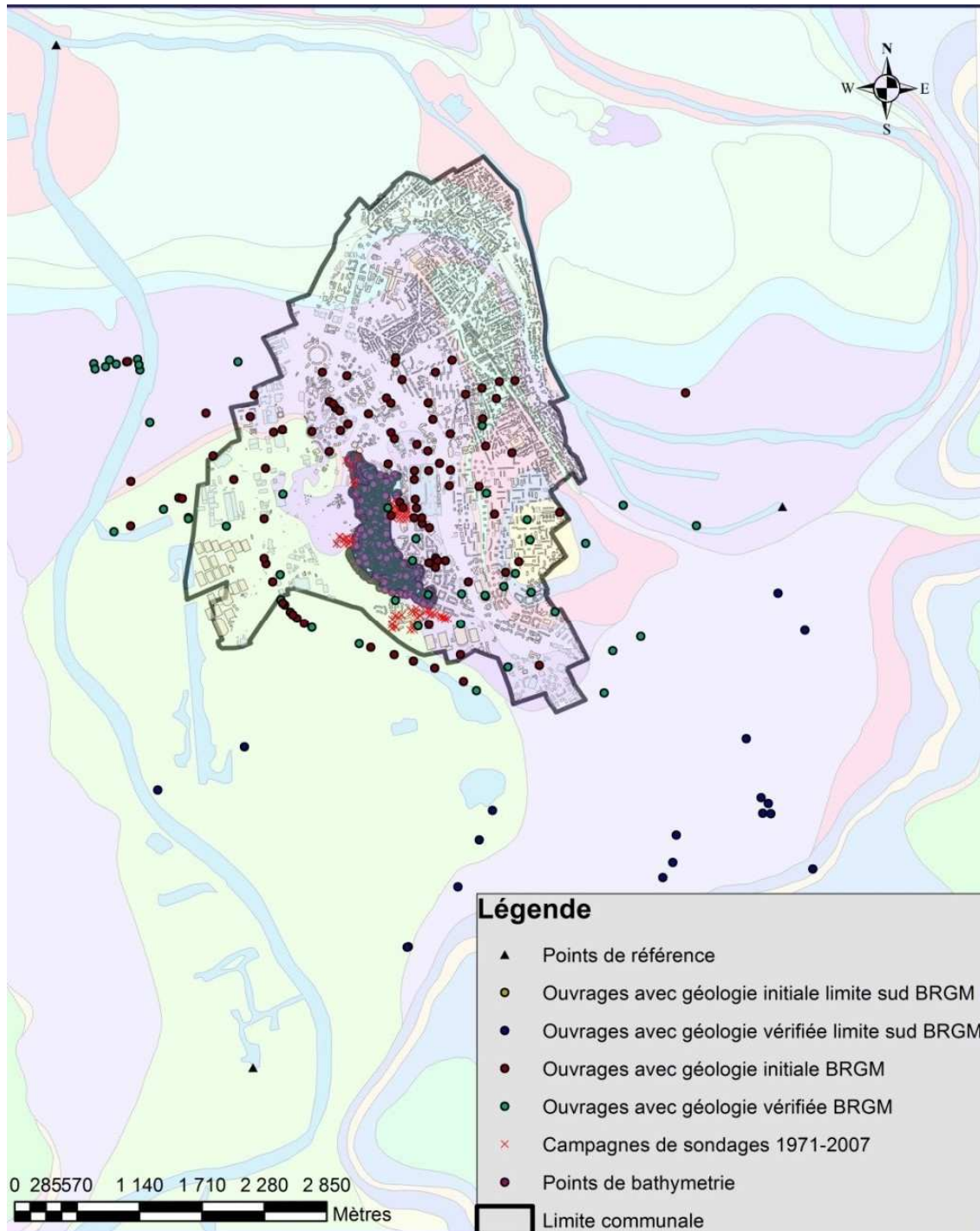
6. Constituer une BD géologique d'après la BSS et des données propriétaires

Les hypothèses faites sur le fonctionnement hydrogéologique du lac ont soulevé au départ la nécessité de réaliser un modèle géologique, à l'aide de la carte géologique harmonisée et de la base de données du sous-sol (BSS) du BRGM : 169 logs de sondages dans le domaine d'étude sont intégrés dans une base de données MS Access. Aux données du BRGM ont été ajoutées des données propriétaires (figure 12). Ce sont les sondages préalables aux constructions de l'île de loisirs, au centre-ville de Créteil côté lac, et à la ZAC de la pointe sud du lac, qui n'étaient pas dans la BSS alors qu'ils dépassent une profondeur de 10 m. Ceux-ci sont rarement intégrés dans la BSS : la responsabilité de la transmission des logs de sondages au BRGM a souvent été diluée entre maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre et entreprises missionnées pour les études de sols, faute de cahier des clauses administratives précis, par absence de pénalités pour manquement de transmission ou par oubli en phase de constitution des dossiers des ouvrages exécutés.

Au total, la base de données constituée regroupe 221 sondages (228 dont 7 éliminés). Cependant, il est clair que la plupart des logs utilisés ici pour constituer la base de données géologiques sous MS Access sont ceux qui étaient disponibles dans la BSS. Ils emploient les codes graphiques harmonisés du BRGM. Certains sondages de la BSS ont été « vérifiés » par le BRGM, c'est-à-dire que les descriptifs lithologiques des strates ont été contrôlés et parfois réinterprétés. En effet, tous ne sont pas sûrs à 100% : par exemple, suite au travail de Briaux (2015), il est apparu que certaines formations avaient pu être mal interprétées ou confondues avec d'autres. À l'heure actuelle (4^e trimestre 2018), des collègues du BRGM continuent de vérifier les interprétations recensées en Ile-de-France. D'autres sondages n'ont pas été vérifiés, ce qui ne les rend pas faux pour autant : seulement, le tri n'a pas été fait parmi les documents téléchargeables et le log géologique « numérique » n'est pas toujours disponible.

1 Il faut dans ce cas reprendre le log papier scanné et incorporer manuellement chaque couche
2 stratigraphique dans la base de données.

3 Un test est effectué pour comparer le Z de début de sondage (Z_{BSS} : tête de forage
4 indiquée dans le log de la BSS) au Z donné par le MNT (Z_{MNT}) dans le pixel qui contient les
5 coordonnées du point. Une carte des différences est produite. La variable Zref considérée
6 dans le tableau 2 est la variable « topographie de référence » ou Z_{MNT} ici donnée par le
7 MNT_RGE_1m_IGN.



8
9 Figure 12. Plan de position des sondages dans la carte géologique harmonisée (BRGM) du
10 domaine d'étude autour du lac de Créteil. ArcGIS 2017. Dans : J. Brun (2019).

1 En milieu urbain, plusieurs sources d'écart sont possibles. Des sondages ont été
 2 effectués sous la topographie actuelle, comme les sondages de construction de la dalle de
 3 l'Hôtel de ville de Créteil (ils font la plus grande partie des 32 valeurs comprises entre -20 et -
 4 4 m). L'inverse existe aussi : des sondages ont été effectués au-dessus de la topographie
 5 actuelle sur une zone en remblai de la zone d'aménagement concerté de la pointe sud du lac
 6 de Créteil, excavée depuis.

7 Cela dit, on note que la majorité des Z de début de sondage (176 sur 217) sont
 8 inférieurs aux Z du MNT. En appliquant le Z des sondages directement dans le modèle
 9 géologique, on aura tendance dans 80% des points à représenter les interfaces entre les
 10 couches un peu plus profondes qu'elles ne sont en réalité.

11
 12 Tableau 2. Résultats statistiques du contrôle de $Z_{BSS} - Z_{MNT}$ notée ici $Z - Z_{ref}$, GDM © BRGM

Statistiques globales sur les différences :					
Variable calculée	Nombre de données	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Z-Zref	217	-16.14	8.45	-1.88	3.09
Z < Zref	176	-16.14	-0.04	-2.59	2.92
Z > Zref	39	0.01	8.45	1.2	1.71

13
 14
 15 Entre les deux sources de données créées avec des méthodes de mesure différentes,
 16 forages anciens et MNT actuel, chacune avec son incertitude intrinsèque de mesure et pas
 17 toujours dans le même référentiel d'origine, il existe forcément une incohérence. En
 18 conséquence, on admettra que les têtes de forages puissent ne pas coïncider en tout point
 19 avec la surface topographique du modèle. Au-delà de cela et des erreurs possibles, ces écarts
 20 représentent l'évolution de la « couche » des remblais urbains et du bâti, la seule qui évolue
 21 à court terme dans le système. Ainsi, le MNT donne logiquement le point le plus haut d'une
 22 surface ; par exemple, pour un croisement en surplomb, le MNT prend en compte le tablier
 23 du pont ou l'estacade. Les écarts sont donc absorbés par cette « couche » variant dans le
 24 temps.

25 La BD de sondages a mis en évidence :

- 26 • la variabilité de l'épaisseur des strates, le caractère lacunaire de certaines
 27 strates, et des décalages verticaux localement à courte distance, tels que celui
 28 mis en évidence par les sondages de part et d'autre du cratère (figure 9) ;
- 29 • l'incertitude associée à la faible densité de sondages dans certaines zones ; un
 30 grand nombre de sondages supplémentaires serait nécessaire pour réduire ces
 31 zones ;
- 32 • la pertinence du modèle géologique : malgré ces zones d'incertitude et ces
 33 décalages à courte distance, son pouvoir prédictif ou interprétatif n'est pas
 34 négligeable ; mais il décroît avec l'éloignement du lac : 29 sondages /km² à
 35 moins de 500 m du lac ; 12 sondages /km² entre 500 et 1000 m ; 2 sondages
 36 /km² à plus de 1000 m du lac.

7. Construire un modèle géologique 3D du domaine d'étude (72 km²)

La modélisation géologique 3D par géomodeleur s'appuie sur la définition d'une pile stratigraphique (figure 13) constituée de « couches », qui conditionne l'interpolation des interfaces géologiques par krigeage. L'hypothèse principale dans l'élaboration de la pile stratigraphique est le nombre d'aquifères qu'elle doit servir à modéliser. On s'est arrêté à deux, l'aquifère alluvial et l'aquifère du Lutétien sous-jacent, séparés par l'écran argileux bien connu dans la formation des sables de Beauchamp, qui forme l'aquitard soutenant la nappe.

L'épaisseur de l'écran argileux est de 4 m en moyenne d'après les sondages, ce qui paraît élevé et doit être relativisé au regard de la faiblesse du jeu de données. L'écran argileux est identifié à partir de 30 % des sondages qui recensent la présence des sables de Beauchamp, soit 19% des 228 sondages du domaine d'étude, ce qui reste faible pour une interpolation sur l'ensemble du domaine d'étude.

Pour situer l'écran argileux dans la « couche » des sables de Beauchamp au sens de la pile stratigraphique, on se réfère aux indications mentionnées dans les rapports de sondages consultés, notamment pour la dalle de l'Hôtel de Ville de Créteil qui est bien documentée : « *les sables de Beauchamp sont argileux au sommet de la couche, ils sont marneux à passages calcaires ou gréseux à la base* » (Simecsol, 1971). On analyse ensuite le Z du toit et du mur de l'écran argileux. En valeur absolue, le mur de l'écran argileux est identifié à une cote de 13,8 NGF en moyenne, soit 2 à 4 m au-dessus du mur moyen (entre 10,17 et 12,17 NGF) calculé dans l'histogramme du mur des sables de Beauchamp. Le toit de l'écran argileux est identifié à une cote de 17,5 NGF en moyenne, ce qui est 1,5 m au-dessus du toit moyen (cote 16 NGF) calculé dans l'histogramme du toit des sables de Beauchamp.

Autrement dit, la « couche » des sables de Beauchamp qui est à définir dans la pile stratigraphique se résumera à presque 4 m d'argile en moyenne constituant les sables de Beauchamp moyens et supérieurs. Quant aux sables de Beauchamp inférieurs, 2 m de sables au minimum, ils seront attribués dans la pile à la « couche » sous-jacente des marnes et caillasses.

Une alternative plus simple peut être proposée en réduisant la pile stratigraphique, avec l'ensemble de l'aquifère réuni en une seule « couche » séparée des sables inférieurs et marnes et caillasses par l'écran argileux (figure 14). Il n'y a plus que deux « couches ». Sont tenues hors de l'analyse dans ce cas la première « couche » de la pile, celle des remblais pour laquelle GDM considère le toit absent, et la dernière « couche », celle du calcaire grossier dont GDM considère le mur absent.

L'écran argileux des sables de Beauchamp est par hypothèse le mur de l'aquifère phréatique. La carte de la valeur interpolée du toit des sables de Beauchamp moyens ou supérieurs (figure 15a) porte sur le modèle brut. Le coloriage est effectué en fonction de la valeur interpolée, du bleu (0 NGF) au rouge (29 NGF). On note sur la figure 15B un regroupement des données de l'épaisseur du multicouche aquifère entre 5 et 20 mètres pour un pic à 15 mètres d'épaisseur.

Pile stratigraphique. PILE

PILE STRATIGRAPHIQUE MODELISEE
C:\Users\Public\Documents de Jerome\Etudes\analyses lac\Donnees cartographiques\19_BRGM_geologie

Formation	Type Surf.	Description	Nom Surf.	n° FORM
HYD		Réseau hydrologique		F11
REM	EROD	Remblais	B11	F10
ALM	EROD	Alluvions modernes	B10	F09
ALA	EROD	Alluvions anciennes	B09	F08
MSG	EROD	Marnes supra-gypseuses	B08	F07
CCH		Calcaire de Champigny	T06	F06
MIG		Marnes infra-gypseuses	T05	F05
MSO		Sables Monceau+Marno-calc St O	T04	F04
SBS		Sables Beauchamp moy/>	T03	F03
MCI		Marnes et caillasses	T02	F02
CGR		Calcaire grossier	T01	F01

1
2 Figure 13. Définition de la pile stratigraphique. Multilayer, GDM © BRGM. Dans : J. Brun (2019).

3
4

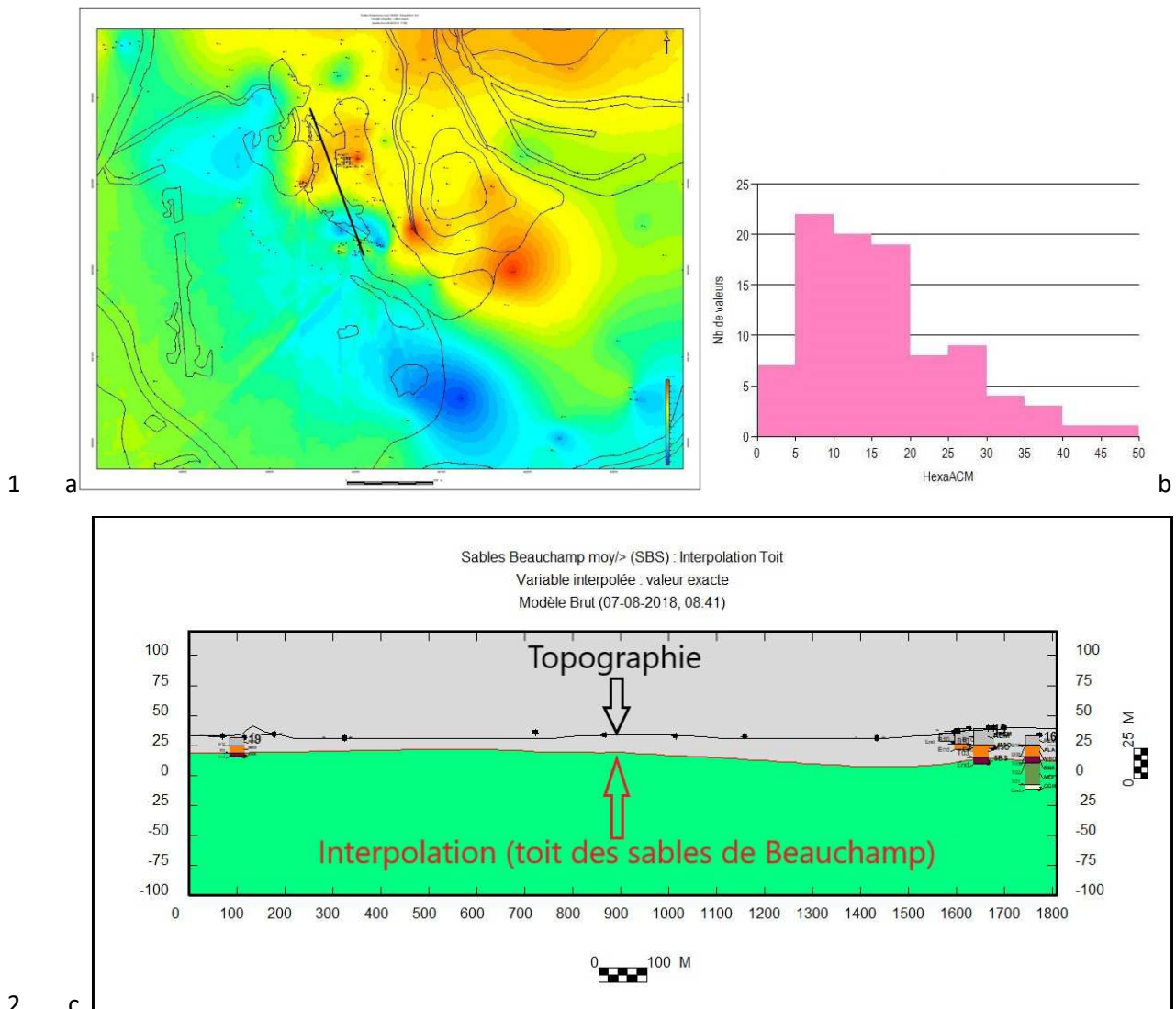
Pile stratigraphique. PILE

PILE STRATIGRAPHIQUE MODELISEE
C:\Users\Public\Documents de Jerome\Etudes\analyses lac\Donnees cartographiques\19_BRGM_geologie

Formation	Type Surf.	Description	Nom Surf.	n° FORM
REM		Remblais		F04
ALM		Alluv, Calc, Marn, Sabl	T03	F03
MCI		Marnes et caillasses	T02	F02
CGR		Calcaire grossier	T01	F01

écran médian -> argileux

5
6 Figure 14. Simplification de la pile stratigraphique par regroupement des couches composantes
7 de l'aquifère phréatique complet et situation de l'écran argileux des sables de Beauchamp.
8 Multilayer, GDM © BRGM. Dans : J. Brun (2019).

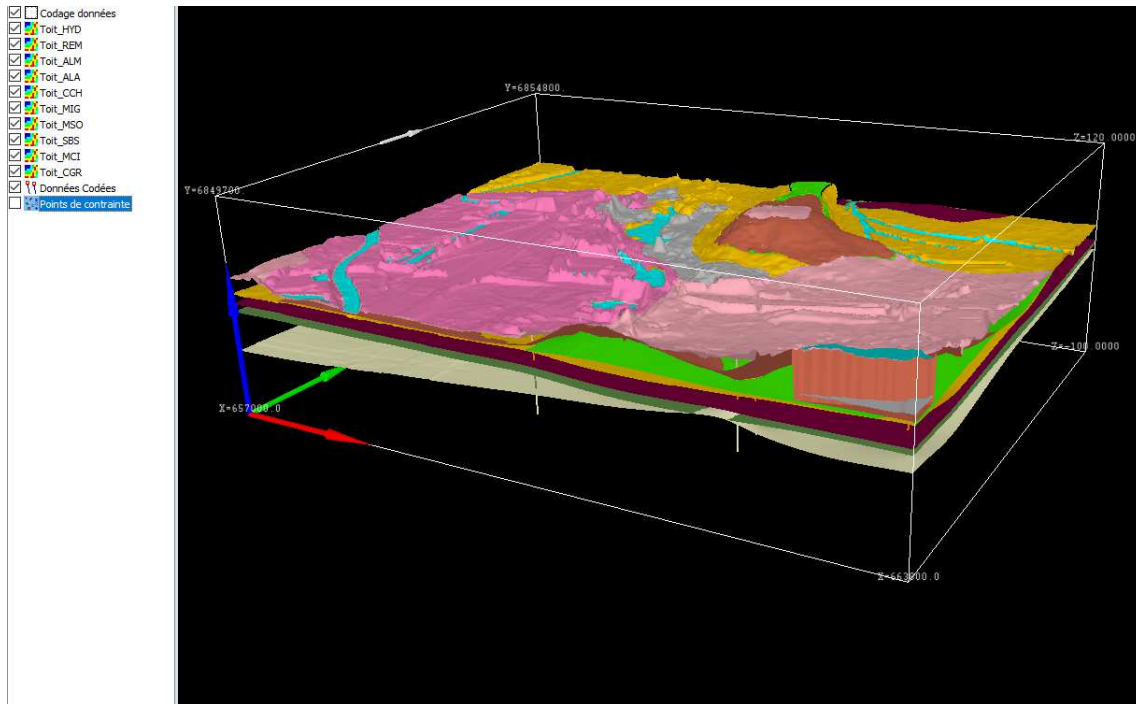


3 Figure 15. **a.** Interpolation de l'interface : sables de Monceau / sables de Beauchamp ; trait de
 4 coupe. **b.** Histogramme des valeurs brutes d'épaisseur de l'aquifère complet au-dessus de l'écran
 5 argileux. **c.** Coupe dans le toit interpolé des sables de Beauchamp et contrôle du résultat. GDM
 6 © BRGM. Dans : J. Brun (2019).

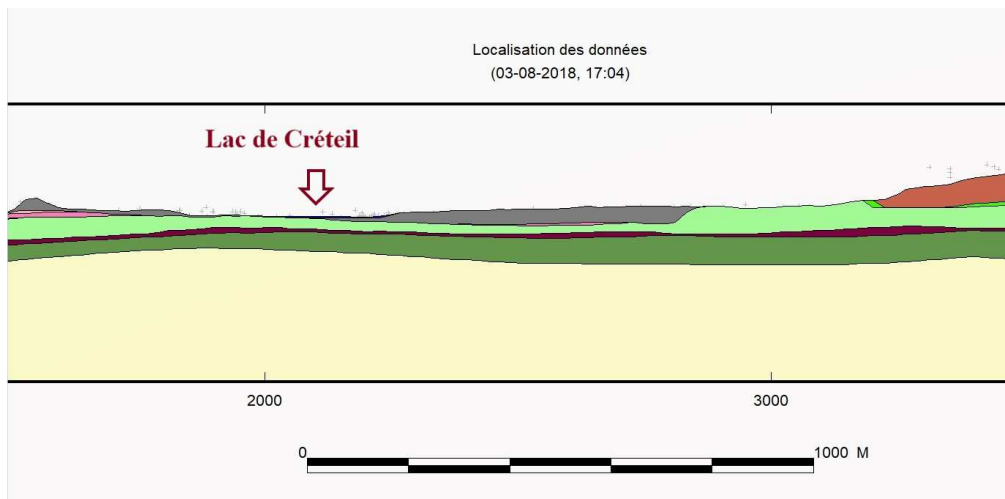
7

8 Une fois interpolées les interfaces (figure 15C), on procède à la construction du modèle
 9 (figure 16) avec les interfaces des « couches » de la pile stratigraphique de la figure 13.
 10 L'interface la plus profonde est le toit du calcaire grossier (CGR). On effectue un zoom sur la
 11 zone du lac de Créteil en réalisant des coupes dans le modèle 3D (figure 17).

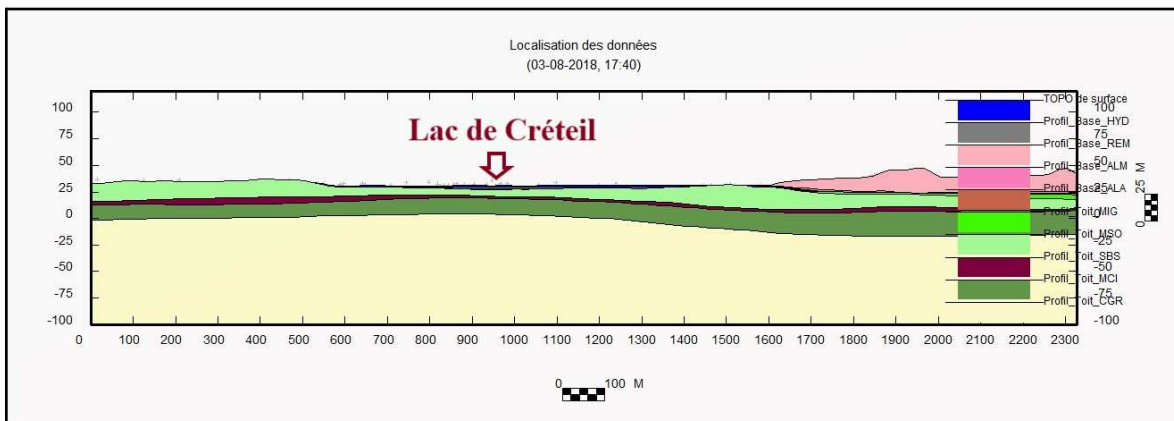
12 Le modèle géologique est alors converti dans le SIG 3D qui permet aussi de visualiser
 13 spatialement le cratère et le point le plus bas de la surface dénommée fond du lac. L'analyse
 14 SIG de l'intersection entre le MNT du fond du lac et les strates géologiques démontre un
 15 contact géométrique entre le volume d'eau du lac et l'aquifère profond (celui des sables de
 16 Beauchamp inférieurs et des marnes et caillasses). Ceci est en faveur de l'existence d'un
 17 échange vertical d'eau du lac avec la nappe des marnes et caillasses qui confirme l'hypothèse
 18 faite sur la figure 9.



1
 2 Figure 16. Modèle complet 3D du domaine d'étude après interpolation des interfaces. Vue depuis
 3 le sud-est. GDM © BRGM. Dans : J. Brun (2019).



4 a



5 b
 6 Figure 17. Zoom sur le lac de Créteil. a. Coupe ouest-est. b. Coupe nord-sud et légende de la
 7 pile stratigraphique. GDM © BRGM. Dans : J. Brun (2019).

8. Insérer des ouvrages souterrains dans le modèle géologique 3D

Les échanges entre la nappe phréatique et son environnement peuvent être modifiés par les constructions aux fondations profondes qui sont des obstacles à l'écoulement souterrain.

Les bâtiments choisis se répartissent en plusieurs îlots : ZAC de la pointe sud du lac, quartier de la Source, du Port, dalle de l'Hôtel de ville de Créteil, préfecture du Val-de-Marne, maisons terrasses, Novotel, Lycée Léon Blum. Il s'agit de récupérer des données selon la typologie des fondations pour constituer une base de données de points avec les attributs suivants : nombre de pieux, diamètre, profondeur, plan des fondations. Tous les plans n'étant pas disponibles pour la géolocalisation, il est parfois nécessaire de reconstituer les fondations de façon réaliste. Par exemple, le sous-sol de la pointe sud du lac ressemble à celui de l'Île-de-Loisirs : en moyenne, 12 m de remblais limoneux, 7 m de marno-calcaire et 2 m d'argiles ou sables de Beauchamp, soit 20 m avant d'accéder au calcaire. C'est pourquoi, pour la ZAC de la pointe sud du lac construite à partir des années 2000, on raisonne sur des profondeurs de 20 m pour des bâtiments en R+3, 30 m pour des bâtiments en R+4, et 100 pieux par bâtiment. On comptabilise également un niveau de parking, ce qui implique d'abaisser de 2,20 m les cotes théoriques. Enfin, le diamètre des pieux dépend de la nature des roches. En résumé, on peut indiquer les principales données reconstituées pour les fondations des bâtiments autour du lac quand les archives manquent (tableau 3).

Tableau 3. Bases de calcul pour la reconstitution d'une base de données de fondations du bâti autour du lac de Créteil, d'après entretien avec la SEMIC

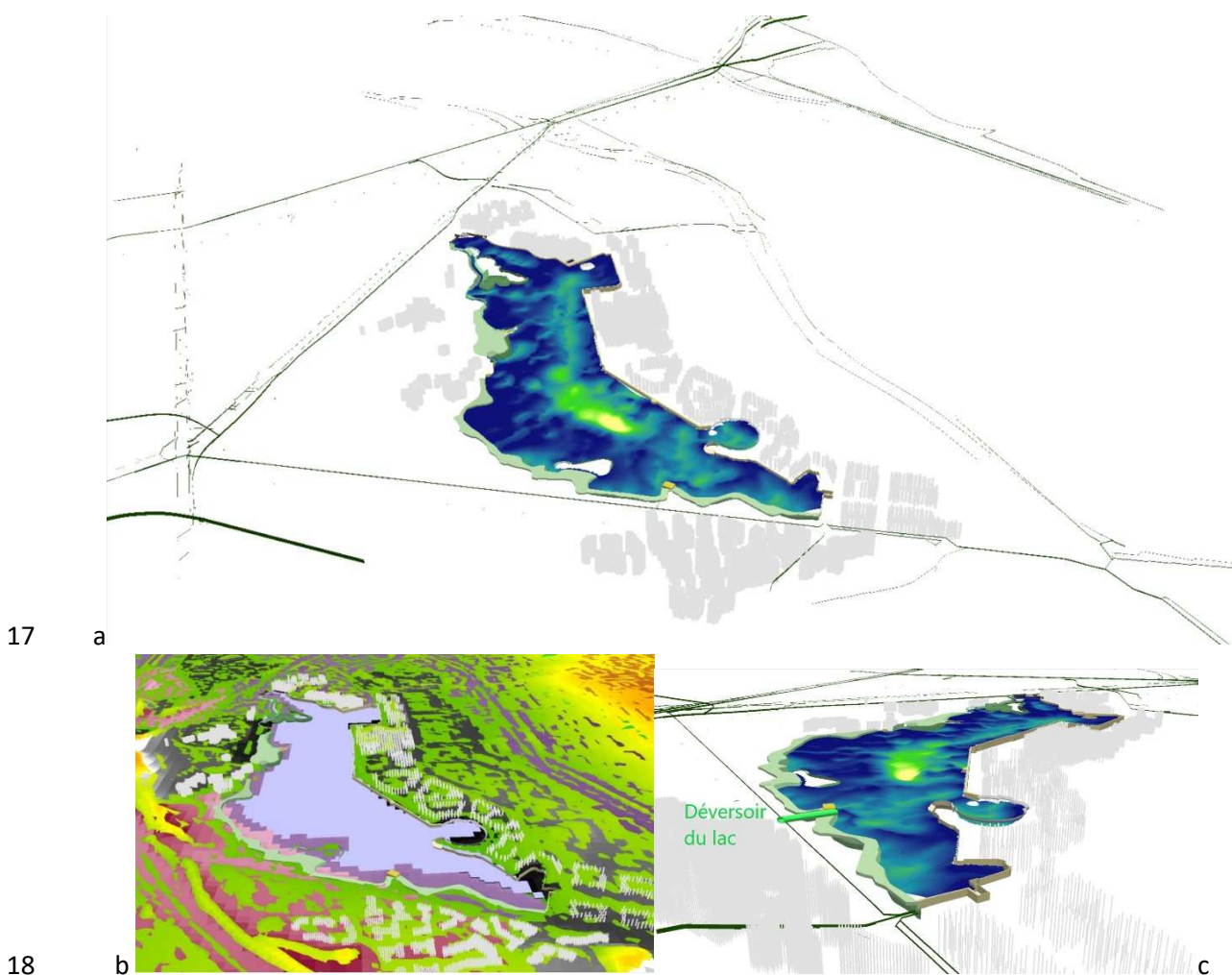
Localisation	Profondeur des fondations	Diamètre des fondations
ZAC de la pointe sud du lac en R+3 ou R+4	20 à 30 m	0,80 m
Quartier de la Source en R+6 du côté de la rue de Falkirk, R+4 du côté sud et canal	20 m	0,55 m
Quartier du Port, R+4 en front de lac	15 m	0,55 m
Quai Jacques Offenbach	15 m	0,55 m
Quai de la Croisette similaire dans ses constructions à l'avenue de la France libre, hauteurs plus élevées	20 m	0,80 m
Maisons terrasses rue Jean Gabin	15 m	0,55 m
Novotel R+1	15 m	0,55 m
Lycée Léon Blum	15 m	0,55 m

Le SIG 3D permet donc d'intégrer les fondations du bâti (figure 18). La sélection n'inclut que les constructions dans un rayon de 500 m autour du lac : 4 464 fondations pour 188 îlots d'habitation, bâti industriel, bâti remarquable, bâti indifférencié et équipements sportifs, soit une densité de 1 240 fondations au km² pour des diamètres de 0,25 à 1 m et des profondeurs de 12,75 à 33,90 m.

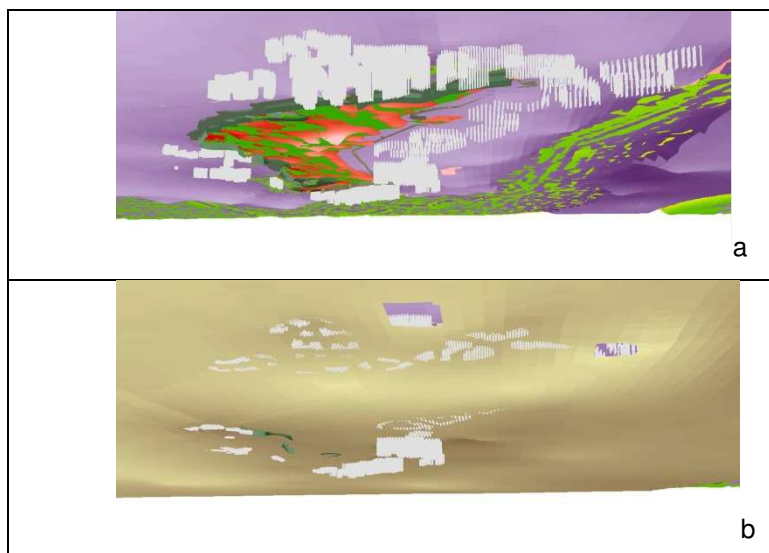
1 Pour visualiser cette information, on peut également se positionner sous la surface de
2 fond du lac, puis ajouter une par une les interfaces géologiques à profondeur croissante. Ainsi,
3 on observe les relations entre les fondations et les couches traversées (figure 19).

4 Dès lors qu'un transfert des eaux du lac vers l'ouvrage de décharge (figure 20) est
5 possible même si sa conception est désormais mise en défaut (cf. section 9) par l'évolution du
6 fonctionnement hydrogéologique, on incorpore le réseau d'assainissement départemental au
7 SIG 3D (figure 18) pour visualiser toutes les possibilités de gestion du niveau du lac ou pour
8 anticiper les effets des fluctuations piézométriques sur les réseaux enterrés de la DSEA et de
9 la ville.

10 Pour ce faire, on utilise le fichier vectoriel du linéaire d'assainissement issu du service
11 des études pré-opérationnelles du département du Val-de-Marne. La hauteur de base utilisée
12 est la cote radier et l'extrusion est effectuée à partir d'une formule SQL « - profondeur / 10 ». On met un
13 signe négatif car on raisonne en profondeur et non en hauteur d'extrusion, et on
14 divise par 10 pour limiter l'effet de paroi : en effet, l'extrusion des lignes sous ArcScene produit
15 des murs... et il vaut mieux valoriser ici la similitude visuelle avec une canalisation plutôt qu'un
16 mur.



19 Figure 18. Incorporation du réseau d'assainissement et des fondations du bâti (en gris) au modèle
20 3D du lac de Créteil. a. Vue plongeante depuis le sud. b. Vue du MNT en 3D. c. Position du
21 déversoir inopérant. ArcScene 2018. Dans : J. Brun (2019).



1 Figure 19. Le lac et les ouvrages dans le modèle géologique, en vue de dessous. a. Fondations
 2 traversant les sables de Monceau et le marno-calcaire de Saint-Ouen. b. En se plaçant plus en
 3 profondeur, on ne voit plus que les pieds des fondations traversant les sables de Beauchamp
 4 moyens ou supérieurs. ArcScene 2018. Dans : J. Brun (2019).

5

6 La modélisation 3D permettra d'effectuer des sondages virtuels prévisionnels pour
 7 visualiser sur une zone précise les couches qui seront traversées par un forage à l'avenir,
 8 d'évaluer la vulnérabilité des habitations à la remontée de nappe, et de proposer des solutions
 9 aux remontées ponctuelles de la nappe. Enfin, les interactions entre lac et sous-sol invitent à
 10 mettre en perspective 40 ans d'urbanisation de 1970 à 2010.

11

12 [9. Questionner la régulation du niveau du lac : un plan d'eau qui n'est pas plan ?](#)

13 Le dispositif le plus ambitieux pour abaisser le niveau du lac par la main de l'homme
 14 aura été l'utilisation des quatre vannettes de l'ouvrage de décharge du réseau de la DSEA.
 15 Localisé sur la rive ouest de l'île de loisirs, il est surmonté d'un promontoire en béton (figure
 16 20). L'ouvrage de décharge permettrait un phénomène de chasse définitive jusqu'à la cote
 17 30,66 m NGF du lac, avec écoulement continu vers l'ouvrage XV, c'est-à-dire l'assainissement
 18 départemental vers la Seine.

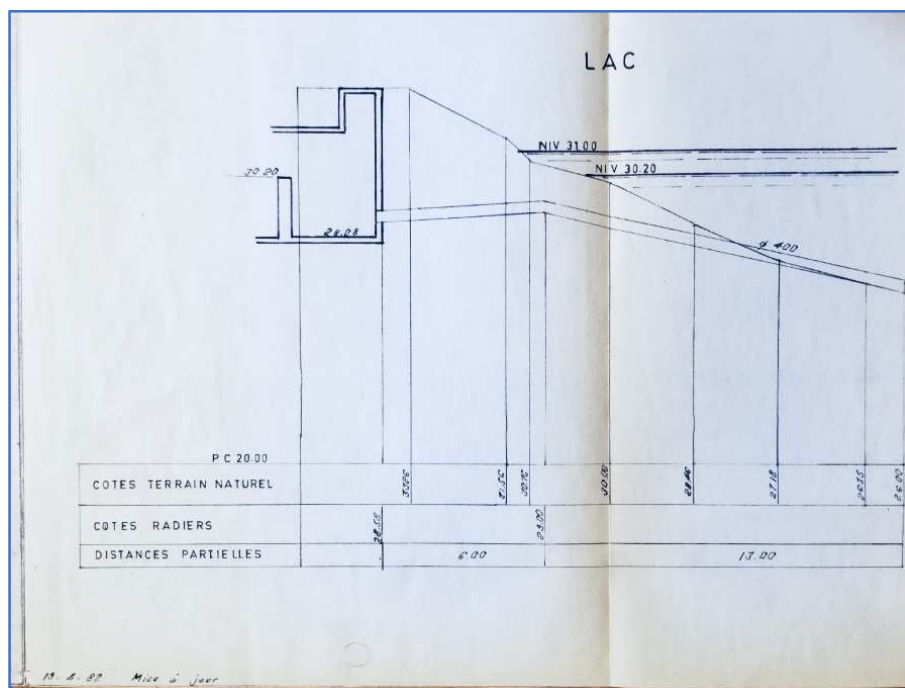
19 Utilisées entre 1983 et 1985 pour faire baisser le niveau du lac, les quatre vannettes
 20 ont fait l'objet d'une rénovation complète en 2010-2011 par la DSEA. L'ouvrage de décharge
 21 dans lequel se trouvent les vannettes dispose d'une mire. Le sommet de la mire est à 31,10 m
 22 NGF (29,10 m NGF de cote de référence + 2 m de hauteur de mire). Les services du
 23 département ont effectué un levé topographique le 25 juillet 2018 : le sommet de la mire
 24 instrumentée était bien à 31,10 NGF. Le seuil de fuite est réglé à la cote $Z = 30,67$ NGF.

25 Le mince filet d'eau constaté lors des travaux de rénovation des quatre vannettes (fin
 26 2010 – début 2011) était concomitant d'un niveau du lac oscillant entre 30,77 et 30,86 m NGF,
 27 soit de l'ordre de 10 à 20 cm au-dessus de 30,67 NGF + / - 0,02 m, ce qui aurait dû provoquer
 28 un écoulement franc et non un « filet d'eau ». À ce jour, elles fonctionnent toutes les quatre
 29 et restent en position ouverte depuis mai 2013. Alors que d'après l'enregistrement du niveau

1 du lac, celui-ci s'élève pendant de longues périodes au-dessus de ce seuil, il n'y a plus
2 d'écoulement permanent de l'eau du lac vers l'ouvrage XV départemental. La DSEA ajoute que
3 « les tuyaux des vannettes ont été nettoyés avant l'inspection télévisée du 11 mars 2015 et
4 qu'aucun déversement n'a été constaté.

5 Cela peut révéler deux choses : soit que cet ouvrage n'est pas capable d'écarter le lac,
6 même pendant une période où celui-ci est fortement alimenté par la nappe, soit que le
7 dispositif de mesure du niveau du lac n'est pas pertinent. Un colmatage des quatre vannettes
8 par la vase et les déchets végétaux de la roselière à proximité empêcherait l'ouvrage de
9 fonctionner : c'est peu probable selon la DSEA qui a entretenu l'ouvrage. Il resterait donc, pour
10 expliquer le phénomène de cote élevée du lac sans écrêtage par l'ouvrage, l'hypothèse d'une
11 surface d'eau non horizontale, qui n'est pas absurde pour un lac de façon générale.

12



13

14 Figure 20. Coupe du déversoir du lac. Dans : SEMAEC (1982) Déversoir du lac – Profil en long.

15

16 En effet, à la différence de l'idée qui prévalait auparavant selon laquelle le lac aurait la
17 nappe alluviale pour exutoire à travers son flanc ouest – hypothèse qui n'impliquait pas une
18 pente significative du plan d'eau alimenté par la nappe alluviale à l'est – il est désormais
19 probable (voir section 9) qu'il s'équilibre par drainage au fond du cratère, ce qui en fait une
20 variante d'un lac terminal (Lee & Swancar, 1997). Une déformation de la surface du lac n'est
21 donc pas à exclure, un rabattement en entonnoir similaire en forme à ce que produirait un
22 pompage, quoique d'amplitude beaucoup moins grande bien sûr.

23 Ceci expliquerait comment le niveau du lac enregistré à une extrémité peut monter au-
24 dessus de la cote du déversoir, situé en rive sud-ouest donc beaucoup plus près du cratère du
25 fond du lac, alors qu'on n'observe pas ou très peu d'eau passer par ce « déversoir ».

26

10. Etablir un lien entre le cratère et le niveau du lac : la drainance de la nappe

Il a été démontré aux sections 5 et 7 que l'écran argileux de la formation de Beauchamp est en effet traversé par le fond du lac. Alors un flux de drainance entre deux aquifères superposés peut exister et ce système communicant influence le niveau du lac, en intersaison comme en période de crue. Cet échange se fait probablement autour du point bas du cratère.

La drainance est un phénomène connu dans la littérature, interprété depuis longtemps d'après des mesures piézométriques dans l'aquifère multicouche du Lutétien du Bassin de Paris. Néanmoins, elle a été rarement observée et caractérisée en termes géométriques et géologiques. Sous la forme d'un entonnoir de dissolution, provoquée ou accélérée par la mise à nu des assises consécutives à l'extraction des alluvions, on a ici un exemple de court-circuit hydraulique à l'échelle de quelques décamètres.

On formule ainsi l'hypothèse que le cratère est un entonnoir karstique dont la formation, par dissolution de niveaux gypseux, démontre l'existence d'un chemin préférentiel de drainance entre l'aquifère alluvial et un aquifère plus profond. Il s'agit des sables inférieurs de Beauchamp et marnes et caillasses (MCI) et du calcaire grossier (CGR), ensemble appelé « l'aquifère du Lutétien », dont la nappe est généralement en charge sous l'écran argileux des sables de Beauchamp moyens ou supérieurs.

Une double campagne piézométrique a été faite par le BRGM pour cartographier la nappe de l'aquifère multicouche Lutétien + Yprésien en basses eaux en octobre 2013 et en hautes eaux en avril 2014 (Bault et al., 2015). Les cotes piézométriques n'évoluent quasiment pas entre les basses eaux et les hautes eaux dans la majeure partie du système multicouche où la nappe est libre (différentiel de 0,3 m dans les boucles de la Seine, jusqu'à 1 m sous les plateaux), les sens d'écoulement non plus. Cette campagne a confirmé la difficulté à localiser des secteurs où deux nappes (aquifère Lutétien et aquifère Yprésien) sont distinctes (au nord du Petit Morin, les argiles de Laon sont présentes) et à les différencier de secteurs où elles sont en équilibre hydrostatique (au sud du Petit Morin). La nappe du Lutétien est captive au cœur de la Brie, sous le synclinal de Saint-Denis et sous les alluvions de la Marne et de la Seine. Dans ces deux vallées, son gradient moyen est très faible, environ 0,05 %. Un piézomètre au Lutétien + Yprésien indifférencié, situé tout près du parc départemental de la plage bleue, a été mesuré à 31,82 NGF en hautes eaux 2014 (mais pas en basses eaux 2013, hélas).

Selon la saison, cette nappe captive peut présenter un déficit ou un excès de charge sur la nappe alluviale ; le niveau du lac peut baisser ou monter sous l'effet de l'évolution piézométrique des deux nappes, conjuguée à une drainance descendante ou ascendante. La drainance descendante ne peut se produire que pendant une période où le niveau piézométrique dans l'aquifère Lutétien est plus bas que la charge de la nappe alluviale. Cela peut arriver à la fin d'une période où l'impluvium du Lutétien a été peu arrosé, si sa charge baisse fortement ; mais cela n'arrive pas forcément chaque année. Cela peut arriver aussi dans une saison où la nappe alluviale est en recharge intense par les précipitations ou les cours d'eau. Et cela peut arriver d'autant plus si ces deux phénomènes sont concomitants. Comme l'aquifère Lutétien est beaucoup plus vaste que celui des alluvions, car c'est un aquifère régional du Bassin de Paris, il a une inertie considérable. Cela explique le retard dans les effets observés. Notamment, il faut des mois pour qu'une sécheresse ou un déficit dans les régions

1 d'alimentation du Lutétien dans la Marne se fasse sentir au centre du Bassin de Paris dans
2 l'aquifère Lutétien. Quand l'aquifère alluvial et l'aquifère Lutétien sont en équilibre hydro-
3 statique, ce qui est le cas à certains moments de l'année, toute élévation rapide du niveau du
4 lac (alimenté par la nappe alluviale) peut relancer la drainance descendante. Partant d'un tel
5 équilibre, le niveau du lac monte dès que le débit d'alimentation du lac par la nappe alluviale
6 et les apports extérieurs (dont le ruissellement) est supérieur au débit de la drainance
7 descendante par l'entonnoir vers l'aquifère inférieur. Sinon, les niveaux montent de concert.

8

9 **Encadré 3 – Pour en savoir plus –Volume différentiel de marnage**

10 Dans ce schéma d'interprétation, le volume différentiel d'eau entre le niveau annuel minimal
11 du lac et son niveau annuel maximal résulte du « refus » de drainance descendante par l'aquifère
12 Lutétien dans les périodes de l'année où il était lui-même bien alimenté par son impluvium. Le refus
13 est constitué en partie d'alimentation de la nappe alluviale non absorbée par la nappe sous-jacente et
14 pour une autre part de drainance ascendante.

15 Le solde du refus, déjà estimé à la section 5, n'est pas le refus cumulé. Il résulte de périodes
16 de refus étalées dans le temps, alternées avec des périodes où la drainance descendante résorbe un
17 refus antérieur, et l'aquifère Lutétien finira par absorber le solde du refus plus tard, au cours de l'année
18 suivante. Notons que la convention adoptée dans le calcul effectué à la section 5 supposait un marnage
19 de 1 m donc surestime le solde du refus, étant donné que le marnage du lac dans le secteur du
20 dispositif d'enregistrement est en général plus proche de 30 cm que de 1 m.

21 Cependant, le niveau maximum du lac observé sur 4 ans a été 30,94 NGF en mars 2013 et le
22 niveau minimum sur la même période a été 30,31 NGF en août 2015. Un marnage supérieur à 60 cm
23 est donc envisageable sur plusieurs années (figure 32). De plus, l'observation du niveau du lac est
24 effectuée au nord du lac, en-dehors de l'influence du cône de dépression qui se forme probablement
25 autour du cratère.

26

27 Seule la capacité de la nappe du Lutétien sous-jacente à stocker pourrait être « utile »
28 en situation d'inondation par crue de la nappe alluviale, et cette utilité serait seulement en
29 termes de résorption de l'inondation après-coup, et non pas pour la prévoir ou la prévenir.

30 En conclusion, l'évacuation des eaux de la nappe alluviale poserait une difficulté aigüe
31 si des pluies intenses venaient à se produire sur le Val-de-Marne alors que les niveaux de la
32 Marne et de la Seine, donc des alluvions, étaient déjà très hauts en même temps, de façon
33 concomitante avec un niveau de charge élevé dans l'aquifère du Lutétien. Cet excès de charge
34 serait lui-même hérité de pluies plus anciennes, datant de plusieurs semaines ou mois sur les
35 bassins versants et les affleurements alimentant l'aquifère du Lutétien, ou encore par
36 drainance ascendante venant de l'Yprésien. En conséquence, une inondation par
37 débordement de cours d'eau dans la plaine commune à la Seine et la Marne pourrait être
38 renforcée par une remontée des nappes (alluviale + Lutétien) et aggravée par un
39 débordement du lac. Elle affecterait alors le centre-ville de la commune préfecture du Val-de-
40 Marne, c'est-à-dire le centre de la gestion de crise, plus le centre commercial régional, la
41 station d'épuration régionale, des axes de circulation vitaux... La carte d'inondabilité conçue
42 sur l'hypothèse de la crue de 1910 pourrait alors se trouver prise en défaut.

Chapitre 3 – Construction du modèle hydrogéologique

Rien ne permet de penser que la nappe alluviale fonctionnerait encore comme en 1980 ou en 1986, minimum historique du lac. Notamment, l'alimentation de la nappe par les eaux pluviales provenant du Mont-Mesly, avec un point haut piézométrique situé au sud-est du Mont-Mesly qui était dessiné sur la carte de Chesterikoff au niveau de l'isopièze 34 m, et une ligne de partage des eaux à ce niveau, n'existent probablement plus. Il est vrai que dans les données piézométriques à notre disposition pour la période 2013-2016, rien ne permettrait de détecter un tel point haut même s'il existait. Mais tous les arguments vont à l'encontre.

D'abord, l'étude de Chesterikoff & Chevreuil (1987) a été publiée pour les données piézométriques de novembre 1977 à octobre 1980, soit une période antérieure à l'adjonction du réseau de collecte des eaux pluviales du Mont-Mesly avec rejet au lac, qui date d'avril et mai 1981, avec aménagement des deux débouchés de diamètre 1,5 m sur l'exutoire du Mont-Mesly en 1982 (DDE94, 1982). Ensuite, les charges imposées aux limites de la nappe alluviale par la Seine et la Marne ont beaucoup changé depuis les années 1980. Enfin, la disparition des prélèvements industriels dans les nappes du Lutétien et de l'Yprésien permettant la remontée générale de la piézométrie depuis les années 1990 a probablement un effet sur la nappe alluviale. Dans la Brie, le niveau de la nappe dans l'aquifère Lutétien est couramment 5 m plus en haut en 2014 qu'en 1974 (Bault et al., 2015). Il convient donc de remettre en question la carte piézométrique de Chesterikoff. Une étude de détail des mesures piézométriques des dernières années permet d'actualiser la carte des courbes isopièzes de la nappe.

Modèle conceptuel : deux nappes en relation hydraulique par drainance

A dire d'expert, les essais de nappe par pompage dans les marnes et caillasses dans des secteurs où elles sont surmontées par les sables de Beauchamp, dont l'écran argileux a été plus ou moins érodé avant dépôt des alluvions, produisent une courbe de Theis typique d'une nappe captive au début de l'essai, suivie d'un plateau démontrant une réalimentation : les alluvions sont donc drainées vers le bas à travers la formation de Beauchamp qui se comporte comme un semi-perméable. Dans le secteur d'étude de Créteil, s'il ne semble pas que l'écran argileux existe partout, il serait encore moins plausible d'affirmer qu'il fut largement érodé. On l'a donc considéré dans la pile stratigraphique, ce qui implique son existence partout dans le modèle, avec cependant une épaisseur très fine donc un rôle négligeable autour des sondages où il n'était pas observé.

Si l'on ne suppose pas une déconnexion entre le fleuve et la nappe alluviale, le fait que le niveau de la nappe phréatique dans le secteur du lac soit inférieur à celui de la Seine signifie que la mesure piézométrique a été faite dans un secteur où la nappe est rabattue. C'est un argument en faveur de l'existence d'un flux de drainance descendante, des alluvions vers les marnes et caillasses, passant par le fond du lac. Dans les années 1970, la surface piézométrique de la nappe du Lutétien était plusieurs mètres plus bas que la surface piézométrique des alluvions ; à présent, étant moins soumise à des pompages, la nappe du Lutétien peut être revenue à un état quasi naturel, à savoir captive sous l'écran argileux de la formation de Beauchamp (figure 21) ou venue à l'équilibre avec la nappe phréatique. Un flux de drainance ascendante peut alors exister de façon saisonnière.

Objectifs intermédiaires du volet hydrogéologique (chapitre 3)

11. Constituer une base de données hydrologique et piézométrique sur le domaine
12. Fixer les conditions aux limites, caler et vérifier le modèle hydrogéologique 3D
13. Créer des variantes du modèle pour comprendre l'influence du lac
14. Simuler des scénarios recherchant l'effet des ouvrages souterrains insérés
15. Discuter le modèle en le confrontant à un piézomètre dans le secteur nord

11. Constituer une base de données hydrologique et piézométrique sur le domaine

Si la nappe des marnes et caillasses n'était pas là pour jouer le rôle de tampon, alors la nappe alluviale oscillerait brusquement au gré des précipitations et du taux d'infiltration et de recharge (y compris les éventuels apports de réseaux fuyards et de dispositifs d'infiltration). Cela ne pourrait pas être observé avec des relevés piézométriques au mieux mensuels tels que ceux disponibles dans ce projet, donc on ne peut pas prouver l'effet tampon.

Dire que c'est la même nappe serait un raccourci. Bien sûr, quand des nouveaux piézomètres seront implantés à l'avenir, si le choix était fait de les crépiner en continu sur toute l'épaisseur jusqu'au calcaire grossier, on ne pourra pas conclure à autre chose qu'un aquifère unique. C'est une hypothèse simplificatrice de plus en plus souvent faite par les bureaux d'études géotechniques, implicitement, et cela a été notamment le cas lors des reconnaissances préalables aux projets du Grand-Paris-Express. C'est regrettable. Il y a bien deux aquifères avec chacun sa dynamique, même si les niveaux tendent à s'égaliser.

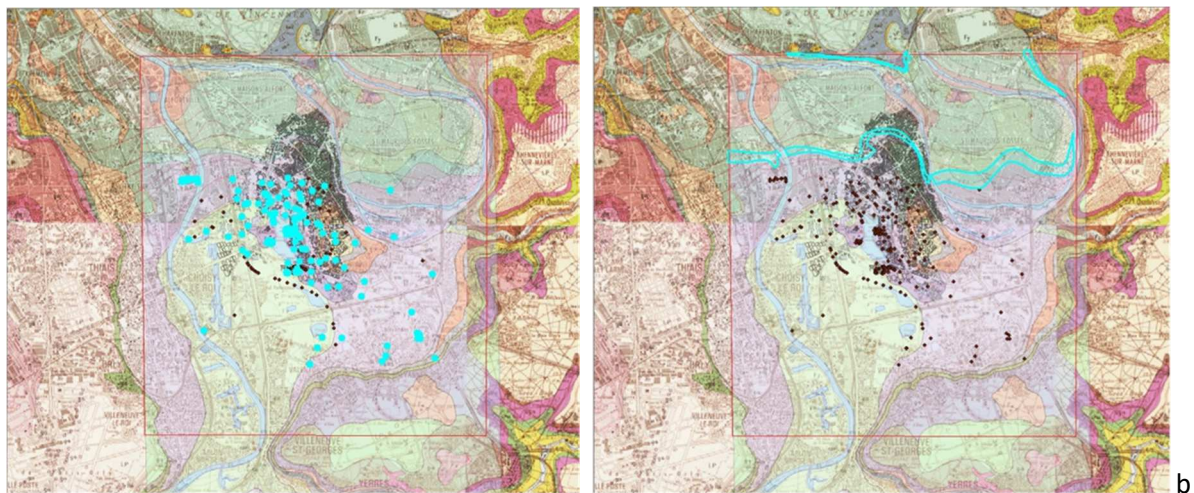


Figure 21. Les sables de Beauchamp moyens ou supérieurs (contenant l'écran argileux) : **a.** Les sondages où leur toit est recensé ; **b.** Leur affleurement dans la carte géologique au 1/50 000. ArcGIS 2018. En fond : les 4 feuilles imprimées du BRGM et la carte harmonisée (cf. figure 12).

Les données de sondages de la BD Access formée au chapitre 2 ont été intégrées dans l'environnement FeFlow. Les données hydrologiques (figure 22) viennent de 2 limnimètres sur chacune des deux rivières, des enregistrements des précipitations interprétés par Météo France et la moyenne de quatre pluviographes autour du lac, et de 15 piézomètres surveillés mensuellement par la DSEA (Val-de-Marne) pendant la période 2013-2016.

1 Le niveau du lac est-il corrélé à la pluie ou à la surface piézométrique ? La figure 22
2 montre le niveau moyen des 15 piézomètres situés autour du lac de Créteil et au sud. Pour
3 chaque rivière, le niveau dessiné est la moyenne de deux limnimètres, un à l'amont et l'autre
4 à l'aval du lac. Les variations de niveau de la nappe et du lac pour 48 mois (2013-2016) montre
5 que le niveau du lac est en cohérence seulement avec les piézomètres et les rivières, non
6 corrélé avec la pluie, à moins que l'on recherche un décalage de l'ordre de 10 semaines. Ces
7 niveaux révèlent seulement une tendance globale dans l'hydrosystème et aucune conclusion
8 ne peut en être tirée sur les sens précis des flux entre les masses d'eau. Une modélisation
9 hydrodynamique de la nappe est nécessaire pour comprendre le système.

10 12. Fixer les conditions aux limites, calage et contrôle du modèle hydrogéologique 3D

11 Le modèle géométrique du lac effectué au chapitre 1 n'est pas valorisé totalement
12 dans le chapitre 3. En effet, les limites du lac deviennent approximatives, avec une résolution
13 entre 50 et 100 m, en raison du maillage automatique par des tétraèdres de taille variable
14 permettant de s'adapter à une géométrie complexe. Cependant, la précision des limites du
15 lac entrées dans FeFlow est suffisante à l'échelle du modèle actuel. Elle n'a pas une influence
16 notable sur les résultats d'entrée et sortie d'eau dans le lac.

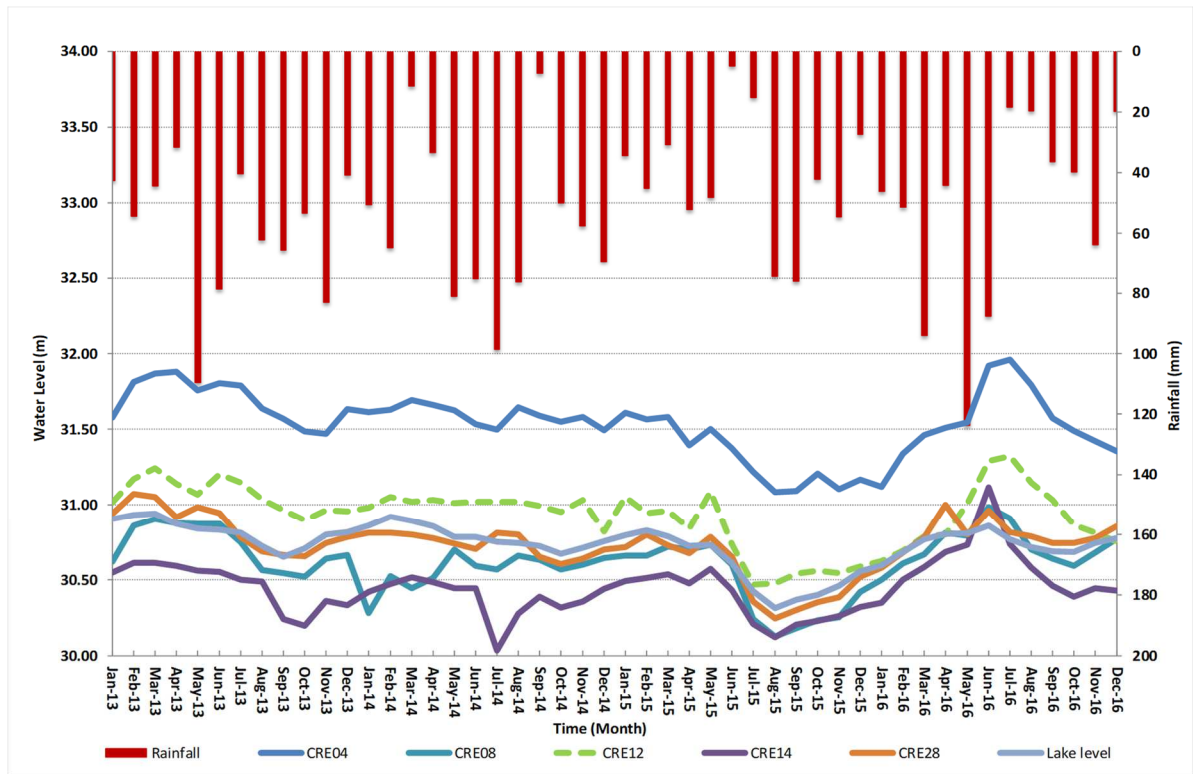
17 Les conditions aux limites sont de trois types : charge imposée, flux imposé, ou
18 fréquence de renouvellement à travers une interface épaisse imposée. La dernière est
19 l'inverse de ce qui est appelé souvent coefficient de transfert par anglicisme et qui a été défini
20 en français comme le coefficient de drainance (cf. les définitions importantes au début du
21 rapport), que nous nommerons ici pour éviter toute confusion fréquence de renouvellement
22 à travers une interface épaisse. Imposer une condition de charge sur le contour du lac sera
23 nécessaire si l'on utilise comme paramètre de calage la fréquence de renouvellement à travers
24 l'interface lac / nappe, conformément à la méthodologie élaborée par Du et al. (2018).

25 Une condition limite de charge a été imposée sur les rivières. Les flux d'apport connus du
26 réseau de collecte des eaux pluviales, en rive est du lac en provenance du Mont-Mesly, ont
27 été inclus dans le modèle hydrogéologique comme condition aux limites du lac.

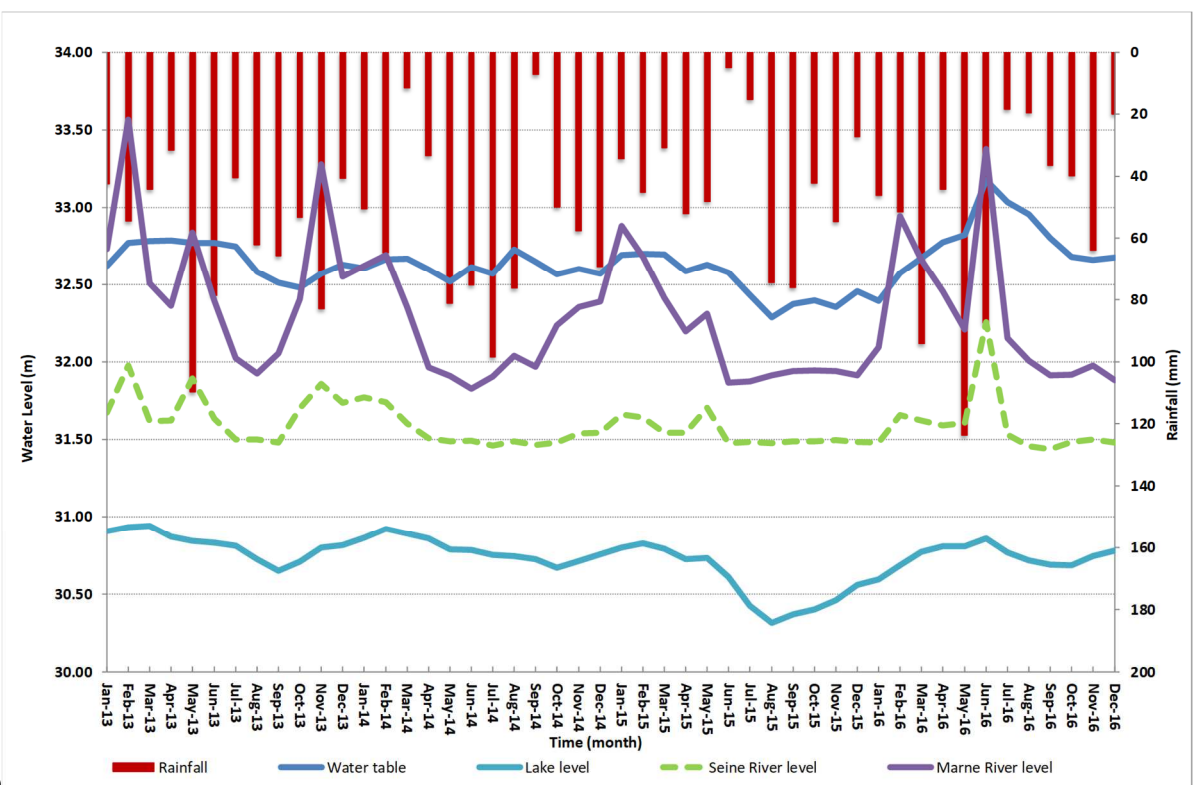
28 La figure 23 montre le maillage de l'aquifère phréatique dans le domaine d'étude où l'on
29 reconnaît la boucle de la Marne et le confluent avec la Seine où sont situés les deux
30 limnimètres aval. On note le réseau des 4 limnimètres, 15 piézomètres, et 1 piézomètre
31 supplémentaire au voisinage du confluent (drapeau bleu isolé) pour la discussion sur la validité
32 du modèle dans la partie nord. Ce point de contrôle a été fourni par la SGP et le piézomètre
33 est noté SGPN (pour nord). On note aussi deux points de contrôle (deux drapeaux en bleu ciel
34 et rose) le long de la limite sud du domaine ; les chroniques de charge en ces deux derniers
35 points sont extraites du modèle à la résolution 100 m qui a été calculé par Aquif'Brie pour la
36 nappe du calcaire de Champigny au sud de notre limite sud. La figure 23 à droite illustre la
37 situation en janvier 2016. Il s'agit de la carte de la charge hydraulique calculée par le modèle
38 **A** dans la couche 4 : ici, bien que les alluvions soient absentes de ces reliefs résiduels, les zones
39 correspondant au Mont-Mesly et au plateau sud ne sont pas inactivées puisque les couches 4
40 et 5, et les couches en-dessous, préexistent aux alluvions. Ces couches étant plus profondes
41 que le lit des rivières, ces dernières ne sont pas visibles. Le drapeau noir sur la Seine à l'ouest
42 du lac et le drapeau rouge sur la Marne au nord du Mont-Mesly sont des points de contrôle

- 1 de la surface piézométrique simulée et des niveaux des rivières (points d'inversion du transfert
- 2 nappe-rivière).

3 a



4 b



5 Figure 22. Chroniques hydrologiques autour du lac de Créteil sur 4 ans, 2013-2016. **a.** Pluie,
 6 niveau du lac et niveaux des piézomètres ; **b.** Pluie, niveau du lac, niveau moyen de la nappe et
 7 niveaux des cours d'eau (Marne et Seine).

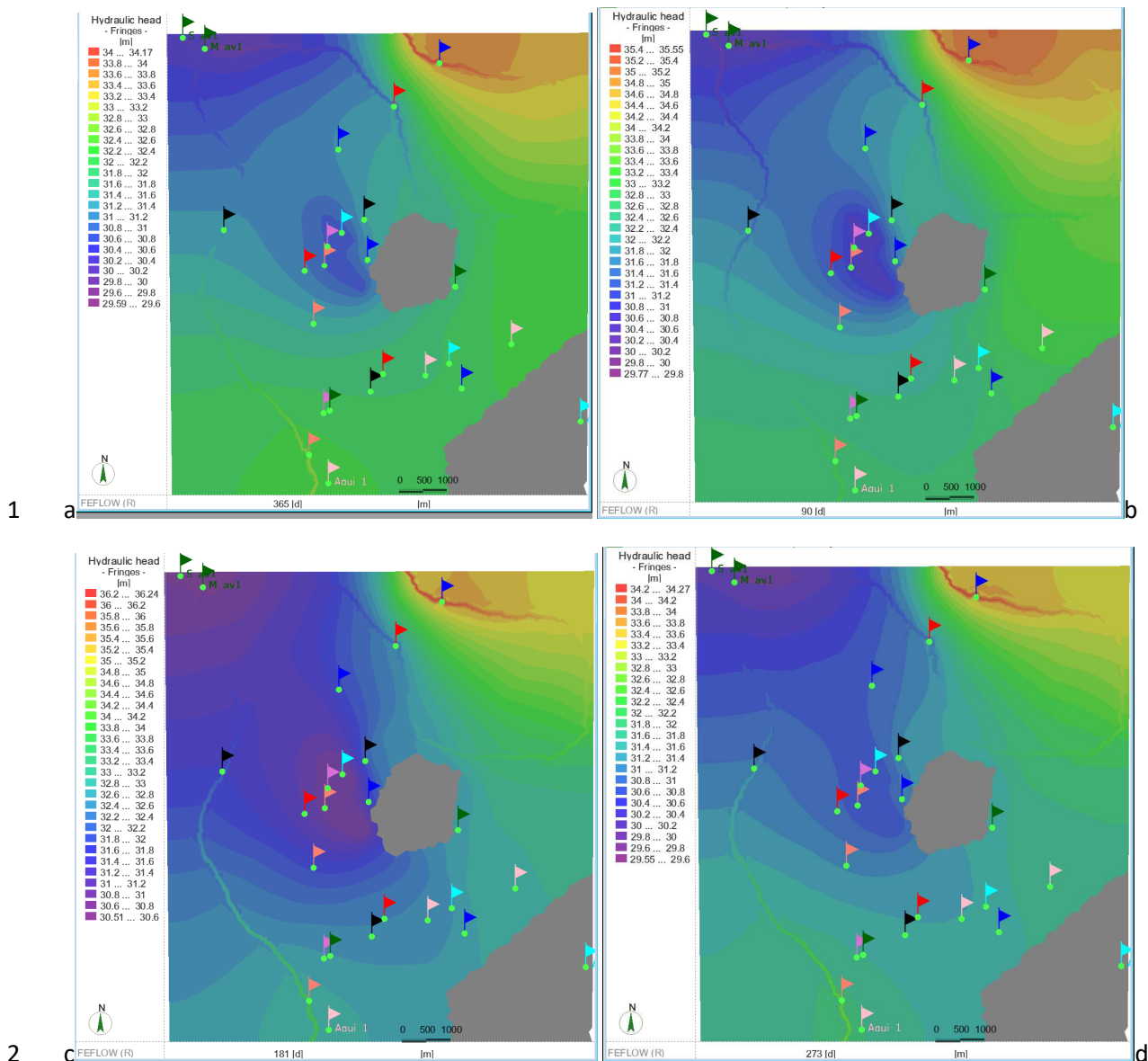
1 Dans le modèle, la conductivité hydraulique K_s a été introduite par « couche » en
2 prenant en compte la gamme de variation issue de la bibliographie et des essais répertoriés
3 (Annexe - tableaux 8 et 9). Mais elle a gardé le statut de paramètre de calage, vue la largeur
4 des intervalles admissibles. On n'a pas essayé de caler la piézométrie de la nappe du Lutétien.
5 Celle-ci est supposée captive avec une charge non imposée et l'aquifère est représenté
6 explicitement sous forme de deux « couches » : les marnes et caillasses (*layer* L8) et le calcaire
7 grossier (*layer* L9). Le logiciel considère par défaut la dernière « couche » (la plus profonde)
8 comme le substratum de l'aquifère, ce qui n'est pas réaliste mais ne pose pas de problème.

9 L'objectif du calage est de reproduire la charge hydraulique en certains piézomètres et
10 au lac en comparant les niveaux simulés (SIM) et observés (OBS). Le calage (*calibration* en
11 anglais) a été effectué sur 4 piézomètres et sur la chronique du niveau du lac pour 4 ans (2013-
12 2016). Les paramètres de calage sont les 3 suivants : le coefficient de conductivité hydraulique
13 à saturation K_s attribuée par couche ; le coefficient d'infiltration efficace R_s qui, appliquée à
14 la pluie infiltrée, donne la recharge surfacique (recharge par unité d'aire) ; le paramètre Φ
15 fréquence de renouvellement à l'interface nappe – lac.

16 Le modèle a été calé sur les variations de niveau du lac en 1 point (mire LAC, figure 32)
17 et de 4 piézomètres de la DSEA : CR04, CR08, CR28 et VA21 avec une très bonne qualité de
18 simulation (figure 24). Sur ce critère, correspondance des variations SIM / OBS, le modèle se
19 comporte bien avec 3 autres piézomètres CR12, CR14 et VA18 qui sont au second rang de
20 qualité et ont servi à valider les simulations. On a donc 8 points de calage. Les 8 autres
21 piézomètres ne sont pas utiles pour caler un modèle, soit car ils varient très peu, soit car
22 certains sont redondants.

23 Quand le modèle est calé sur des piézomètres dans la nappe alluviale et tourne sur un
24 cycle annuel (figure 25), l'écoulement étant subhorizontal, la charge est quasi identique dans
25 toute l'épaisseur de l'aquifère alluvial (*layers* L7 à L1). On constate qu'elle s'est établie à
26 environ 70 cm plus haut dans l'aquifère du Lutétien, et que ce différentiel est un peu plus
27 élevé en été qu'en hiver. Ce différentiel n'est pas absurde, il colle même bien avec la mesure
28 faite en 2014 par le BRGM au piézomètre proche du lac de la Plage bleue. Le modèle a été
29 conçu avec un aquitard de conductivité hydraulique verticale 10^{-8} m/s qui représente un écran
30 argileux, continu dans la formation de Beauchamp et séparant les deux nappes de telle façon
31 que la nappe du Lutétien reste globalement captive. Résultant de l'interpolation entre
32 sondages, l'écran argileux n'est pas observé partout et cet aquitard est donc par endroits
33 d'épaisseur négligeable. Aussi il autorise un phénomène de drainance ascendante diffuse (i.e.
34 en de multiples points) au cours du calcul dans le modèle. Indépendamment de l'eau
35 échangée entre les deux aquifères dans le cratère du lac, la nappe des marnes et caillasses
36 circule dans le même sens que la nappe phréatique au-dessus.

37 Parmi les résultats de simulation (fournis par Aqui'Brie) de la nappe du calcaire de
38 Champigny, des pixels de 1 ha choisis sur le versant qui limite au sud le domaine d'étude, on
39 a utilisé comme point de contrôle le point AQUI_1 : on a noté que la simulation du modèle
40 ModLac calé est très bonne pour ce point situé au sud-ouest du versant (proche de la Seine).
41 Ce point a ensuite permis de caler la condition limite de flux qu'on a choisi d'imposer sur la



3 Figure 25. Résultats du modèle A calé avec Ks et Rs, valeur de la charge hydraulique pour l'année
 4 2016, situation des 4 saisons : a. janvier ; b. avril ; c. juillet ; d. octobre. Dans : Nasri, 2018.

5

6 Grâce au calage, la conductivité hydraulique dans chaque « couche » et le flux imposé au
 7 sud du domaine sont donc fixés. Par ailleurs, la porosité de drainage est donnée à 0,25 dans
 8 les couches de l'aquifère phréatique et le coefficient d'emmagasinement est donné à 0,0044
 9 dans l'aquifère confiné du Lutétien.

10 13. Créer des variantes du modèle pour comprendre l'influence du lac

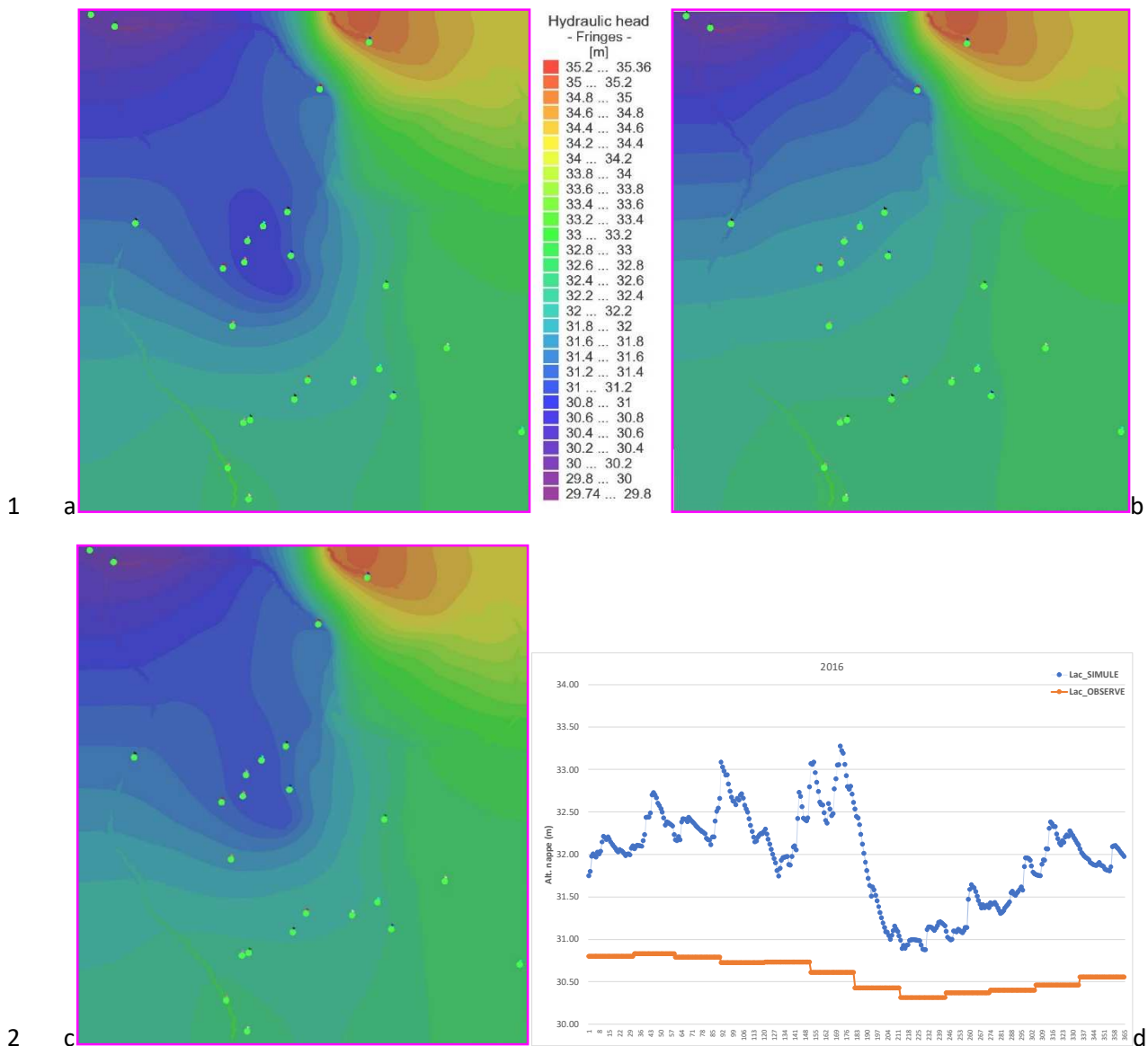
11 La figure 26 montre la situation simulée en octobre 2016 pour 3 versions du modèle, a, b,
 12 c, avec la même échelle de charge hydraulique et dans les couches 1, 2 et 3 donc les niveaux
 13 des rivières sont visibles. Cas a. Le modèle géologique est excavé d'un volume 3D égal au lac
 14 réel, avec une conductivité « infinie » attribuée à ce volume : ce modèle A est calé dans le
 15 temps avec 4 limnimètres + 5 piézomètres + niveau du lac (charge fixée sur toute la surface
 16 du lac, non explicite sur l'image à moins de choisir un intervalle de charge inférieur à 0,05 m).

1 Cas b. Le modèle **A** calé sur le lac est libéré de toute contrainte de nappe (piezo + lac), seuls
2 les 4 limnimètres restant honorés, et l'excavation est remplie avec les couches géologiques ;
3 ce modèle **B** représente la situation originelle sans lac. Cas c. Le modèle **A**, déjà calé sur le lac,
4 est de plus calé sur le paramètre Φ responsable d'une condition de transfert le long du contour
5 du lac, ce qui donne le modèle **C** totalement contraint.

6 D'après le modèle **A** (celui calé avec K_s et R_s), le sens global d'écoulement est au nord-
7 ouest, vers le point de confluence ; la présence du lac déforme les isopièzes de façon
8 différente selon la saison et déplace le point d'inversion / Seine. En janvier et juillet, la Seine
9 est plus haute que la nappe à l'amont d'un point à proximité du drapeau noir. Au mois d'avril,
10 la Seine devient plus basse que la nappe à partir d'un point situé environ 2 km à l'amont du
11 drapeau noir, et au mois d'octobre, d'un point situé 2 km à l'aval du drapeau noir. Le
12 contournement du Mont-Mesly devrait engendrer des flux plus forts au nord et au sud ; cette
13 zone grise est inactivée lors du calcul mais la limite à flux nul de la butte n'est pas explicite
14 dans le modèle. La nappe de versant qui existe par temps de pluie n'est pas explicite non plus.
15 Donc une sous-représentation des flux existe au nord et au sud de la zone grise.

16 Le modèle **B** ou « état restauré » est fait pour mettre en évidence l'influence de l'existence
17 du lac sur la nappe (par comparaison avec le modèle **A**). Dans le graphe d de la figure 26, le
18 niveau simulé d'après le modèle **B** au voisinage de l'extrémité nord du lac comblé (bleu),
19 comparé au niveau observé du lac réel (orange), montre que la création du lac a abaissé la
20 surface piézométrique moyenne de plus de 1,5 m en supposant les niveaux de rivières
21 identiques entre la situation d'origine et la situation actuelle. Il permet aussi bien d'imaginer
22 ce que serait la situation restaurée si le lac était comblé à l'avenir. En supprimant le lac, le sens
23 général de l'écoulement ne changerait pas (toujours au nord-ouest). Le niveau de la nappe
24 augmenterait dans tout le secteur, en particulier dans la zone occupée précédemment par le
25 lac. On a posé un point de repère à l'ouest du lac, sur la Seine, avec un drapeau noir. Les
26 simulations au cours du temps ont montré qu'au mois d'avril, la Seine devient plus basse que
27 la nappe à partir d'un point situé environ 4 km à l'amont de ce drapeau noir (donc plus amont
28 qu'en avril dans le modèle **A**) ; au mois de juillet, le point d'inversion du transfert nappe-Seine
29 migre vers l'aval puis atteint en octobre un point proche du drapeau noir.

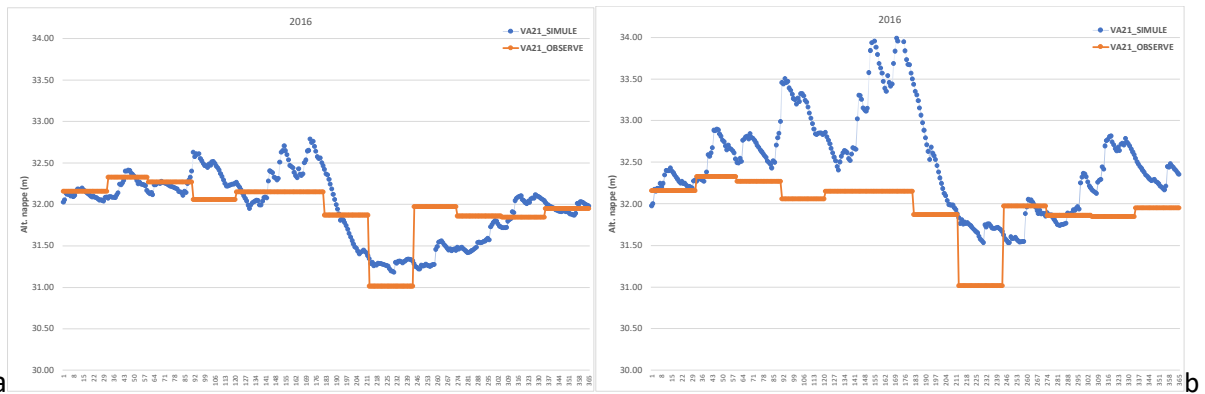
30 Le modèle **C** est un modèle **A** enrichi par une condition limite : toute la surface du lac se
31 voit imposer la charge $h(t)$ observée, et l'interface est caractérisée par un paramètre
32 fréquence de renouvellement Φ qui contrôle le flux à l'interface lac / nappe et joue le rôle
33 d'un troisième paramètre de calage, en plus de K_s et R_s . Le calage du modèle **C** par la
34 fréquence de renouvellement Φ qui est équivalente à la valeur de perméabilité de l'interface
35 lac – nappe divisée par la largeur de l'interface (50 m à 100 m), et qui nécessite d'imposer la
36 charge sur toute la surface du lac, donne des résultats très proches du modèle **A**. Cependant,
37 si le modèle **C** respecte le niveau connu du lac (c'est une condition limite en plus qui n'existait
38 pas dans **A**), c'est le modèle **A** qui donne la piézométrie simulée la plus proche des chroniques
39 observées dans les piézomètres choisis. Donc, on retient le modèle **A** comme le modèle calé
40 du secteur bien qu'il soit évidemment moins précis quant au niveau du lac, et on utilisera le
41 modèle **A** pour exécuter des scénarios.



1
2
3 Figure 26. Situation simulée en octobre 2016 pour 3 versions du modèle, **a**, **b**, **c**, avec la même
4 échelle de charge hydraulique, couches 1, 2 et 3. **d**. Niveau simulé d'après le modèle **B** (état
5 « restauré ») au voisinage de l'extrémité nord du lac comblé (bleu), comparé au niveau observé du
6 lac réel (orange). FeFlow © DHI.

7

8 Par exemple, dans un des scénarios testés (figure 27), le modèle **A** est exécuté avec une
9 recharge de la nappe par l'infiltration efficace, deux fois plus grande que le modèle **A** de base.
10 Ce scénario n'influence pas le niveau du lac ni sa proximité immédiate (CR28). En revanche, la
11 nappe au sud du lac (VA21) est influencée par cette augmentation de la recharge. Cela montre
12 l'influence prépondérante des conditions aux limites sur le niveau de la nappe au voisinage du
13 lac. Dans la partie sud du domaine, on note que l'intérêt d'une simulation au pas journalier
14 est de rendre visible l'influence des précipitations : l'existence d'une telle influence immédiate
15 restera à l'état d'hypothèse non vérifiable puisqu'on ne dispose pas de relevés piézométriques
16 au pas journalier. Et si la piézométrie simulée est tracée en moyenne mensuelle (figure 24 a,d)
17 l'influence des précipitations n'est plus visible.



1 a
 2 Figure 27. **a.** Comparaison des chroniques OBS (orange) et SIM (bleue) du modèle **A** pour l'année
 3 2016 au piézomètre VA21-DSEA. **b.** Variante avec un coefficient de recharge doublé. Simulation
 4 au pas journalier et observation au pas mensuel. Dans : Nasri, 2018.

5

6 **Encadré 4 – Pour en savoir plus – Estimation du flux annuel entrant dans le lac**

7 Le modèle **C**, calibré par l'ajustement du paramètre fréquence de renouvellement Φ , donne des
 8 résultats presque identiques au modèle **A**. Donc, on peut appliquer ce Φ comme la fréquence de
 9 renouvellement du lac : $\Phi = 0,2$ (jour⁻¹). On peut alors faire une estimation de débit annuel convergent
 10 vers le lac à travers une surface isopièze située à environ 200 m des rives du lac :

11
$$Q = \Phi \times \Delta h \times e \times P$$

12 où Δh est le gradient hydraulique moyen orthogonal à une ligne isopièze (fermée autour du lac), P est
 13 le périmètre de cette courbe isopièze, e est l'épaisseur active de la nappe dans le secteur du calcul.

14 Résultat d'estimation du débit convergent vers le lac :

15
$$Q_{\text{jour}} = 0,2 \times 0,21 \times 16 \times 5031 \Rightarrow Q_{\text{jour}} = 3380 \text{ m}^3/\text{jour}$$

16
$$Q_{\text{annuel}} = Q_{\text{jour}} \times 365 = 1\,233\,915 \text{ m}^3$$

17 Ce volume est un peu supérieur (très proche) du volume du lac estimé par le SIG 3D. Mais la totalité
 18 du flux entrant à travers la surface isopièze située à environ 200 m des rives du lac ne parvient pas tout
 19 le temps au lac. On a donc une durée de renouvellement du lac un peu supérieure à 1 année.

20

21 14. Simuler des scénarios recherchant l'effet des ouvrages souterrains insérés

22 Les ouvrages insérés dans le modèle calé sont des hétérogénéités ponctuelles dans le
 23 modèle. Ce sont des mailles avec des propriétés spécifiées, différentes des propriétés des
 24 mailles non occupées par l'ouvrage au voisinage. La propriété spécifique de ces mailles, qui
 25 sont devenues des ouvrages, est une perméabilité très faible, ou une condition imposée telle
 26 qu'un flux nul (figure 28).

27 La comparaison entre les chroniques simulées du modèle **A** et du modèle **A** avec des
 28 ouvrages en deux endroits a été faite pour : le lac, les piézomètres CR28 (le plus proche du lac
 29 avec bonne simulation) et VA21 (à 1,2 km au sud du lac). Ces ouvrages n'ont pas d'influence

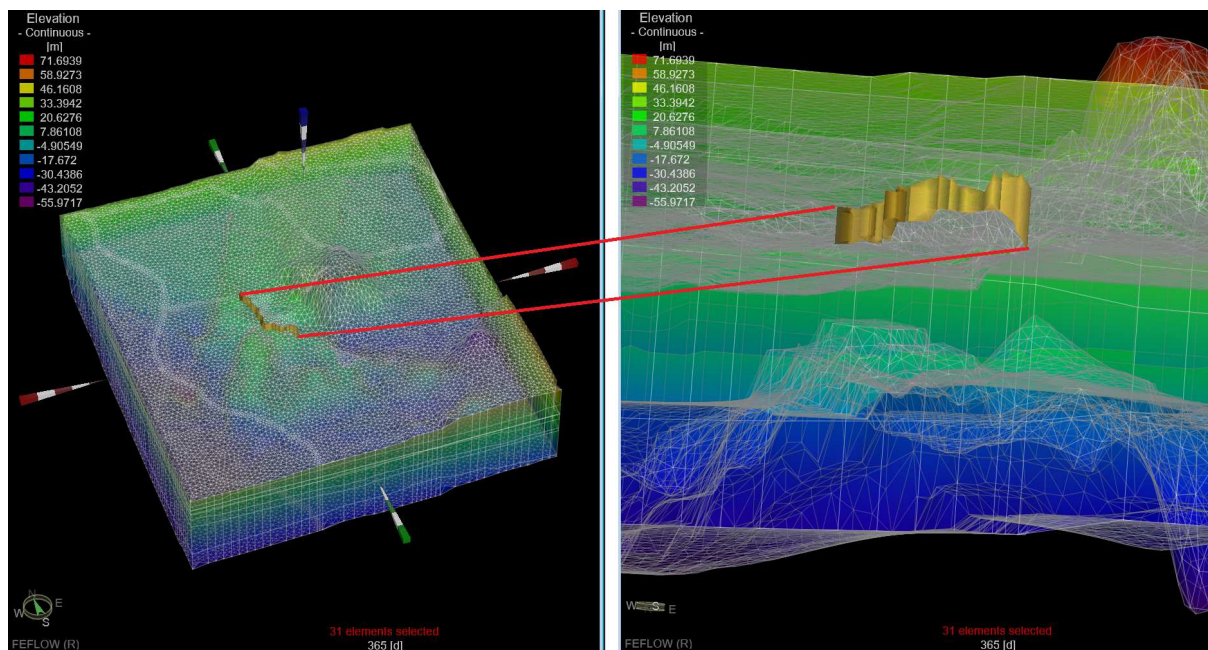
1 sur la surface piézométrique d'ensemble donc n'altèrent pas le fonctionnement du lac à cette
2 échelle (mailles de 50 à 100 m).

3 Les ouvrages linéaires étanches de faible profondeur, comme les palplanches,
4 introduites dans le modèle ne créent pas une élévation du niveau piézométrique détectable
5 dans les mailles situées au contact ou au voisinage des mailles-palplanches.

6 Ce test déjà fait sur l'insertion de ces ouvrages étanches est suffisant pour conclure
7 que si on introduisait tous les ouvrages étanches du SIG 3D, cela aurait très peu d'influence
8 sur les résultats quantitatifs du modèle en termes de débit et de déformation de la surface
9 piézométrique.

10 La conclusion que cette influence est négligeable d'après ce test pourrait être imputée
11 à la résolution du maillage. Quelle résolution faudrait-il donner au maillage à proximité du lac
12 pour espérer « voir » une élévation de la surface piézométrique, et combien atteindrait-elle
13 (des mm, des cm...) ? Pour le savoir, il faudrait faire un nouveau maillage et créer le modèle
14 en champ proche. Cela peut être intéressant pour un sujet de stage de master.

15



16

17 Figure 28. Modèle A avec des ouvrages souterrains : insertion des palplanches le long de la rive
18 est du lac, objet continu à flux nul.

19

20 Les mêmes questions se posent au sujet des fondations par pieux. Les fondations ne
21 forment pas un rideau étanche continu et font obstacle partiellement à l'écoulement. Elles
22 sont plus profondes que les palplanches à certains endroits, et surtout les fondations ne sont
23 pas des ouvrages linéaires mais forment un réseau dense de volumes morts sur une aire
24 significative de la carte. En réduisant le volume poreux du milieu aquifère où l'eau peut
25 circuler, elles devraient donc avoir un effet localement sur le débit et sur la charge. Elles
26 devraient donc aussi provoquer en principe une élévation locale de la surface piézométrique.
27 Mais cela n'a pas été détecté dans le modèle en champ lointain.

15. Discuter le modèle en le confrontant à un piézomètre dans le secteur nord

On observe un excès de charge simulée (figure 29) de l'ordre de 100 cm par rapport au piézomètre hors-calibration de la SGP assez loin au nord du lac. Noter une similitude avec la figure 26 d qui illustre le modèle « sans lac ». La surface piézométrique modélisée accommode le flux d'échange et l'alimentation au nord par la Marne sans être sous l'influence du lac. Cette différence entre le niveau piézométrique simulé et observé dans ce secteur est confirmée par un piézomètre de la RATP (annexe : tableau 4) et il faut admettre qu'il peut aussi avoir pour cause une insuffisance du modèle conceptuel : par exemple, il se peut que la Seine et la Marne soient hydrauliquement déconnectées de la nappe dans ce secteur situé juste avant le confluent ; de plus, l'existence avérée d'un axe anticlinal ouest-est au sud du confluent supprime totalement les couches de l'aquifère de Champigny et réduit beaucoup voire annule l'épaisseur des marnes et caillasses et peut faire diverger les flux. Ces deux raisons sont précisées dans ce qui suit.

i) Pour la première raison, il est utile de préciser les effets de l'hypothèse de connexion hydraulique adoptée. La condition limite de charge a été imposée, par les deux rivières, dans les mailles occupées par la largeur de la rivière et au contact des « couches » L1, L2 et L3 (remblais, alluvions modernes et alluvions anciennes). Cette condition limite n'est pas imposée aux couches sous-jacentes qui font partie de l'aquifère phréatique mais la nappe s'écoule de façon subhorizontale sous les rivières. Ainsi, la condition limite imposée dans les 3 premières « couches » est de fait aussi imposée aux autres couches, à l'aval du lac aussi bien qu'à l'amont du lac où les rivières sont plus hautes que la nappe et l'alimentent en abondance. L'alimentation du modèle par la Marne, conjuguée à un taux d'infiltration arbitraire et peut-être exagéré, est la cause possible d'un excès de charge irréaliste dans le secteur nord. Cette hypothèse de connexion hydraulique est donc très forte.

Le choix de la déconnexion est apparu pertinent pour modéliser la Seine et la nappe de ses alluvions dans Paris au sein du groupe de travail du PAPI de la Seine et de la Marne franciliennes. Au sein de ce GT, lors de la réunion du 17 oct. 2018, Anne-Marie LEPARMENTIER (IGC) considérait que cet état de déconnexion, habituel entre la nappe et la rivière dans Paris, est le fait des pompages : de plus, elle émettait de fortes réserves quant à une éventuelle reconnexion nappe-rivière en période de crue. En effet, même en janvier 2018, les alluvions sont restées dénoyées et l'absence d'observation de venues d'eau dans les infrastructures souterraines de Paris durant cette période conforte son avis que les niveaux piézométriques figurant sur les cartes présentées par Mathias MAILLOT (EPTB Seine-Grands lacs et Mines ParisTech) sont surestimés à cause du choix de la reconnexion en crue (Maillot, 2018).

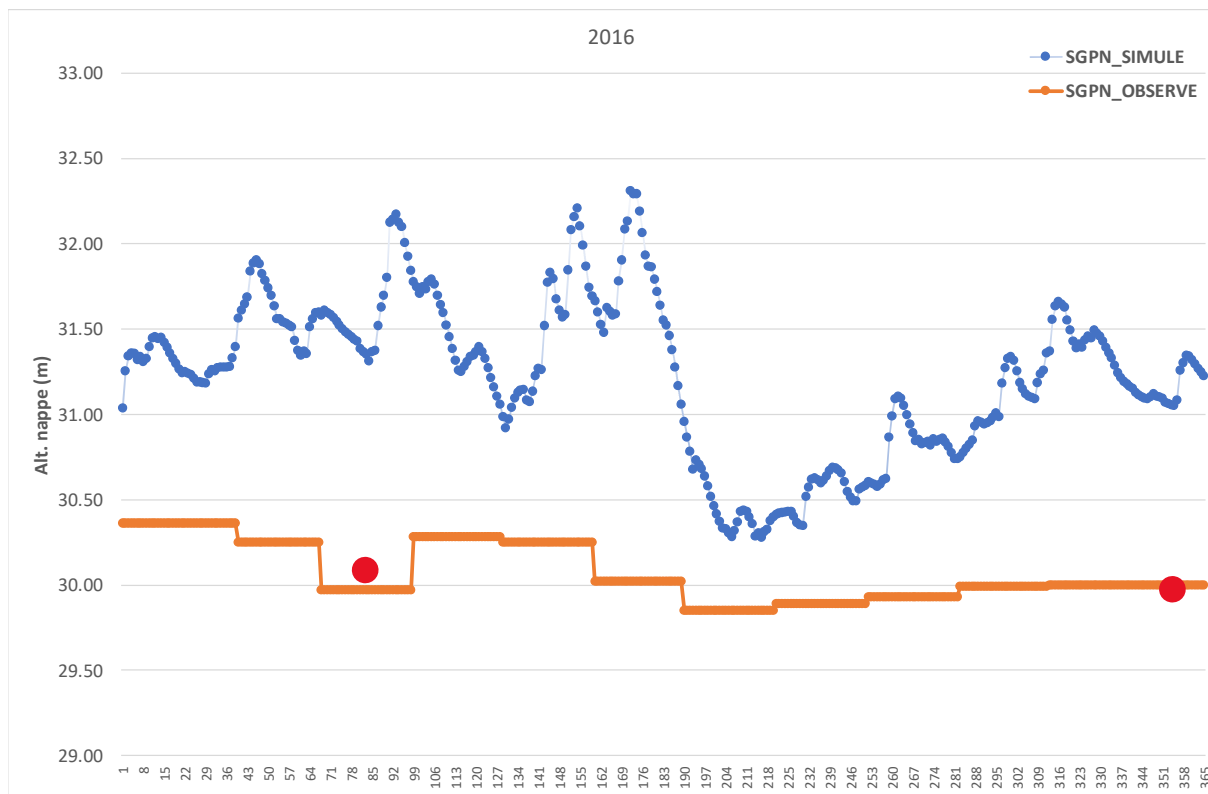
Ainsi, déconnecter les cours d'eau et la nappe alluviale serait un choix lourd de conséquence... que nous avons décidé de ne pas faire, vu le faible nombre de sondages en notre possession qui justifierait ce choix, mais il faut admettre que l'excès de charge remet en question cette hypothèse.

ii) La seconde raison envisagée de l'excès de charge du modèle comparé au piézomètre de la SGP, dans la zone de confluence ou « secteur nord », serait à rechercher dans l'influence du Mont-Mesly sur la nappe dans ce secteur. L'étude géologique a montré l'existence d'un pli anticlinal dont l'axe orienté ouest-est passe au nord de Créteil, et peut-être d'une faille qui

1 décale verticalement la couche du calcaire de Champigny. A cette structure déformée de la
 2 série stratigraphique est liée la distribution particulière des marnes infra-gypseuses (ou infra-
 3 ludiennes car le gypse est absent ici), plus épaisses (5 à 10 m voire > 10 m) au nord-est du lac
 4 qu'au sud-ouest (0 à 5 m), et qui dessinent sur la carte harmonisée du BRGM une langue
 5 partant du Mont-Mesly vers le nord. Cette présence des MIG sépare l'aquifère phréatique
 6 multicouche en deux sous-aquifères dans ce secteur. L'un serait sous la langue des MIG, dans
 7 les sables de Monceau et plus bas, le calcaire de Saint-Ouen, présents alentour sous une
 8 pellicule d'alluvions ; l'autre, au-dessus des MIG, serait dans la butte, en position perchée.
 9 Ainsi, l'aquifère phréatique (alluvial) est beaucoup moins épais dans le « secteur nord ».

10 Un peu plus au nord encore, on rencontre la bande ouest-est dessinée sur la carte
 11 géologique par l'écran argileux de la formation de Beauchamp (figure 21b) dont les strates ont
 12 un pendage sud. Dans ce secteur, l'aquifère alluvial est réduit aux formations superficielles et
 13 a donc une épaisseur encore plus faible qu'ailleurs, qui fait une petite dizaine de mètres de
 14 remblais et d'alluvions anciennes d'après quelques sondages de la BSS (NB. Les sondages BSS
 15 du secteur au nord de la bande d'affleurement de la formation de Beauchamp n'ont pas été
 16 intégrés dans notre BD). Ici, la Marne alimente l'aquifère Lutétien affleurant au nord de l'écran
 17 argileux. L'écran argileux à pendage sud ne coupe pas totalement le lien hydraulique entre la
 18 Marne et le piézomètre de la SGP situé au sud de l'affleurement de l'écran, mais le signal des
 19 fluctuations de la Marne y est probablement très atténué. Cet effet barrage par remontée du
 20 mur de la nappe alluviale n'est pas restituée par le modèle hydrogéologique.

21



22

23 Figure 29. Comparaison des chroniques OBS (points rouges) et SIM (bleue) du modèle A pour
 24 l'année 2016, au piézomètre SC1940-SGP (+11 mesures en 2015, orange). Dans : Nasri, 2018.

Propositions et perspectives

Proposition pour une future version du modèle en champ lointain ou proche

Pour résoudre le second défaut mentionné à la section 15, il faut envisager une version du modèle dans laquelle une autre configuration hydrogéologique serait ajoutée dans le secteur nord, la zone la plus proche du confluent : les remblais + alluvions d'épaisseur totale environ 10 m reposant en discordance angulaire sur des terrains plus anciens que dans le secteur sud. Cette superposition anormale commence sur l'écran argileux des sables de Beauchamp à pendage sud, qui sépare la nappe sud (alluviale) et la nappe nord (Lutétien). Vers le nord, cette superposition existe largement sur l'aquifère du Lutétien qui devra être représenté entre deux limites (figure 21b) : mur de l'écran argileux et rive sud de la Marne. Cet aquifère « alluvions sur calcaire Lutétien » contient la nappe phréatique du secteur nord. Sous les alluvions, son corps calcaire est déformé puisqu'il correspond à l'axe du pli anticlinal, comme le montre la présence sur la carte harmonisée de deux bandes des marnes et caillasses, l'une au contact sous le mur de l'écran argileux, l'autre le long de la rive nord de la Marne. Le domaine d'étude restera, comme dans la version actuelle, limité au nord par la Marne qui impose sa charge. Cela reste pour le moment à l'état de proposition.

De plus, un modèle en champ proche est suggéré, qui aurait une résolution de 5 m dans un périmètre de 500 m autour du lac : des conditions aux limites seraient appliquées d'après les résultats de simulations du modèle **A** ; cependant, ces conditions seront complexes dans l'espace et le temps et la surface frontière externe n'est pas aisée à définir.

Travaux prévus par offres de collaboration

- Une reconnaissance du « cratère » par une équipe de plongeurs
- Un levé bathymétrique de précision du lac dans la zone du « cratère »

Communication de résultats aux bureaux d'études

Cas de Ramboll (Groupe international, BE Bordeaux) : une étude dans le cadre d'une demande d'autorisation d'exploiter un nouvel incinérateur en projet, qui sera situé à proximité du lac de Créteil et du parc interdépartemental des sports. A partir des émissions atmosphériques prévues de cette installation, il modélise la dispersion de la pollution, puis les retombées atmosphériques qui sont susceptibles de s'accumuler dans les plans d'eau, le degré d'accumulation étant dépendant du renouvellement de l'eau dans ces lacs. Le groupe projet a été consulté pour obtenir une estimation de la fréquence de renouvellement qu'il convient d'appliquer dans le cas du lac de Créteil.

Propositions d'actions envers le public

Un piézomètre pédagogique participatif serait à implanter sur un site à choisir de façon à compléter le réseau de surveillance du lac, si possible associé à l'île de loisirs.

Un système de prévision du niveau du lac et d'information au public, à partir du niveau prévu de la Seine et de la Marne, de scénarios de précipitations (période pluvieuse, sèche) sur quelques jours à quelques semaines, et du niveau de la nappe dans l'aquifère du Lutétien à distance à l'amont du domaine d'étude.

Questions et réponses

1
2 Ce rapport a répondu à certaines questions d'intérêt immédiat pour les acteurs du lac,
3 et en a ouvert de nouvelles qui sont pertinentes à court ou moyen terme.

4 Questions conceptuelles : comment fonctionne le lac ? Est-il traversant ou terminal ?

5 La vision que l'on avait au départ du projet était celle d'un lac traversant. En effet, on
6 imaginait d'après l'étude de Chesterikoff que la nappe alluviale alimentait le lac le long de sa
7 rive est, sur une épaisseur de nappe qui pouvait être égale à la profondeur de ce lac qui était
8 vu comme une bassine, et que l'eau du lac pénétrait de nouveau dans les alluvions sous la rive
9 ouest. Dans ce concept, l'eau se contenterait de « traverser » le lac, sauf un volume inconnu
10 qui était supposé trouver un exutoire dans le réseau départemental via le déversoir. Les
11 données exploitées dans ce rapport viennent toutes contredire cette vision qui était celle des
12 années 1980 échaudée sur des données des années 1970. Le flux sortant passe par
13 drainage au fond du lac et quand c'est à travers une rive, c'est par la rive nord, et pas du tout
14 par un collecteur d'assainissement. Le flux entrant n'est pas localisé sous une rive mais diffus
15 à travers toute l'interface nappe / lac donc l'ensemble des surfaces immergées des rives, sauf
16 la rive nord à certains moments de l'année hydrologique. Il est plausible que la perméabilité
17 effective de l'aquifère alluvial soit plus faible en se rapprochant du lac pour au moins deux
18 raisons : une zone de colmatage peut exister sous les rives où la nappe alimente le lac, donc
19 en pratique presque tout autour du lac ; les ouvrages souterrains peuvent jouer un rôle
20 d'obstacle hydraulique au flux souterrain. La réduction de la perméabilité au voisinage du lac,
21 phénomène postérieur aux années 1970, est difficile à prouver ; mais c'est une hypothèse
22 compatible avec l'accroissement du gradient hydraulique de la nappe convergeant vers le lac.

23 Questions quantitatives : niveaux, flux, volumes

24 Le niveau du lac au pas mensuel n'est pas corrélé avec la pluie fournie par Météo
25 France, sauf peut-être à admettre un retard de plus de deux mois dans la réaction de la nappe
26 et du lac. Mais l'analyse mathématique qui permettrait d'établir de façon convaincante
27 l'existence ou l'absence d'une relation avec un tel décalage n'a pas été réalisée. Une recherche
28 de corrélation au pas journalier a encore moins de chance d'aboutir ; il faudrait pour cela
29 utiliser la pluie journalière enregistrée par un pluviomètre qui serait implanté à proximité
30 immédiate de la mire du lac. La variabilité mensuelle du flux souterrain est difficile à estimer
31 en raison de la complexité du système, avec des rives à flux entrant et des rives à flux sortant
32 dont la superficie active varie au cours de l'année et un phénomène de drainage par le fond
33 qui reste occulte et non mesurable. Cependant, le modèle permettrait de calculer la chronique
34 de flux mensuel à un endroit donné qui serait considéré comme intéressant. Le flux total
35 annuel entrant a été estimé à travers une interface verticale entourant le lac à 200 m des
36 berges : il est équivalent au volume total du lac, mais pour différentes raisons il est un peu
37 surestimé. La durée de renouvellement du lac est donc un peu supérieure à une année.

38 Le lac est-il responsable des venues d'eau dans les parkings souterrains ?

39 Dans un contexte densément urbanisé, les venues d'eau dans les sous-sols (qui se sont
40 multipliées en Île-de-France, en particulier depuis 2016), peuvent avoir plusieurs raisons : la
41 circulation temporaire d'eau infiltrée dans les couches superficielles semble plus fréquente,

1 avec notamment le vieillissement des chaussées et les fuites des réseaux d'évacuation, les
2 dispositifs d'infiltration dirigée des eaux pluviales, la remontée tendancielle de la nappe avec
3 la désindustrialisation, etc. Donc le lac est l'une des causes générales mais pour chaque
4 problème de venue d'eau dans un sous-sol, il faut faire un diagnostic du cas. La présence du
5 lac avec ses variations provoque un rabattement local de la nappe alluviale, ce qui produit des
6 gradients hydrauliques plus forts qui convergent vers le lac. Dans ce contexte, tout obstacle
7 souterrain à l'écoulement, que ce soit un parking ou un rideau de fondations profondes, peut
8 provoquer une élévation de la charge et une modification des flux. Un modèle hydro-
9 dynamique en champ proche serait nécessaire pour quantifier ces effets. Toute construction
10 nouvelle peut modifier l'équilibre hydraulique antérieur et détourner l'écoulement. Ainsi, des
11 venues d'eau peuvent survenir à des endroits habituellement peu affectés par la nappe. Il est
12 cependant impossible de préciser où et quand. Les variations de niveau du lac ne sont
13 actuellement amorties par aucun ouvrage humain ; savoir si ce serait envisageable et
14 comment, c'est une autre question.

15 L'infiltration dirigée des eaux pluviales dans la nappe phréatique est-elle risquée ?

16 Cette question a été posée par le représentant de l'agence de l'eau lors d'une réunion
17 du groupe de travail. L'infiltration dirigée dans la zone non saturée du sous-sol ou dans la
18 nappe phréatique est une modalité de gestion des eaux pluviales, mise en œuvre plutôt à
19 l'amont des bassins versants, soit en un point du réseau pour le décharger, soit décentralisée
20 à la parcelle. Dans ce secteur où, en raison de venues d'eau dans les sous-sols, l'on craint
21 autant l'infiltration depuis la surface que la remontée de la nappe, il ne semble pas que cela
22 serait une bonne idée de développer largement ce mode de gestion de l'eau de pluie. En effet,
23 dans un scénario où des ouvrages d'infiltration seraient projetés un peu partout dans le
24 domaine d'étude, si l'effet cumulé devait atteindre une proportion telle qu'il diviserait par
25 deux le coefficient de ruissellement moyen de la région et augmenterait donc la recharge de
26 la nappe phréatique (aquifère alluvial ou aquifère du Lutétien ou les deux ensemble), on
27 observerait une remontée supplémentaire de la nappe de l'ordre de 1 mètre sur l'ensemble
28 du secteur concerné. Il s'agit ici d'un scénario de développement intensif de cette modalité et
29 on en est loin actuellement. La proximité de la Seine et de la Marne facilite l'évacuation par le
30 réseau et rend peu séduisante la modalité par infiltration dirigée (et encore moins l'injection
31 sous pression) largement discutée par ailleurs. Il peut néanmoins exister un risque ponctuel
32 associé à un dôme piézométrique si un ouvrage d'infiltration était localisé à l'aplomb d'un
33 terrain de perméabilité insuffisante pour disperser l'eau rapidement dans l'aquifère.

34 Le dispositif de suivi piézométrique est-il optimisé ?

35 On a constaté que 8 piézomètres sur 15 ne sont pas utiles pour caler un modèle du lac,
36 soit car ils varient très peu, soit car certains sont redondants. Du point de vue du service de la
37 DSEA en charge de la métrologie, en suivre avec régularité 5 sur ces 8 serait suffisant à l'avenir.
38 Les 3 piézomètres (figure 31) redondants dont le suivi mensuel pourrait être abandonné
39 (quitte à les garder pour une mesure de contrôle biannuelle) sont : VSG24, BOI29 et LIM26,
40 respectivement doublon médiocre de VSG30, LIM23 et LIM22. En revanche, la carte
41 piézométrique obtenue par simulation, sur laquelle est reportée la position des piézomètres,
42 permettra de proposer des sites d'implantation de nouveaux piézomètres si c'était demandé.
43 Pour compléter le dispositif, il serait utile qu'un piézomètre de la RATP au nord du lac, ou celui

1 de la SGP, dans les alluvions, soit cédé à la DSEA et passe dans son patrimoine, ce qui pourrait
2 se justifier au titre de l'autosurveillance du réseau départemental.

3 [Pourrait-on à l'avenir réguler le niveau du lac ?](#)

4 Toute tentative d'écrêter le niveau du lac risque de se heurter à des obstacles à la fois
5 hydrologiques et réglementaires. Dans le contexte régional, la tendance prévisible à l'échelle
6 décennale est à une augmentation du niveau des nappes, donc du lac. Le déversoir existant
7 de la DSEA, conçu pour évacuer un excès d'eau du lac dans une branche du réseau
8 d'assainissement conduisant l'eau à un rejet en Seine, actuellement inopérant en raison d'une
9 déformation du plan d'eau, finira donc par entrer en action et jouera un rôle écrêteur. Pour
10 prévoir quel sera le niveau du lac à ce moment-là, comme la mire au nord du lac ne suffit pas,
11 il faut installer une seconde mire au voisinage du déversoir. Ce prélèvement viendrait
12 compenser un phénomène de drainance ascendante depuis la nappe sous-jacente du Lutétien
13 plutôt qu'un apport d'eaux pluviales associé à un événement rare de grande intensité. Ce sera
14 un prélèvement en nappe pour rejeter en Seine qu'il faudrait justifier au regard de la GEMAPI
15 et sans qu'il reste à la DSEA une responsabilité en la matière.

16 [Le lac est-il un allié face au risque d'inondation par débordement des cours d'eau ?](#)

17 Oui, pas tellement par sa capacité de stockage qui est insuffisante mais plutôt par son
18 rôle de chemin préférentiel entre la nappe des alluvions et celle du Lutétien à travers les
19 marnes et caillasses. Ce rôle de chemin de drainance peut jouer dans le sens descendant si
20 l'inondation survient dans un moment où la nappe du Lutétien est en équilibre hydrostatique
21 avec la nappe alluviale, voire en sous-charge, ce qui peut arriver après des mois de déficit de
22 précipitations pendant la saison habituelle de sa recharge. Cela renvoie à la connaissance de
23 cette masse d'eau et de sa dynamique régionale, en particulier par le suivi de sa piézométrie
24 sous les zones d'affleurement à la périphérie du bassin et du délai de transmission des flux
25 jusqu'au centre du bassin (SIGES Seine-Normandie : Aquifères de l'Eocène moyen et inférieur,
26 ou multicouche Lutétien et Yprésien).

27 [Quel dispositif de surveillance du lac permettrait d'avertir de ses variations ?](#)

28 Le fonctionnement de la nappe alluviale est essentiellement contrôlé par les conditions
29 aux limites, ici les niveaux des deux cours d'eau principaux. Un système de prévision du niveau
30 du lac qui serait fondé sur la surveillance des niveaux de la Seine et la Marne permettrait
31 d'informer le public quelques jours en avance d'une variation notable du lac. Des variations
32 de plus grande ampleur peuvent se produire sous l'effet de la drainance entre les nappes si
33 l'aquifère du Lutétien se trouve en sous-charge à la fin d'une saison sèche : ce deuxième étage
34 du dispositif serait alors fondé sur la surveillance des nappes à l'échelle régionale.

35 [Le lac a-t-il une capacité suffisante pour stocker des eaux pluviales exceptionnelles ?](#)

36 En l'absence de bassin de rétention qui fut projeté dans les années 1970 mais n'a
37 jamais été réalisé, le lac pourrait jouer le rôle de réservoir tampon s'il recevait l'eau pluviale
38 d'un réseau de collecte (c'est déjà le cas du collecteur du Mont-Mesly). En effet, la capacité
39 tampon du lac est importante comparée aux bassins conventionnels. Mais sous un événement
40 pluvieux exceptionnel, le lac se remplirait rapidement. D'après le SIG 3D, il y aurait 10 000 m³
41 de capacité par 10 cm de hauteur supplémentaire du niveau du lac. On a vu que le plan d'eau

1 peut s'élever jusqu'à la cote 32 m sans débordement, ce qui implique un marnage maximum
2 de 1,2 m donc un volume total de 120 000 m³ pour le stockage (i.e. +10% de son volume
3 normal). S'ajoutant à cette capacité, on disposerait avec le déversoir existant d'un débit de
4 décharge maximal de 500 L/s et d'évacuation vers la Seine par le réseau d'assainissement
5 départemental, qui vidangerait le surplus en quelques semaines.

6 [Un risque de pollution existe-t-il par la drainance ascendante au fond du cratère ?](#)

7 Oui, au moins la remontée d'eau séléniteuse puisque les marnes et caillasses sont
8 riches en gypse, mais aussi l'arrivée de tous les polluants d'origine agricole venant des
9 affleurements du Lutétien, notamment dans la Brie. La nappe du Lutétien est surveillée par
10 des qualitomètres qu'il convient donc d'examiner en détail pour quantifier le risque de
11 pollution du lac : nitrates, pesticides, etc. Il n'y a pas de méthodologie disponible à l'heure
12 actuelle pour calculer le flux de drainance instantané à la base du lac vers l'aquifère Lutétien
13 ni le flux inverse, ascendant. En revanche, la durée de renouvellement du volume total du lac
14 est de 1 an, ce qui est une information précieuse pour l'étude de qualité de l'eau du lac.

15 [Le risque de fontis existe-t-il au fond du cratère ?](#)

16 Ce risque est associé en général au gypse en masse mais il n'est pas à exclure dans les
17 marnes et caillasses où une épaisseur cumulée des lentilles de gypse peut faire des mètres.
18 Un fontis est un effondrement qui survient après une longue période de dissolution du gypse
19 ayant créé un entonnoir sous une couche de roche meuble. La dissolution sous le lac semble
20 avoir été activée dans le contexte particulier du lac, et l'enfoncement du fond s'est fait au fur
21 et à mesure depuis les années 1970, d'où la forme évasée du cratère. Celle-ci reste à ce stade
22 une interprétation fondée sur 16 points de profondeur acquis manuellement depuis un bateau
23 en 2001, et on ne peut pas exclure que plusieurs entonnoirs étroits existent au lieu d'un
24 cratère évasé. Quoi qu'il en soit, la dissolution au fond se poursuit et même s'accroît avec les
25 flux de drainance entre les deux nappes ; d'autres entonnoirs vont donc se former ou bien le
26 cratère va continuer à s'approfondir, mais sans avoir le caractère violent d'un fontis.

27

28

29

Conclusion

Une base de données (BD) stratigraphique a été constituée par saisie des informations sur les dossiers (papier scanné) des sondages de la BSS (Infoterre, BRGM) dans le domaine d'étude. Cette BD produite par le projet est constituée de deux tables : une table de sondages (coordonnées x, y, z ; logs et dossiers) et une table de strates lithologiques décrites par sondage. Pour représenter le modèle géologique conceptuel, une pile stratigraphique simplifiée a été définie. Elle est constituée d'une séquence de « couches » qui ont été choisies à l'issue d'une expertise chronostratigraphique et hydrogéologique, effectuée d'après la documentation et la compilation des données. Les objets à identifier dans chaque sondage et à représenter en 3D sont les interfaces entre les couches de la pile. À partir des deux tables de la BD sont établies des requêtes qui permettent au géomodeleur (logiciel GDM, BRGM) de se connecter à la BD et d'intégrer l'altitude du mur (interface inférieure) de chaque couche. Les interfaces sont produites par interpolation (krigeage linéaire) conditionnée par des règles conceptuelles (de superposition, surface d'érosion, hétérogénéité locale), et ajoutées une à une dans le volume de simulation.

Le toit du modèle géologique est constitué dans GDM par le modèle numérique de terrain (MNT) résolu à 1 m de l'IGN combiné au modèle bathymétrique de la surface du fond du lac créé dans le SIG 3D avec ArcGIS à partir des données Safège (2001). L'erreur de positionnement en altitude entre les têtes de sondages et le MNT a été étudiée. On suppose que les différences relèvent de l'excavation ou de l'accrétion des remblais autour des forages souvent anciens. La surface de la couche de remblais est vue comme variable dans le temps et elle n'affecte pas la représentation des couches souterraines.

Les interfaces du modèle géologique sont alors importées dans le SIG 3D de façon à étudier les relations géométriques entre les couches et les ouvrages souterrains, dont les fondations. Désormais, on peut dire pour chaque immeuble sur quelle couche il est fondé et quelle est l'épaisseur probable de chaque couche du modèle conceptuel sous cet immeuble ; il est même possible de produire un log géologique simulé autour de chaque pilier ou mur de fondation. Le SIG 3D (ArcGIS) avec son modèle géologique intégré (GDM) est hébergé par le syndicat mixte de l'Île-de-Loisirs. Le profil de charge hydraulique contre un ouvrage souterrain se déduira du niveau piézométrique et du gradient local. Ces deux informations locales, ainsi que le sens du flux, seront produites par le modèle hydrogéologique qui respecte la pile stratigraphique. Ce modèle hydrogéologique interactif (Feflow, DHI) est hébergé par le Cnam.

La surface du fond du lac comprend un « cratère » représenté d'après une quinzaine de points de bathymétrie, qui traverse l'écran argileux et met probablement en relation les deux nappes, celle du multicouche dite alluviale ou phréatique ou libre, et celle des marnes et caillasses dite du Lutétien qui est globalement captive sous la formation de Beauchamp. Les valeurs de charge hydraulique obtenues dans les couches du modèle démontrent que le lac favorise la drainage entre les deux nappes. Si on imagine qu'elles s'équilibrent presque, grâce au phénomène de drainage au fond du lac, il ne faut pas oublier que ce phénomène reste local et temporaire. Au voisinage du cratère, la surface piézométrique de la nappe phréatique est rabattue comme par un effet de puits, ce qui déforme le plan d'eau donc est susceptible

1 d'affecter le niveau du lac au déversoir. Le transit vertical a lieu vraisemblablement par le
2 cratère en passant directement du lac dans les marnes et caillasses ou l'inverse selon la saison.
3 Le transit horizontal s'effectue de façon répartie à travers toute la surface du fond du lac en
4 sortant de, et en pénétrant dans, l'aquifère multicouche phréatique.

5 La modélisation hydrogéologique réalisée rend compte des données piézométriques
6 autour du lac et au plus au sud mais est loin de prendre en compte toute la complexité connue
7 de la structure géologique (notamment au nord, au voisinage de l'axe anticlinal et de la Marne)
8 et des relations entre les rivières et les nappes. Sous les hypothèses choisies, notamment que
9 la connexion hydraulique est totale (i.e. il n'existe pas de colmatage à l'interface nappe /
10 rivière), la drainance dans le cratère est explicite puisque la surface du fond du lac réduit
11 l'écran argileux à une épaisseur négligeable. Loin du lac, en se rapprochant du confluent, le
12 modèle simule une surface piézométrique plus haute que l'observation : cela traduit soit que
13 la nappe n'est pas aussi connectée à la Marne qu'on le pensait, soit que l'aquifère dans lequel
14 elle s'écoule est amputé d'une bonne partie de ses couches, soit les deux raisons.

15 Les propositions opérationnelles faites se concentrent à court terme sur la
16 réhabilitation du déversoir et son entretien afin de garantir une solution artificielle et
17 temporaire d'écrêtage du niveau du plan d'eau, pour atténuer l'effet de la remontée
18 tendancielle de la nappe phréatique et bien sûr aussi en cas d'épisode de crue majeure. À
19 moyen terme, toute mesure de faucardage régulier des algues et de limitation des flux entrant
20 dans le lac doit garantir un volume utile du lac, mobilisable pour constituer une zone tampon
21 maximale, collectrice d'eaux de pluie et de nappe. À plus long terme, un maillage actualisé de
22 mesures automatisées à l'échelle du territoire métropolitain, et spécialement dans la vallée
23 alluviale entre la Seine et la Marne, permettrait d'alimenter un système d'alerte publique de
24 crue sur la zone du lac de Créteil.

25

26

Publications et références

Publications produites par le projet

Brun J. (2019). Modélisation bathymétrique et géologique d'un lac de gravières en milieu urbain – un SIG 3D pour le lac de Créteil et son environnement bâti. Mémoire d'ingénieur du Cnam, 280 p. + annexes.

Fouché-Grobla O., Nasri B., Brun J. (2018). Modélisation du lac de Créteil, un lac de gravière dans l'aire de confluence de la Marne à la Seine. Présentation orale, 02 juillet 2018, diaporama et simulation. Ville de Créteil (DGST) – Suez Eau France – Le Cnam – Syndicat mixte de l'île de loisirs du lac de Créteil.

Fouché-Grobla O., Brun J., Nasri B. (2019 a). Urban lakes: from lack of regard to smart deal? In: Gourbesville Ph. (Ed). Which models for extreme situations and crisis management ? 5th Int. Conf. SimHydro, 12th-14th June 2019, Sophia Antipolis – Nice, France, 12 p.

Fouché-Grobla O., Brun J., Nasri B. (2019 b). Le lac de Créteil dans son environnement bâti : SIG 3D et modèle hydrogéologique. Rapport final du projet ModLac. Ville de Créteil (DGST) – Suez Eau France – Le Cnam – Syndicat mixte de l'île de loisirs du lac de Créteil. 61 p.

Nasri B. & Fouché-Grobla O. (2018). Fonctionnement hydrogéologique des lacs de gravières en milieu urbain et péri-urbain. Étude bibliographique. Le Cnam, 46 p.

Références

AFTRP & Vitale M. (1973). Parc du Val-de-Marne : avant-projet, études socio-économiques / Types de rives, pièce 8, échelles : hauteur 1:100, longueur 1:2000, 102 p.

Amigues J.-P. (1985). L'exploitation des gravières en zone agricole. Tome 1. Introduction générale. Rapp. Tech. 8405 CREMAQ, Univ. Sci. Soc. Toulouse, 27 p.

Bault V., Bourguin B., Loiselet C., Anquetil E. (2015). Cartes piézométriques basses eaux 2013 et hautes eaux 2014 des nappes du Lutétien et de l'Yprésien supérieur dans le Bassin Parisien. Rapport BRGM/RP-64887-FR, 119 p.

Beau Ch., Benharrous J., Faytre L. (2004). Granulats en Ile-de-France – Panorama régional. Charte pour une gestion durable et une utilisation rationnelle des granulats en Ile-de-France. Direction Régionale de l'industrie, de la Recherche et de l'environnement d'Île-de-France, Institut d'aménagement et d'urbanisme de la région d'Île-de-France, Unicem Île-de-France, en collaboration avec la Direction régionale de l'Équipement d'Île-de-France. IAURIF/Studio.

Briais J. (2015). Le Cénozoïque du Bassin de Paris : un enregistrement sédimentaire haute résolution des déformations lithosphériques en régime de faible subsidence. Thèse, université de Rennes, 450 p.

Cazenove E. de (1973). Essais de réception des puits. Techniques des sciences municipales. L'eau, 4 et 5. Paris. Cité dans : Castany G. & Margat J. (1977). Dictionnaire français d'hydrogéologie. BRGM.

Chesterikoff A., Chevreuil M., Lecolle P., Gerdeaux D., Testard P. (1981). Écologie du lac de Créteil (Val-de-Marne). Étude pour le Syndicat mixte EAG-BPAL de Créteil. Institut d'hydrologie et de climatologie, École normale supérieure, Paris, 45 p.

- 1 Chesterikoff A. & Chevreuil M. (1987). Hydrogéologie de la plaine alluviale de Créteil (Val-de-
2 Marne), Rev. Fr. Sci. Eau, 6, 449-472.
- 3 DDE94 & Charpentier J. (1975). Base de Plein Air et de Loisirs. Plans de coupes en travers.
4 Planches 1 à 15, échelles hauteur 1:50, longueur 1:200.
- 5 Du M., Fouché O., Zavatiero E., Ma Q., Delestre O., Gourbesville P. (2018). Water planning in
6 a mixed land use Mediterranean area: point-source abstraction and pollution scenarios by a numerical
7 model of varying stream-aquifer regime. Environ. Sci. and Poll. Res., 26(3), 2145-2166.
- 8 Garnier J. & Billen G. (1994). Ecological interactions in a shallow sand-pit lake (Lake Créteil,
9 Parisian Basin, France): a modelling approach. In: Mortensen, E., Jeppesen, E., Søndergaard, M.,
10 Nielsen, L. K. (eds) Nutrient Dynamics and Biological Structure in Shallow Freshwater and Brackish
11 Lakes. Developments in Hydrobiology, 94, Springer, Dordrecht, 97-114.
- 12 Lee T. M. & Swancar A. (1997). Influence of evaporation, groundwater, and uncertainty in the
13 hydrologic budget of Lake Lucerne, a seepage lake in Polk County, Florida. U.S.G.S., Water Supply Paper
14 2439, 61 p.
- 15 Maillot M. (2018). Comité de suivi de l'étude « Risque inondation induite par les écoulements
16 de nappes sur Paris et la petite couronne ». Compte-rendu de la réunion du 17 octobre 2018.
- 17 Mollema P. N. & Antonellini M. (2016). Water and (bio)chemical cycling in gravel pit lakes: a
18 review and outlook. Earth-Science Reviews, 159, 247-270.
- 19 Peudecerf P. (1975). Effets des gravières sur le comportement hydrodynamique des nappes
20 d'eau souterraines. La Houille Blanche, 2(3), 133-140.
- 21 Safège (2001). Étude bathymétrique en Lambert zone 1 et Lambert 93 du lac de Créteil, 3 p.
- 22 Schoeller H. (1962). Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche,
23 exploitation et évaluation des ressources. Masson, 642 p.
- 24 SEMAEC (1982). Déversoir du lac – Plan des ouvrages, échelle 1/50 – Profil en long, échelle
25 1/100. Nouveau Créteil, Infrastructures, 2e tranche.
- 26 Simecsol (1971). Étude de sol. Nouveau Créteil ; quartier du centre-ville – Hôtel de Ville. 4 p.
- 27 Søndergaard M., Torben L., Lauridsen L. S., Jeppesen E. (2018). Gravel Pit Lakes in Denmark:
28 Chemical and Biological State. Science of The Total Environment, 612, 9-17.
- 29 UEPG (2017). European Aggregates Association. Annual Review 2015-2016. [http://
30 www.uepg.eu/uploads/Modules/Publications/uepg-ar2016-17_32pages_v04_small.pdf](http://www.uepg.eu/uploads/Modules/Publications/uepg-ar2016-17_32pages_v04_small.pdf)
- 31 Vanek V. (1987). The interactions between lake and groundwater and their ecological
32 significance. Stygologia, 3(1), 1-23.

33

34

ANNEXES

Données de bathymétrie

Voici le détail des données :

- 358 données de Safège (2001) à distance des rives du lac, soit **28,3% des données** ;
- 852 données de Carpentier et DDE94 en 1976 pour la section nord, nord-est du lac (573 données sur une bande de 1 à 5 m de rive immergée au-dessous de la cote 30 NGF de référence du plan d'eau en 1976, 279 données sur une bande de 1 à 5 m de rive émergée au-dessus de la cote 30 NGF), soit **67,3 % des données** ;
- 55 données de Brun en 2016, points d'expert relevés au droit de certaines rives considérées comme caractéristiques (saillies, renforcement et infrastructures inchangées depuis 1976), soit **4,4 % des données**.

Ces 3 jeux de données totalisent 1 265 points de bathymétrie (mesures).

À cela s'ajoute la création de **522 points de référence**, espacés de 10 m, au contour du lac : il s'agit de **conditions limites au droit des rives** où la hauteur d'eau est fixée arbitrairement selon **six scénarios** : à 0 m partout ; 1 m partout ; 2 m partout ; 0 m à l'ouest et 1 m à l'est ; 0,70 m à l'ouest et 1,70 m à l'est ; 1 m à l'ouest et 2 m à l'est.

Donc, on dispose au total de 1 787 données de profondeur pour ce lac de 40 ha.

Données piézométriques RATP

On a reçu de la RATP les fichiers de 30 piézomètres (figure 30). Tous ces piézomètres sont dans les remblais, alluvions modernes ou anciennes.



Figure 30. Localisation des 30 piézomètres de la RATP.

1 La fréquence de relevé est très hétérogène et varie selon le piézomètre, de 1 mesure à une
 2 dizaine de mesures pour la période d'enregistrement. Il existe au maximum 1 donnée par mois pour
 3 un piézomètre. Ainsi, parmi les 30 piézomètres, seuls 2 piézomètres (tableau 4) ont été utilisables
 4 comme points de contrôle, l'un pour 2015, l'autre pour 2016. Un à l'est du port de Bonneuil-sur-Marne
 5 (à l'est du lac et du Mont-Mesly) pour 2015 et l'autre à Créteil-l'Échat (au nord du Lac) pour 2016.

6

7 **Tableau 4. Données des deux piézomètres de la RATP ayant la plus grande fréquence de mesure**

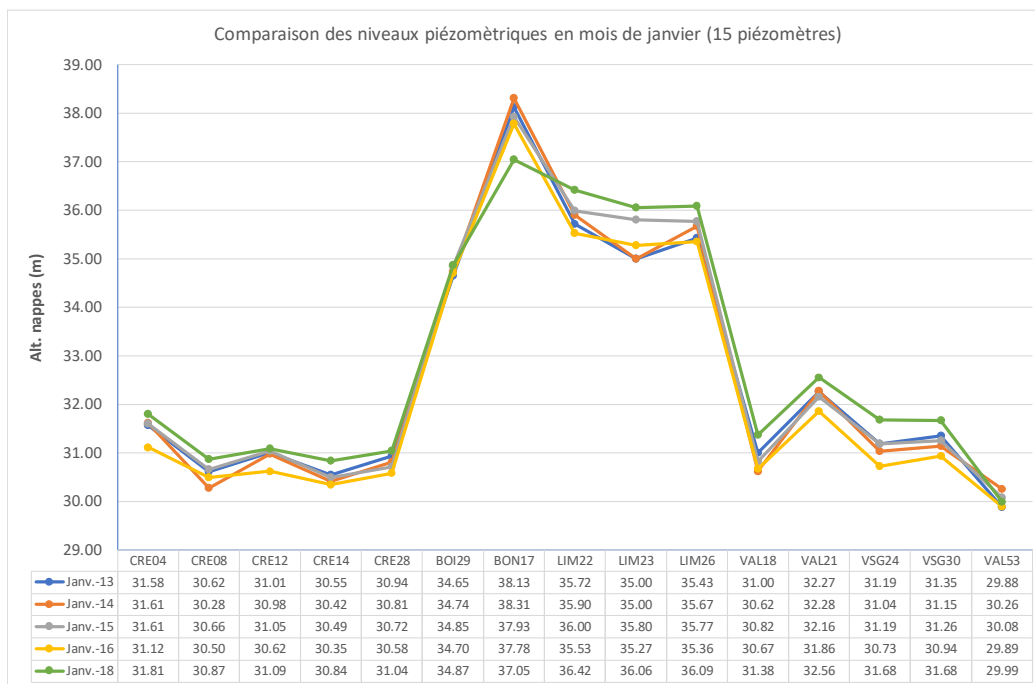
Code	Nom	X	Y	Z	Date	Niv. Piézo NGF
CLE-Pz2	Créteil l'Échat	659554,64	6855240,74	35,8	06/10/2015	30,1
					04/04/2016	30,37
					17/05/2016	30,49
					14/06/2016	30,45
					29/07/2016	30,81
					22/08/2016	30,35
					14/09/2016	30,41
					25/10/2016	30,3
PR-CHV-PZ1	Bonneuil	663766,66	6853739,56	37,8	17/03/2015	32,16
					30/04/2015	32,07
					29/05/2015	32,03
					06/07/2015	31,94

8

9 **Comparaison des niveaux piézométriques (en janvier) de la DSEA et classification**

10 Les niveaux de la nappe phréatique pour les 15 piézomètres du projet ModLac (données DSEA,
 11 figure 31) démontrent que le niveau piézométrique en janvier 2018 est plus élevé que ceux du même
 12 mois en 2013, 2014, 2015 et 2016 (sauf pour BON17 et VAL53). Les données de l'année 2017 n'ont pas
 13 été enregistrées.

14



15

16 **Figure 31. Variation du niveau piézométrique pour les 15 piézomètres de la DSEA**

1 La moyenne mensuelle du niveau du lac mesurée entre 2013 et 2016 (48 mois) est égale à
 2 30,73 m, le niveau maximum est égal à 30,94 m pour mars 2013 et le niveau minimum est égal à
 3 30,31 m pour le mois d'août 2015. Le niveau du lac pour le mois de juin 2016 (crue de la Seine) est égal
 4 à 30,86 m qui est seulement 13 cm plus haut que la moyenne des 4 ans, et il est 8 cm plus bas que le
 5 niveau maximum (tableau 5). Donc le niveau du lac en juin 2016 ne dépasse pas considérablement le
 6 niveau moyen (+13 cm). En revanche, le niveau minimum observé en août 2015 (30,31 m) est bien au-
 7 dessous du niveau moyen pour 4 ans (-42 cm). C'est-à-dire, en comparant avec la moyenne mensuelle
 8 pour 4 ans (2013-2016), le rabattement maximal du lac (août 2015) est 3,2 fois plus grand que la
 9 remontée du lac en période de crue (juin 2016).

10
 11 **Tableau 5. Récapitulatif de la limnimétrie du lac (point de mesure unique)**

	Moyenne	Max.	Min.	Crue 2016
NGF du lac	30,73	30,94	30,31	30,86
Date	48 mois (2013-2016)	Mars 2013	Août 2015	Juin 2016

12
 13 D'une part, on peut classer les piézomètres selon leur position par rapport au lac (tableau 6).
 14

15 **Tableau 6. Catégories des piézomètres DSEA selon leur position par rapport au lac**

Catégorie	Nom des piézomètres	Positionnement
1	CR14, VA18	CR14 ouest du lac – loin et VA18 sud-ouest du lac – proche
2	CR08, CR28	Ouest du lac – proche
3	CR04, CR12	Est du lac
4	VS24, VS30	Sud du lac
5	VA21, VA53	Sud du lac – loin
6	LI22, LI23, LI26	Sud-est du lac
7	BI29	Sud-est du lac – loin
8	BO17	Est du lac – loin

16
 17 D'autre part, on peut faire une autre classification des piézomètres, selon les résultats de la
 18 simulation pour l'année 2013 (la comparaison entre les niveaux piézométriques observés et simulés).
 19 La différence maximum entre le niveau simulé et le niveau observé (tableau 7), à l'issue du calage, est
 20 classée en trois intervalles :

- 21 • Très bonne : < ± 50 cm
- 22 • Bonne : < ± 85 cm
- 23 • Mauvaise : > 100 cm

24
 25 **Tableau 7. Catégories des piézomètres DSEA selon les résultats de la simulation pour 2013**

Catégorie	Nom des piézomètres	Positionnement	Qualité de simulation	Commentaire
1	CR14, VA18	CR14 ouest du lac – loin et VA18 sud-ouest du lac – proche	Bonne simulation	Même qualité pour les deux. On choisit CR14 et VA18
2	CR08, CR28	Ouest du lac – proche	CR08 bonne, CR28 très bonne	On choisit CR28

3	CR04, CR12	Est du lac	CR04 bonne, CR28 très bonne	On choisit CR12
4	VS24, VS30	Sud du lac	Bonne simulation	Même qualité pour les deux. On choisit VS24 et VS30
5	VA21, VA53	Sud du lac – loin	VA21 très bonne, VA53 mauvaise	On choisit VA21
6	LI22, LI23, LI26	Sud-est du lac	Mauvaises	-
7	BI29	Sud-est du lac – loin	Mauvaises	-
8	BO17	Est du lac – loin	Mauvaise	-

1

2 En prenant cette échelle de qualité, le calage sur le niveau du lac est très bon (< 21 cm). Dans le
3 cas où l'on considère les rivières comme « Fluid flux BC », la qualité du calage pour les rivières est
4 mauvaise. On va donc devoir imposer une condition limite de charge sur les rivières.

5 Parmi les deux points de contrôle fournis par Aquif'Brie (points de simulation de la nappe du
6 calcaire de Champigny choisis sur le versant qui limite au sud le domaine d'étude), la simulation est
7 très bonne pour le point situé au sud-ouest du versant (proche de la Seine) mais l'autre point, situé au
8 sud-est, semble obéir à une autre logique (position sur le plateau).

9

10 **Conductivité hydraulique : documents techniques de la SGP concernant la ligne 15 du GPE**

11 Dans la section hydrogéologie de ces documents, on trouve les données de 6 essais de
12 conductivité hydraulique (Ks), réalisés à l'occasion des travaux à la gare des Ardoines, dans ALM, ALA
13 et MIG (tableau 8).

14

15 **Tableau 8. Valeurs de conductivité hydraulique (Ks, en m/s) issues de 6 essais Lefranc ; travaux**
16 **de la station Ardoines (SGP)**

Couche	Max	Min	Moyenne
ALM	-	-	3,50E-5
ALA	2,00E-4	2,00E-5	8,50E-5
MIG	4,00E-5	1,00E-6	1,70E-5

17

18 De plus, dans ces documents, on a trouvé les données bibliographiques de la conductivité
19 hydraulique des aquifères dans ce secteur. Les données extraites de ces documents démontrent que
20 la Ks varie fortement au sein d'une même couche géologique (tableau 9).

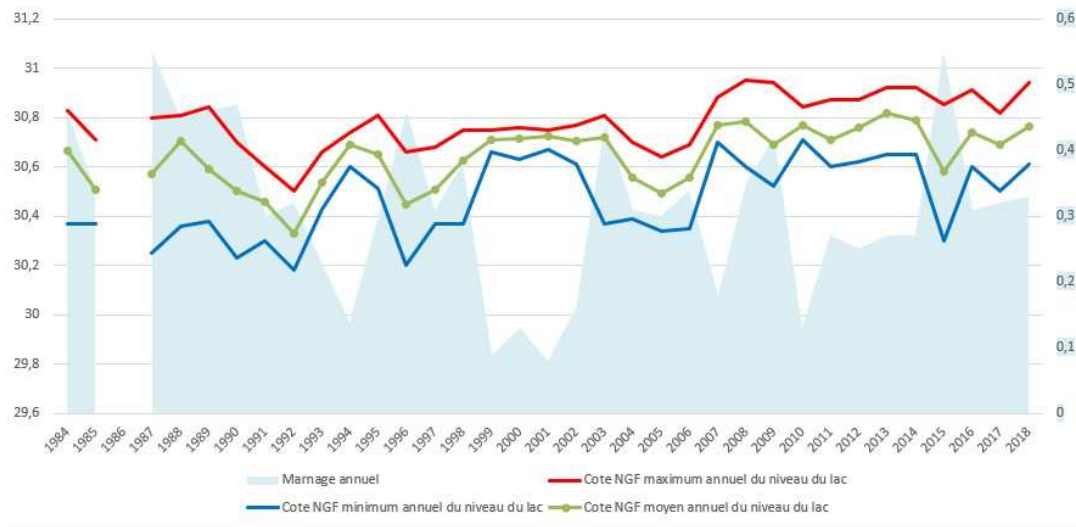
21

22 **Tableau 9. Données de Ks (en m/s) issues de la bibliographie dans les documents de la SGP**

ALM	10E-8 – 10E-5
ALA	10E-7 – 10E-2
CCH	10E-7 – 10E-3
MIG	10E-6 – 10E-5
MSO	10E-5 – 10E-3
SBS	10E-7 – 10E-4
MCI	10E-8 – 10E-2
CGR	10E-8 – 10E-4

23

Évolution du niveau de la mire LACCRET / CRE052 en m NGF pour le lac de Créteil de 1984 à 2018: niveau maximum, minimum, moyen et marnage annuel.



- 1
- 2
- 3
- 4
- 5

Figure 32. Niveau mensuel NGF maximum, minimum, moyen, et marnage annuel pour la mire LACCRET / CRE052 du lac de Créteil de 1984 à 2018, d'après les relevés effectués par la DSEA.

1

2

1
2
3

Résumé