

Interactions entre les aménagements urbains, la nappe superficielle et les conditions de rejets des eaux pluviales : cas d'étude sur le futur campus urbain du Moulon



Crédit photo : Cerema IdF

Convention de partenariat de recherche et d'échanges de données

**Partenaire(s) : Établissement Public d'Aménagement de Paris-Saclay
Institut Français des Sciences et Technologies des
Transports, de l'Aménagement et des Réseaux**

Interactions entre les aménagements urbains, la nappe superficielle et les conditions de rejets des eaux pluviales : cas d'étude sur le futur campus urbain du Moulon

Convention de partenariat de recherche et d'échanges de données

Historique des versions du document

Version	Date	Commentaire
v1	Mai 2018	

Affaire suivie par

Emmanuel BERTHIER - Département Ville Durable – Unité Eau
<i>Tél. : 01 34 82 13 15</i>
<i>Courriel : emmanuel.berthier@cerema.fr</i>
Site de Trappes : Cerema Île-de-France – 12, rue Teisserenc-de-Bort, 78190 Trappes

Références

n° d'affaire : C16PV0147

Rapport	Nom	Date	Visa
Établi par	Emmanuel Berthier, Emmanuel Dumont, Charles Kréziak, Jérémie Sage, Marie-Laure Mosini, Fabrice Rodriguez	Avril 2018	
Avec la participation de	Teddy Akhtar, Tristan Basset, Phalkun Chin, Didier Gallis, Hugues Giroux		
Contrôlé par			
Validé par			

SOMMAIRE

1 INTRODUCTION.....	11
2 ACTION I : CONCEPTION D'UN MODÈLE GÉOLOGIQUE SUR LA ZAC DU MOULON 15	
2.1 Contexte et objectifs.....	15
2.1.1 Cadres géographique et géologique.....	15
2.1.2 Bancarisation de données et démarche de modélisation.....	19
2.2 Avancées 2015-2017.....	24
2.2.1 Campagne de reconnaissance du Cerema.....	24
2.2.2 Apports des mesures de radioactivité naturelle (RAN).....	25
2.2.3 Résultat des travaux d'interpolation.....	30
2.3 Perspectives.....	35
3 ACTION II : HYDROGÉOLOGIE DE LA NAPPE SUPERFICIELLE.....	36
3.1 Contexte et objectifs.....	36
3.1.2 Objectifs dans le cadre de la convention 2015 - 2017.....	46
3.2 Avancées 2015-2017.....	46
3.2.1 Fluctuations des niveaux de la nappe superficielle.....	46
3.2.2 Suivi des débits d'exhaure.....	52
3.2.3 Cartographie de la surface piézométrique.....	55
3.2.4 Analyse des valeurs de perméabilité.....	63
3.3 Synthèse / Perspectives.....	66
4 ACTION III : DÉVELOPPEMENT ET ÉVALUATION D'UN MODÈLE HYDROLOGIQUE URBAIN INTÉGRÉ.....	69
4.1 Contexte et objectifs.....	69
4.1.1 Le modèle URBS et son application à la ZAC de Moulon.....	69
4.1.2 Objectifs dans le cadre de la convention 2015-2017.....	72
4.2 Avancées 2015-2017.....	73
4.2.1 Représentation des flux souterrains.....	73
4.2.2 Fonctionnement du réseau hydrographique.....	84
4.2.3 Incidence du prétraitement géographique.....	101
4.3 Vers une représentation consolidée.....	111
4.3.1 Introduction.....	111
4.3.2 Méthodologie.....	113
4.3.3 Résultats.....	118
4.3.4 Conclusions.....	126
4.4 Conclusion et perspectives.....	127
5 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	129
RÉFÉRENCES.....	130

6 ANNEXES.....	132
ANNEXE 1 – DÉTAILS DE COUPES GÉOLOGIQUES.....	132
ANNEXE 2 – PLANS DIVERS.....	133
ANNEXE 3 – DESCRIPTION DE L'ECOQUARTIER BOTTIÈRE CHÉNAIE.....	135
ANNEXE 4 – SENSIBILITÉ DES RÉSULTATS AU MODE DE CALCUL DE LA PROFONDEUR DE LA NAPPE AU NIVEAU DU PIÉZOMÈTRE B.....	136
ANNEXE 5 – INCIDENCE DE LA DISCRÉTISATION POUR LA CONFIGURATION CORRESPONDANT AUX RÉSULTATS ACTUALISÉS.....	137
ANNEXE 6 – MÉTHODOLOGIE POUR L'ESTIMATION DE L'INCERTITUDE TOTALE SUR LES NIVEAUX DE NAPPES SIMULÉS.....	139

LISTE DES FIGURES

Figure 1 - Localisation et topographie de la zone d'étude (scan25 IGN).....	13
Figure 2 - Occupation du sol de la zone d'étude en situation initiale (2010) et en situation aménagée (prévision 2022).....	14
Figure 3 - Coupe lithostratigraphique du plateau (d'après Cojean).....	16
Figure 4 - Carte géologique du plateau de Saclay – source BRGM.....	17
Figure 5 - Coupe lithologique schématique du complexe Formation de Lozère – Argiles à meulières (d'après Grisoni).....	19
Figure 6 : Localisation des sondages en fonction de la source des données.....	21
Figure 7: Validation croisée du toit des Sables de Fontainebleau (variogramme linéaire).23	23
Figure 8 - Radioactivité des principales roches sédimentaires exprimée en A.P.I.....	25
Figure 9 - Principe de la diagraphie RAN et aspect d'un log de mesure (unité A.P.I.).....	26
Figure 10 - Mesure RAN dans le sondage carotté C12 de l'étude de l'ENS (unité cps) et log lithologie observé.....	27
Figure 11 - Profil ouest-est établi à partir des mesures RAN.....	28
Figure 12 - Aspect du log RAN au droit du forage F41. Comptage dans l'Argile à Meulières et zoom sur la baisse de comptage avec la profondeur dans les Limons.....	29
Figure 13: Interpolation du toit des Sables de Fontainebleau (variogramme linéaire).....	30
Figure 14: Variogramme du toit des Sables de Fontainebleau (ZAC du Moulon).....	31
Figure 15: Interpolation du toit des Sables de Fontainebleau (modèle de variogramme).31	31
Figure 16: Carte des écarts-type d'interpolation pour le toit des Sables de Fontainebleau.....	32
Figure 17: Variogramme du mur des Limons des Plateaux.....	32
Figure 18: Interpolation du mur des Limons des Plateaux.....	33
Figure 19: Carte des écarts-type d'interpolation pour le mur des Limons des Plateaux...33	33
Figure 20: Localisation et aspect des coupes géologiques déduites du modèle interpolé.34	34
Figure 21: Comparaison des cumuls de précipitation annuels avec les normales (1981 - 2010) à la station de Toussus-le-Noble.....	36
Figure 22: Comparaison des cumuls de précipitation mensuels avec les normales (1981 - 2010) à la station de Toussus-le-Noble.....	37
Figure 23: Inondation sur le campus de l'Université Paris Sud - juin 2016 (Source : http://www.actu.u-psud.fr).....	37
Figure 24: Plan du plateau de Saclay. Ministère de la construction. 1960. M. Charles GAY.....	39
Figure 25: Fonctionnement de la rigole de Corbeville (Source : Artelia, 2013).....	39
Figure 26: Vue de la rigole de Corbeville depuis le pont de pierre.....	40
Figure 27: Débouché d'un collecteur de drains dans la rigole de Corbeville.....	40
Figure 28: Mare de la ferme du Moulon (mare Nord) – ZH n°49.....	41
Figure 29: Mare de la ferme du Moulon (mare Sud) – ZH n°49.....	41
Figure 30: Bassin de rétention du PUIO – ZH n°94.....	42
Figure 31: Mouillère aux abords de la rigole de Corbeville – ZH n°42B.....	42
Figure 32: Zones de stagnation d'eau temporaire (1).....	42
Figure 33: Zones de stagnation d'eau temporaire (2).....	42
Figure 34: Réalisation du bassin du DECK (février 2015).....	43
Figure 35: Noues le long des bâtiments DIGITEO et PCRI (février 2015).....	43
Figure 36: Jardin de l'IUT (1).....	43
Figure 37: Jardin de l'IUT (2).....	43
Figure 38: Passage nord-sud (PNS).....	44
Figure 39: Casiers de la Lisière du Moulon.....	44

Figure 40: Emplacement des piézomètres installés par le Cerema.....	47
Figure 41: Téléchargement des données des sondes autonomes.....	50
Figure 42: Fluctuations de la profondeur de la nappe mesurées dans les piézomètres du Cerema entre le 6 juin 2012 et 12 octobre 2017.....	50
Figure 43: Fluctuations de la cote piézométrique mesurées dans les piézomètres du Cerema entre le 6 juin 2012 et 12 octobre 2017.....	52
Figure 44: Puisard via lequel sont collectées puis pompées les eaux d'exhaure sous le bâtiment IPS2.....	53
Figure 45: Evolution des volumes journaliers collectés sous l'amphithéâtre de l'institut des sciences des plantes et des niveaux de nappes sur trois piézomètres proches sur la période d'instrumentation.....	55
Figure 46: Relation niveau de nappe débit d'exhaure pour les piézomètres C, D et L.....	55
Figure 47: Recensement des piézomètres installés sur la ZAC du Moulon.....	56
Figure 48: Carte des sondages dans lesquels des venues d'eau ont été observées.....	57
Figure 49: Venues d'eau observées dans diverses fouilles de la ZAC du Moulon.....	58
Figure 50: Venues d'eau dans une fouille située le long de la RN306 (24 juin 2014).....	59
Figure 51: Mesure du niveau d'eau et prélèvement d'eau dans une fouille le long de la RN306 (24 juin 2014).....	59
Figure 52: Carte piézométrique obtenue par interpolation des niveaux d'eau mesurés le 24 juin 2014.....	60
Figure 53: Carte piézométrique obtenue par interpolation des niveaux d'eau mesurés le 25 mars 2015.....	61
Figure 54: Bassin du DECK (mai 2015).....	62
Figure 55: Bassin du DECK (février 2018).....	62
Figure 56: Carte piézométrique obtenue par interpolation des niveaux d'eau mesurés le 8 mars 2016.....	62
Figure 57: Carte piézométrique obtenue par interpolation des niveaux d'eau mesurés le 21 novembre 2016.....	63
Figure 58: Classes de perméabilité en fonction des formations obtenues à partir des essais des perméabilité.....	65
Figure 59: Profils hydrogéologiques obtenues à partir des relevés de mars 2015 et novembre 2016.....	67
Figure 60 - Discrétisation adoptée dans URBS: découpage du bassin versant en unités hydrologiques basées sur la parcelle cadastrale connectées au réseau viaire et souterrain.....	69
Figure 61 - Représentation de l'unité hydrologique dans URBS (découpage selon trois profils d'occupation des sols représentés par 4 réservoirs).....	70
Figure 62 - Résultats obtenus à l'issue de la thèse d'Yinghao Li (2015) : évolution du niveau de la nappe suite à l'aménagement de la ZAC de Moulon.....	71
Figure 63 - Représentation du drainage au niveau des bâtiment.....	74
Figure 64 - Parcelle intégrant le bâtiment IPS2.....	75
Figure 65 - Niveaux de nappe moyen simulés à l'état futur pour les différents scénarios sur les débits d'exhaure (les fuseaux correspondent à l'enveloppe générée pour la gamme de valeur de RACT).....	76
Figure 66 - Niveaux de nappe simulés pour différentes valeurs de flux appliqués en périphérie du domaine d'étude.....	78
Figure 67 - Distribution des écarts au niveau de nappe simulé pour le scénario de référence pour la condition au limite en flux QOUT = 25 mm/an (résultats de simulation au 01/01/2013).....	79
Figure 68 - Calcul du flux s'appliquant en limite du domaine d'étude pour l'hypothèse de conditions aux limites en profondeur de nappe.....	79
Figure 69 - Niveaux de nappe simulés pour différentes valeurs de profondeur de nappe.....	

appliquées en périphérie du domaine d'étude (le cas « nappe affleurante » correspond à ZOUT = -0,2m en raison de l'extension de la frange capillaire au dessus de -0,2m).....	81
Figure 70 - Distribution des écarts au niveau de nappe simulé pour le scénario de référence pour la condition au limite supposant une profondeur de nappe à 0,2m (résultats de simulation au 01/01/2013).....	81
Figure 71 - Niveaux moyens de nappe simulés pour différents scénarios de recharge de la nappe des sables de Fontainebleau (sur une durée de 3 ans, à l'état initial).....	83
Figure 72 - Distribution sur les différents tronçons du réseau des erreurs de type 2 (surcharge en débit) à l'état aménagé.....	85
Figure 73 - Illustration des erreurs de type 3 (débits négatifs) sur l'un des tronçons (EP39_BIS) de la ZAC à l'état aménagé.....	86
Figure 74 - Point de mesure du débit de la rigole de Corbeville à l'entrée du site du CEA (source: Hydratec).....	87
Figure 75 - Fréquence de non-dépassement des débits mesures au niveau de la D306 et simules en deux points de la rigole.....	87
Figure 76 - Représentation des noues dans URBS.....	89
Figure 77 - Profondeur moyenne de la nappe superficielle simulée sur l'année 2014 sur le bassin versant de l'écoquartier Bottière-Chénaie.....	90
Figure 78 - Comparaison par événement pluvieux du volume ruisselé mesuré et simulé à l'exutoire de l'écoquartier Bottière-Chénaie sur l'année 2014 (113 événements pluvieux)	91
Figure 79 - Débit mesuré et simulé à l'exutoire de l'écoquartier Bottière-Chénaie selon 2 configurations de paramètres de la fonction de transfert, événement du 06/07/2014.....	91
Figure 80 - Comparaison entre la simulation en noir et les mesures piézométriques sur l'année 2014 sur le bassin versant de l'écoquartier.....	92
Figure 81 - Représentation schématique du module de régulation des débits.....	93
Figure 82 - Comparaison de l'incidence sur le niveau moyen de la nappe des différents scénarios e gestion des eaux pluviales via les noues.....	95
Figure 83 - Effet de la régulation des débits sur les débits totaux simulés aux exutoires du bassin versant (Cas 1: absence de régulation, cas 2: régulation à 1 l/s/ha avec LNOUE = 1m, cas 4 : régulation des débits à 1 l/s/ha avec LNOUE ↔ 25 mm de rétention).....	96
Figure 84 - Distribution des dysfonctionnements correspondant à une surcharge en débit du réseau pour la pluie de projet de niveau 1 à l'état aménagé.....	98
Figure 85 - Distribution des dysfonctionnements correspondant à une surcharge en débit du réseau pour la pluie de projet de niveau 2 à l'état aménagé.....	99
Figure 86 - Distribution des dysfonctionnements correspondant à une surcharge en débit du réseau pour la pluie de projet de niveau 2 à l'état aménagé.....	100
Figure 87 - Illustration de l'incidence de la correction de l'erreur identifiée dans l'utilisation de l'information relative à la profondeur du réseau à l'état initial et à l'état aménagé.....	102
Figure 88 - Influence du changement de procédure de prétraitement sur les niveaux moyens de nappes simulés sur le bassin d'étude (le nouveau prétraitement est ici désigné comme « prétraitement FV »).....	104
Figure 89 - Incidence d'une modification de la discrétisation du bassin versant sur les niveaux de nappe simulés (pour le scénario de prétraitement de référence).....	105
Figure 90 - Connexions-parcelles réseau générées à l'état initial pour la discrétisation « initiale » (à droite) et la discrétisation « future » (à gauche).....	106
Figure 91 - Incidence d'une modification de l'occupation des sols sur les niveaux de nappe simulés (pour le scénario de prétraitement de référence).....	107
Figure 92 - Incidence d'une modification du réseau sur les niveaux de nappe simulés (pour le scénario de prétraitement de référence).....	108
Figure 93 - Incohérences identifiées dans la description du flux d'infiltration vers le réseau résultant de la connexion systématique des parcelles à des filaires de voirie.....	110
Figure 94 - Superposition du flux IDRAIN aux flux latéraux simulés via le module WTI. .	110

Figure 95 - Comparaison des connexions parcelles-réseau générées à partir de la nouvelle méthode de prétraitement géographique à celles utilisées pour les premières applications de URBS à la ZAC de Moulon.....	114
Figure 96 - Niveaux de nappe mesurés aux différents piézomètres utilisés pour le calage du modèle.....	117
Figure 97 - Comparaison des niveaux de nappe simulés pour la configuration dite « optimale » aux niveaux mesurés sur les différents piézomètres.....	120
Figure 98 - Niveaux de nappe moyens simulés à l'état initial après actualisation des résultats et comparaison aux résultats initiaux (simulations de 2015).....	122
Figure 99 - Niveaux de nappe moyens simulés à l'état aménagé après actualisation des résultats et comparaison aux résultats à l'état initial (après actualisation).....	124

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Synthèse des épaisseurs des formations géologiques rencontrés dans les piézomètres réalisés par le Cerema (AM : Argiles à Meulières).....	25
Tableau 2 - Zones humides du quartier du Moulon (Source : Artelia, 2013).....	40
Tableau 3 - Synthèse des caractéristiques des piézomètres réalisés par le Cerema.....	48
Tableau 4 - Type de sondes utilisées pour l'instrumentation des piézomètres et période d'instrumentation des différents piézomètres.....	49
Tableau 5 - Valeurs statistiques des profondeurs de la nappe mesurées dans les différents piézomètres.....	51
Tableau 6 – Synthèse des mesures effectuées pour l'estimation du débit moyen associé à chacune des pompes installées dans le puisard du bâtiment IPS2 (NB : les écarts constatés sur les débits mesurés pour les différents cycles de vidanges apparaissent négligeable et justifient l'utilisation d'une valeur moyenne).....	54
Tableau 7 – Synthèse des résultats des essais de perméabilité réalisés sur la ZAC du Moulon.....	64
Tableau 8 – Synthèse des résultats des essais de perméabilité réalisés sur la ZAC du Moulon, en fonction du type d'essai.....	65
Tableau 9 - Bilan hydrologique associé aux différents scénarios sur les débits d'exhaure à l'état actuel (simulation pour une période de trois ans ; les différents termes sont exprimés en pourcentage de la pluie P ; ET désigne l'évapotranspiration, QNAT,VOI,BAT le ruissellement sur les surfaces naturelles, les voiries et le bâti, IRES l'infiltration vers le réseau, QINF l'infiltration dans les noues, QEXH le terme associé aux débits d'exhaure et DSTOCK la variation du stock d'eau dans le sol).....	75
Tableau 10 - Bilan hydrologique (en % des précipitations) associé aux différents scénarios sur les débits d'exhaure à l'état futur (ET : évapotranspiration, QNAT,VOI,BAT : ruissellement sur les surfaces naturelles, les voiries et le bâti, IRES : infiltration vers le réseau, QINF : l'infiltration dans les noues, QEXH : volume d'eaux d'exhaure et DSTOCK : variation du stock d'eau dans le sol).....	76
Tableau 11 - Bilan hydrologique (en % des précipitations) associé aux différents hypothèses sur les conditions aux limites (ET : évapotranspiration, QNAT,VOI,BAT : ruissellement sur les surfaces naturelles, les voiries et le bâti, IRES : infiltration vers le réseau, DSTOCK : variation du stock d'eau dans le sol)(N.B. : les différences avec le tableau 9 pour le scénario de référence s'expliquent par l'utilisation d'un niveau initial de nappe différent).....	77
Tableau 12 - Bilan hydrologique (en % des précipitations) associé aux différents	

hypothèses sur les conditions aux limites (ET : évapotranspiration, QNAT,VOI,BAT : ruissellement sur les différentes surfaces, IRES : infiltration vers le réseau,QOUT : flux sortant du domaine de modélisation, DSTOCK : variation du stock d'eau dans le sol).....	80
Tableau 13 - Bilan hydrologique (en % des précipitations) simulé à l'état initial pour différentes valeurs du flux d'infiltration de vers la nappe des sables de fontainebleau QSF (ET : évapotranspiration, QNAT,VOI,BAT : ruissellement sur les surfaces naturelles, les voiries et le bâti, IRES : infiltration vers le réseau, DSTOCK : variation du stock d'eau dans le sol).....	83
Tableau 14 - Diagnostic du fonctionnement du module de transfert en réseau de URBS - n1 : pourcentage de tronçon affecté par les différents types d'erreur (pour un nombre total de tronçon de 548 et 454 à l'état initial et aménagé), n2 : nombre d'erreurs par pas de temps sur l'ensemble du réseau.....	85
Tableau 15 - Bilan hydrologique sur l'écoquartier Bottière-Chénaie sur l'année 2014 en % des précipitations, (ET : évapotranspiration, QNAT,VOI,BAT : ruissellement sur les surfaces naturelles, les voiries et le bâti, IRES_EP :infiltrations dans les noues, IRES_EU: infiltration dans le réseau d'eaux usées DSTOCK : variation du stock d'eau dans le sol).	89
Tableau 16 - Bilan hydrologique (en % des précipitations) simulé à l'état aménagé pour différents scénarios de gestion des eaux pluviale (ET : évapotranspiration, QNAT,VOI,BAT : ruissellement sur les surfaces naturelles, les voiries et le bâti, IRES : infiltration vers le réseau, QINF : le volume infiltré via les noues. Les configurations marquées d'un astérisque correspondent à celles présentées figure 82).....	94
Tableau 17 - Caractéristiques des pluies de projets telles que définies dans le dossier d'autorisation au titre de la loi sur l'eau du projet urbain du Moulon.....	98
Tableau 18 - Bilan hydrologique associé à la pluie de projet « de niveau 2 » (1niveau simulé au 15/02/2013, 2niveau simulé au 15/09/2012).....	98
Tableau 19 - Bilan hydrologique associé à la pluie de projet « de niveau 2 » (1niveau simulé au 15/02/2013, 2niveau simulé au 15/09/2012).....	99
Tableau 20 - Bilan hydrologique associé à la pluie de projet « de niveau 3 » (1niveau simulé au 15/02/2013, 2niveau simulé au 15/09/2012).....	100
Tableau 21 - Incidence de la correction de l'erreur sur l'attribution de la profondeur des tronçons de réseau sur le bilan hydrologique (en % des précipitations) simulé à l'état initial et à l'état futur (P : précipitations, ET : évapotranspiration, QNAT,VOI,BAT : ruissellement sur les différentes surfaces, IRES : infiltration vers le réseau, DSTOCK : variation du stock d'eau dans le sol)(remarque : les noues ne sont pas modélisées).....	102
Tableau 22 - Liste des scénarios utilisés pour tester l'influence de la discrétisation spatiale, de l'occupation des sols et des données relatives aux réseaux sur les sorties du modèle. L'effet de la discrétisation, de l'occupation du sol et du réseau est évalué en comparant les 6 derniers scénarios aux deux scénarios « de référence ».....	103
Tableau 23 - Modifications du bilan hydrologique associées à l'utilisation d'une nouvelle procédure de prétraitement des données géographiques.....	104
Tableau 24 - Effet d'un changement de discrétisation à l'état initial et à l'état futur (l'ensemble des simulations sont réalisées pour les données générées à partir du « nouveau prétraitement géographique »).....	105
Tableau 25 - Effet d'un changement de discrétisation à l'état initial et à l'état futur (l'ensemble des simulations sont réalisées pour les données générées à partir du « nouveau prétraitement géographique »).....	106
Tableau 26 - Effet d'un changement d'une modification des données liées au réseau (l'ensemble des simulations sont réalisées pour les données générées à partir du « nouveau prétraitement géographique »).....	107
Tableau 27 - Paramètres et gammes de valeurs retenus pour le calage du modèle et l'estimation des incertitudes.....	116
Tableau 28 - Résultats associés au jeu de paramètre « optimum » maximisant la valeur	

moyenne du coefficient de Nash-Sutcliffe sur les piézomètres A, C, D, E et I pour les deux configurations testées.....	119
Tableau 29 - Valeur du coefficient de Nash calculé sur les différents piézomètres (1 Jeu de paramètre maximisant la valeur moyenne du coefficient de Nash-Sutcliffe sur les piézomètres A, C, D, E et I).....	119
Tableau 30 - Valeurs minimales, maximales et moyennes des paramètres rattachés au sol et au processus d'infiltration en réseau pour les configurations identifiées à l'issu du calage.....	121
Tableau 31 - Valeurs minimales, maximales et moyennes des différents termes du bilan hydrologique à l'état initial pour les configurations sélectionnées à l'issu du calage. Comparaison aux résultats initiaux sous deux hypothèses du niveau initial de la nappe z0 (1 correspond aux conditions initiales sur la profondeur de la nappe utilisée pour les « résultats actualisés »).....	123
Tableau 32 - Valeurs minimales, maximales et moyennes des différents termes du bilan hydrologique à l'état aménagé pour les configurations sélectionnées à l'issu du calage. Comparaison aux résultats initiaux sous deux hypothèses du niveau initial de la nappe z0 (1 scénarios pour lesquels l'hypothèse d'une régulation des débits à 0.7 l/s/ha utilisée pour la modélisation des noues, 2 correspond aux conditions initiales sur la profondeur de la nappe utilisée pour les « résultats actualisés »).....	125
Tableau 33 - Synthèse des différents termes du bilan hydrologique simulé à l'état initial et à l'état aménagé pour les configurations sélectionnées à l'issu du calage (valeur moyenne et entre crochets valeurs minimales et maximales).....	125

1 Introduction

Les aménageurs sont confrontés à des choix de plus en plus nombreux concernant la gestion de l'eau dans leurs projets. Le cadre réglementaire devient de plus en plus exigeant (en particulier la directive cadre européenne sur l'eau du 23 octobre 2000), conjugué à une demande sociétale croissante pour un meilleur environnement urbain dans laquelle l'eau tient une place centrale, et des options techniques qui se multiplient et dont l'évaluation des performances reste parfois partielle (en particulier les techniques alternatives pour les eaux pluviales).

L'Epa Paris-Saclay, établissement public d'aménagement, a pour mission de développer le cluster scientifique et technologique de Paris-Saclay situé à 20 km au sud de Paris. Il doit aménager le territoire en privilégiant l'accessibilité, le confort et le fonctionnement urbain dans le respect de l'environnement naturel privilégié du plateau de Saclay. La loi instituant l'Epa Paris-Saclay stipule que "dès lors que des projets d'urbanisation affectent l'écoulement des eaux superficielles ou souterraines, l'Etablissement public de Paris-Saclay prend les mesures permettant le maintien de l'équilibre hydrographique du plateau de Saclay et des vallées concernées par l'écoulement des eaux du plateau" (extrait de la loi n°2014-58 du 27 janvier 2014 – art. 25).

Le Cerema, établissement public administratif, a pour missions d'apporter un appui scientifique et technique renforcé pour élaborer, mettre en œuvre, et évaluer les politiques publiques de l'aménagement et du développement durable, auprès de tous les acteurs impliqués (Etat, collectivités territoriales, acteurs économiques ou associatifs, partenaires scientifiques). Sa direction territoriale d'Île-de-France accueille une équipe importante qui mène des études et des recherches sur l'impact des milieux construits (villes et infrastructures de transports) sur le cycle de l'eau.

L'Ifsttar, établissement public à caractère scientifique et technique, consacre ses recherches au sein du laboratoire Eau et Environnement du département GERS, aux différentes thématiques liées à l'eau en ville : hydrologie quantitative, gestion et diagnostic des systèmes d'assainissement, gestion à la source des eaux pluviales, étude de la pollution des sols et des sédiments. Il allie une compétence d'observation à une compétence de modélisation hydrologique. Le Laboratoire Eau et Environnement a développé des modèles hydrologiques distribués et semi-distribués pour représenter le fonctionnement hydrologique du milieu urbain et périurbain, du point de vue quantitatif.

Pour l'Epa Paris-Saclay, l'enjeu de la gestion de l'eau est particulièrement prégnant autour du projet d'aménagement du quartier du Moulon : sur 300ha, un campus urbain va être construit avec une densité relativement importante et des aménagements du proche sous-sol (multiples réseaux, parkings, ...). L'Epa Paris-Saclay envisage une gestion moderne des eaux pluviales sur le Moulon, en privilégiant la gestion à la source via des techniques alternatives qui favorisent l'infiltration et/ou l'évapotranspiration. Les ouvrages souterrains, et en particulier les parkings, vont aussi modifier l'hydrogéologie de la nappe superficielle parfois présente sur le territoire du projet. Les interactions avec les futurs ouvrages d'infiltration sont aussi susceptibles d'impacter cette nappe superficielle, interactions encore méconnues et non prises en compte par les outils traditionnels d'ingénierie.

Le Cerema et l'Ifsttar mènent depuis 2011, en partenariat avec l'Epa Paris-saclay et avec un soutien de la région Île-de-France, des recherches sur le quartier du Moulon visant à

évaluer les interactions entre les futurs aménagements et le cycle de l'eau, et plus spécifiquement avec la nappe superficielle et les conditions de rejet aux réseaux superficiels. Un modèle géologique du territoire en 3 dimensions a été initié ; un suivi des niveaux de la nappe superficielle est mené en continu depuis l'été 2012 ; et un modèle hydrologique détaillé et intégré est mis en œuvre afin de simuler les interactions de divers scénarios d'aménagement.

Dans ce contexte, une convention a été signée en Novembre 2014 visant à poursuivre la collaboration de recherche et d'échanges de données entre l'Epa Paris-Saclay, le Cerema et l'Ifsttar sur le sujet des interactions des aménagements avec le cycle de l'eau, avec comme cas d'étude le quartier du Moulon. Ce partenariat doit produire des prolongements scientifiques en termes d'exploitation de données, de développements d'outils (en particulier d'un modèle), et de transferts opérationnels de connaissances. Il doit aussi permettre à l'Epa Paris-Saclay d'améliorer ses connaissances sur l'hydrogéologie du plateau, en vue de confirmer ou d'orienter ses choix d'aménagement, et d'apporter l'aide technique nécessaire en vue de définir les prescriptions à imposer aux acteurs de l'aménagement et de la construction de la ZAC du Moulon.

Ce rapport constitue le livrable finale du partenariat, intitulé « Interactions entre les aménagements urbains et les nappes superficielles et les conditions de rejets aux réseaux, avec comme cas d'étude le futur campus urbain du Moulon ». Le programme du partenariat est structuré autour de 4 actions sur une durée de 3ans (novembre 2014 - novembre 2017) :

- Action 1 : Conception d'un modèle géologique sur la ZAC du Moulon.

Cette action a pour objectif de construire, par interpolation, un modèle géologique en s'appuyant sur de données géologiques détenues ou acquises en propre par le Cerema, et sur l'ensemble des données transmises par l'Epa Paris-Saclay issues des études et travaux d'aménagement du futur campus du Moulon. L'élaboration de ce modèle, utilisé pour les autres actions du partenariat, nécessite une analyse fine des formations géologiques superficielles, très hétérogènes.

Action 2 : Une meilleure connaissance de l'hydrogéologie de la nappe superficielle.

Il est ici recherché d'améliorer la caractérisation du fonctionnement hydrogéologique des formations superficielles, en étudiant notamment si ces formations sont le siège d'une réelle nappe ou plutôt de simples « poches » d'eau non connectées. Pour cela, le suivi automatisé des piézomètres déjà installés est complété par des relevés manuels dans l'ensemble des piézomètres présents sur la nappe, afin d'établir une cartographie de la nappe superficielle. L'influence du drainage des sous-sols des bâtiments doit aussi être investigué.

Action 3 : Développement et évaluation du modèle hydrologique urbain intégré URBS.

Le modèle de recherche URBS, co-développé par le Cerema et l'Ifsttar, permet de simuler en détail les interactions entre des aménagements, la nappe superficielle, et les rejets d'eau dans les réseaux de surface. L'objectif de cette action est de continuer le développement et l'évaluation du modèle sur le cas d'étude du Moulon. Le réalisme des résultats fournis par URBS sera discuté, résultats qui pourront alimenter les réflexions de l'aménageur sur la gestion des eaux pluviales.

Action 4 : Analyse et simulation des modalités de gestion des eaux sur le futur campus urbain.

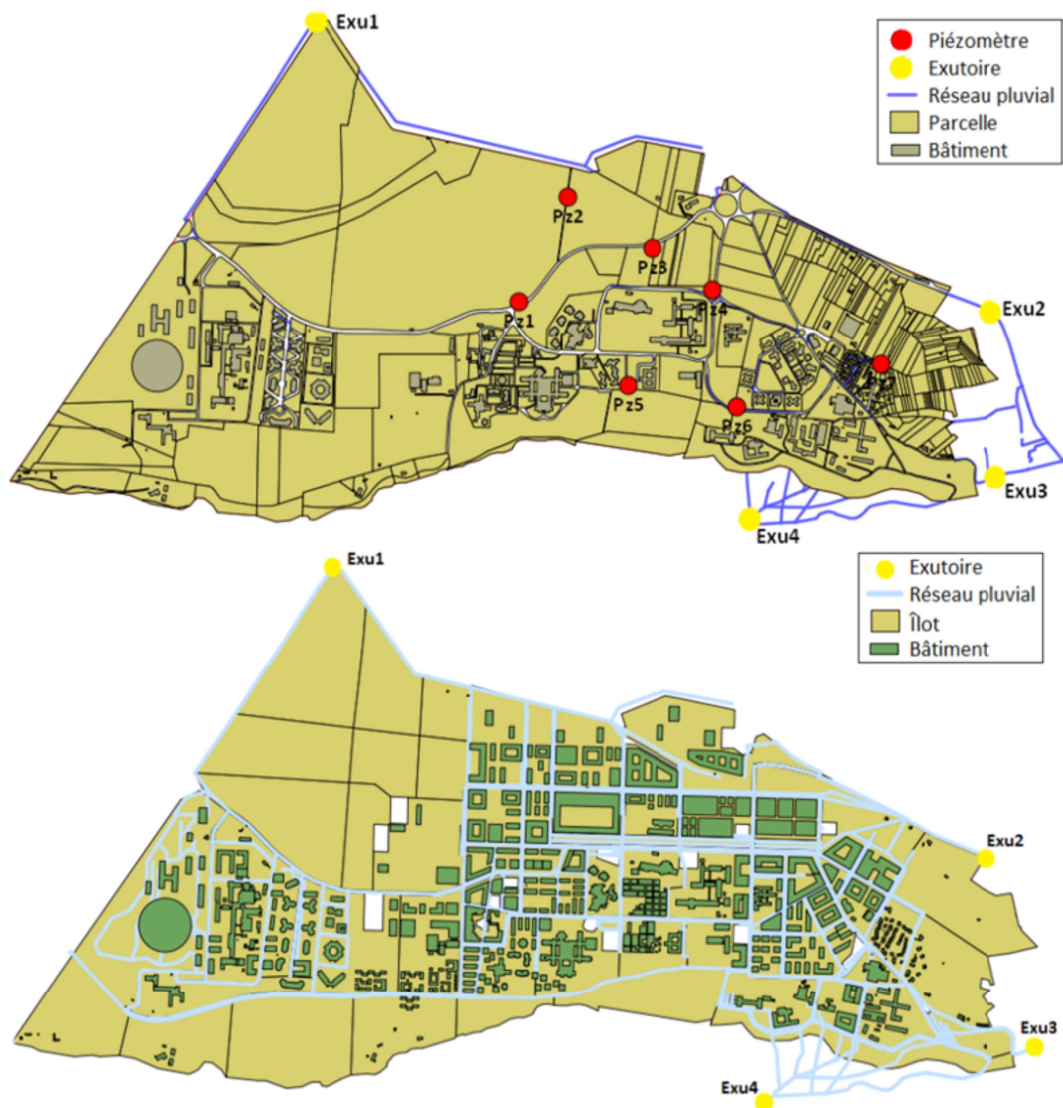


Figure 2 - Occupation du sol de la zone d'étude en situation initiale (2010) et en situation aménagée (prévision 2022)

2 Action I : Conception d'un modèle géologique sur la ZAC du Moulon

2.1 Contexte et objectifs

2.1.1 Cadres géographique et géologique

2.1.1.1 Caractéristiques morphologiques de la zone d'étude

Les limites naturelles de la zone d'étude sont matérialisées par des vallées creusées par trois rivières :

- la Bièvres, au Nord, qui s'écoule du NO au SE ;
- l'Yvette, au sud, qui s'écoule d'Ouest en Est ;
- la Mérantaise, affluent en rive gauche de l'Yvette, de même direction que la Bièvre.

Ces vallées creusées induisent un dénivelé de 100m, entre le haut du plateau et le cours d'eau de l'Yvette. La pente générale est faible, de l'ordre de 1%, du sud vers le nord. Le plateau s'étale sur 15 km de longueur (ONO-ESE), et sur 4 à 6,5 km de largeur. Son relief est constitué par deux vallons :

- au nord, dans lequel sont situés les étangs de Saclay, en relation avec la vallée du ru de Vauhallaan ;
- au sud, s'étendant entre le thalweg de Villiers-le-Baclet, à l'Ouest, et celui du Guichet, à l'Est.

2.1.1.2 Contexte géologique

La configuration topographique et la succession des assises géologiques sont le résultat des conditions dans lesquelles les sédiments se sont déposés et des mouvements tectoniques qui les ont affectés.

Les plateaux se caractérisent par un recouvrement continu des limons reposant sur des formations érodées au Tertiaire supérieur (Mio-Pliocène), puis remaniées en place au Quaternaire.

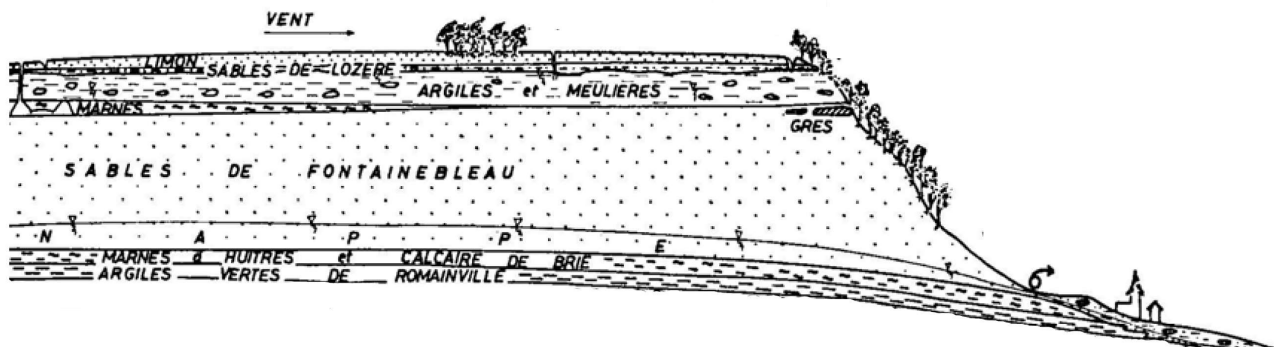


Figure 3 - Coupe lithostratigraphique du plateau (d'après Cojean)

D'après les données géologiques en page suivante, (cartes géologiques n°218 (Rambouillet) et n°219 (Corbeil), données de sondages bibliographiques internes au Cerema IDF et base de données InfoTerre du BRGM)¹, on distingue, des plus anciennes aux plus récentes, les formations géologiques suivantes (les couches inférieures sont décrites succinctement) :

- **Argiles vertes de Romainville**

Age : Oligocène inférieur

Lithologie : Argile verte homogène compacte pouvant renfermer des nodules calcaires blanchâtres.

Origine : Dépôts lagunaires

Épaisseur : 5 à 7 m

- **Calcaire de Brie**

Age : Oligocène inférieur

Lithologie : Il s'agit d'un ensemble marno-calcaire, renfermant des blocs silicifiés.

Origine : Lacustre

Épaisseur : Son épaisseur est irrégulière (2,5 à 8 m) car il peut avoir subi une phase d'érosion.

- **Marnes à Huitres**

Imperméables, elles jouent un rôle hydrologique important comme support de la nappe des sables.

Age : Oligocène inférieur

Lithologie : Marnes argileuses gris-jaune à verdâtre, très fossilifères.

Origine : Dépôts marins littoraux

Épaisseur : De 1 à quelques mètres d'épaisseur

¹Cf Annexe 1 : profils géologiques

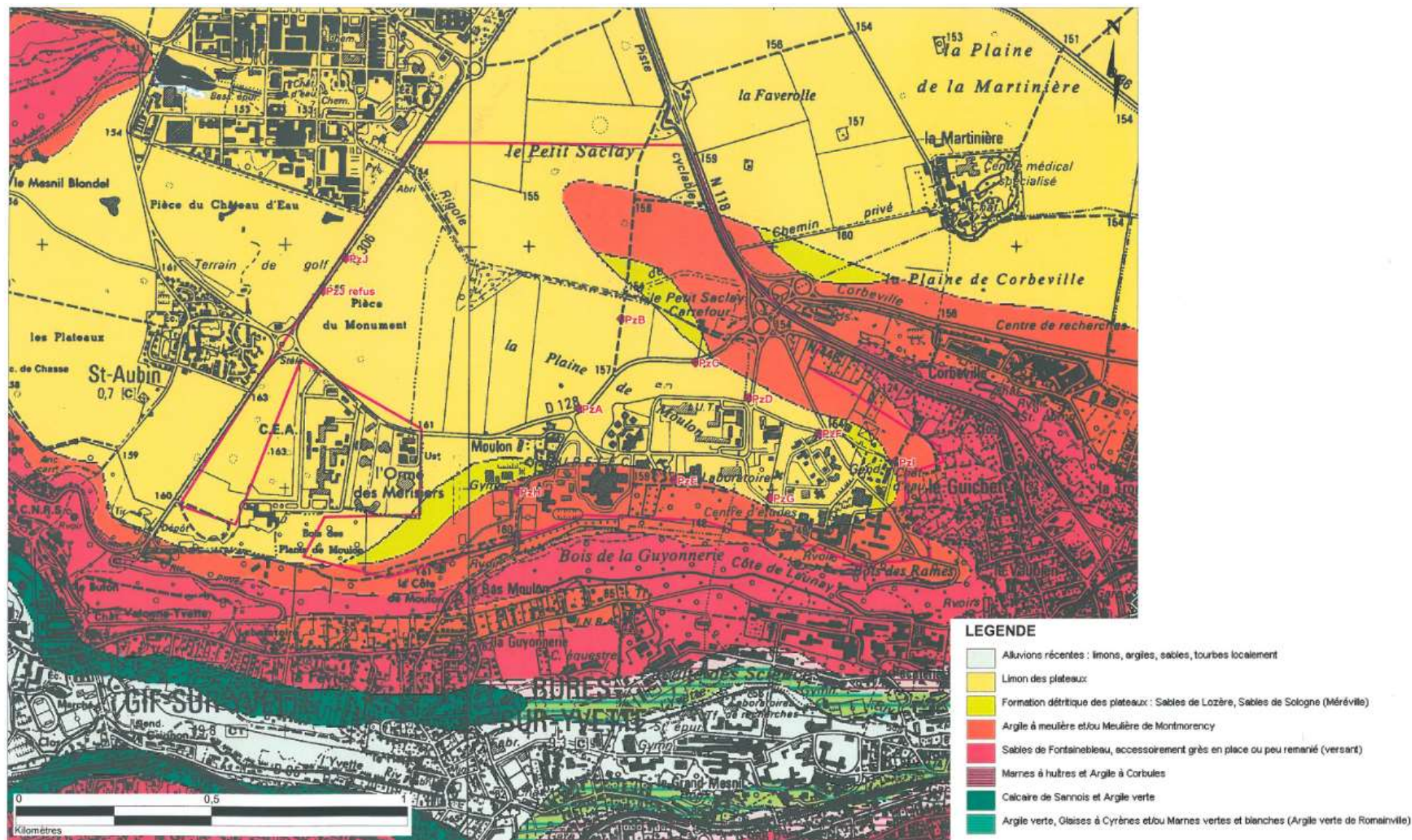


Figure 4 - Carte géologique du plateau de Saclay – source BRGM

- **Sables de Fontainebleau**

Ils constituent le support des formations de Lozère et de Beauce : la régression de la mer stampienne a laissé derrière elle une topographie ondulée par une succession de chenaux et de cuvettes, de dômes et de cordons alignés suivant une direction NO-SE.

Age : Oligocène inférieur (Stampien) (33,9 Ma)

Lithologie : Sable quartzeux, fin et blanc.

Des bancs de grès discontinus sont observés au tiers inférieur de la couche. Ils forment des chaos sur ou au bas des versants lorsqu'ils sont déchaussés par l'érosion fluviale.

La base de cette formation est généralement matérialisée par un niveau d'argile sableuse gris vert à bioclastes plus ou moins dissous.

Origine : Dépôt marins.

Épaisseur : Elle varie entre 30 et 60 m.

- **Argiles à meulières de Beauce ou de Montmorency**

Elles regroupent divers types d'argile, dans lesquels se sont développés des accidents siliceux appelés meulières.

Age : Miocène à Pliocène

Lithologie : Argile plastique, grise ou rougeâtre, ferrugineuse à kaolinite prédominante et à montmorillonite, renfermant des blocs de meulière compacte ou caverneuse. Très souvent contaminée par les Sables de Lozère sus-jacents.

Origine : Résultat de l'altération du Calcaire de Beauce. Ce sont des argiles de décalcification résultant de la dissolution de la fraction carbonatée de la roche mère et au nord, de dépôts continentaux.

Épaisseur : 1 à 6 m

- **Formation de Lozère**

Elle est constituée par un mélange complexe de sables et d'argiles, intimement mêlé aux argiles à meulières d'horizon argilo-sableux.

Age : Mio-Pliocène (Burdigalien) (20-5,3 Ma)

Lithologie : Observé et décrits pour la première fois à Lozère, commune située sur le flanc sud du plateau de Saclay. Ce sont des sables argileux, à quartz et feldspaths, grossiers, souvent mélangés aux argiles sous-jacentes d'où des passages argileux abondants.

Origine : Dépôts d'origine fluviale provenant du Massif central et transporté par la pré-Loire – pré-Seine au cours du Pliocène. On ne les observe que sur la rive gauche de la Seine.

Épaisseur : 2 à 5 m. La variation d'épaisseur du sable de Lozère résultent des conditions particulières de genèse de cette formation. Ce dépôt est un épanchement détritique qui a recouvert la formation des calcaires de Beauce plus ou moins érodée et rempli les dépressions existantes notamment les paléo-chenaux.

- **Limons des plateaux**

Il s'agit d'une formation sédimentaire dont la taille des grains est intermédiaire entre les argiles et les sables.

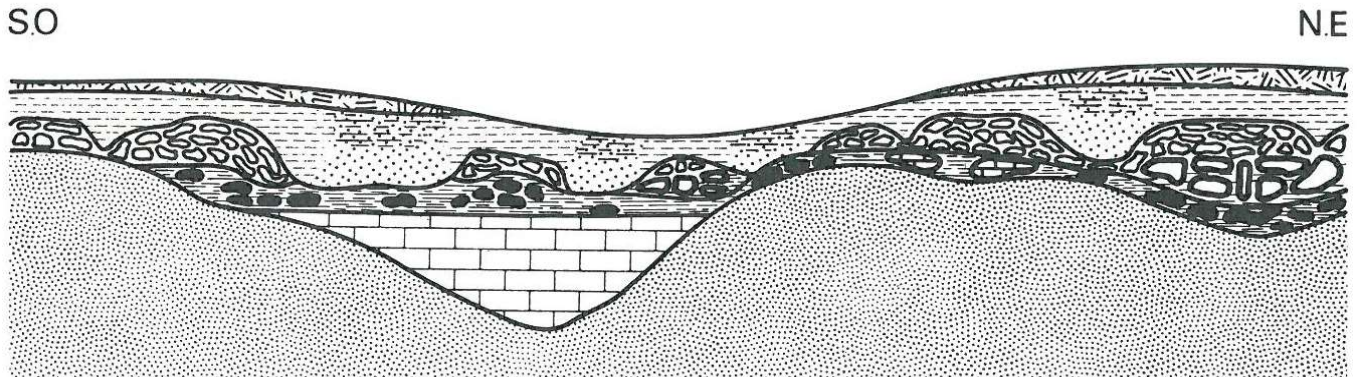
Age : Quaternaire

Lithologie : Dépôts fins, meubles, argileux et sableux. Teinte ocre à brun rougeâtre. Peuvent renfermer de nombreux débris de meulière mélangés à des

résidus des Sables de Lozère.

Origine : Dépôts d'origine éoliennes de nature périglaciaire (loess). Ils coiffent le sommet des plateaux.

Épaisseur : 0,5 à 3m. Peut atteindre très localement 9 m. Ces grandes variations d'épaisseur s'expliquent par le fait que ces dépôts éoliens sont venus comblés la paléotopographie très irrégulière du toit des formations sous-jacentes.



LEGENDE

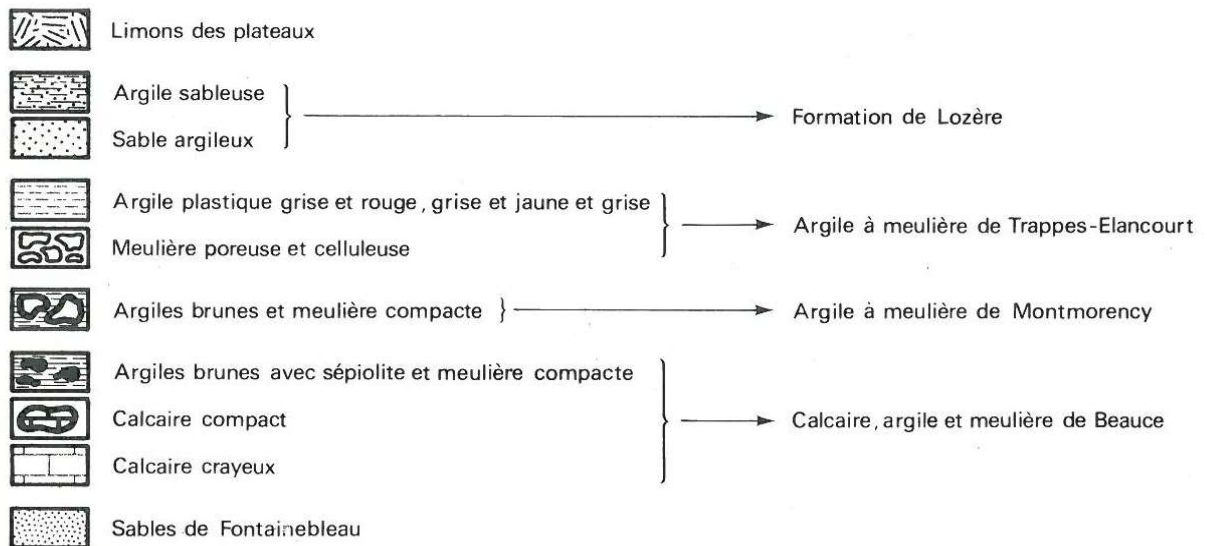


Figure 5 - Coupe lithologique schématique du complexe Formation de Lozère – Argiles à meulières (d'après Grisoni)

2.1.2 Bancarisation de données et démarche de modélisation

2.1.2.1 Données bibliographique et capitalisation des reconnaissances

La définition des contextes géologiques et hydrogéologiques s'est appuyée sur les cartes géologiques au 1/50000 du BRGM et leurs notices (feuilles de Rambouillet – n°218 – et de Corbeil – n°219), un rapport détaillé du BRGM (Vernoux J.F. et, 1999), la synthèse réalisée par R. Cojean dans son mémoire de thèse (Cojean, R., 1975) ainsi qu'un rapport de recherche du LPC (Grisoni, J.C., 1970).

Le Cerema s'est attaché à recenser de façon aussi exhaustive que possible les données géologiques et hydrogéologiques disponibles sur la ZAC du Moulon et dans les environs, afin de constituer une base de données des sondages englobant la zone d'étude.

Les données bibliographiques proviennent principalement de 5 sources :

- Cerema (sondages réalisés dans le cadre de conventions et études géotechniques plus anciennes réalisées par le Laboratoire Régional de l'Ouest Parisien),
- EPAPS : cela regroupe les études géotechniques commandées par l'EPAPS ainsi que les études transmises par différents MOA (Université Paris Sud, Ecole Centrale Paris, ENS Paris Saclay, Société du Grand Paris, STIF, Société Eiffel, Laboratoires Servier, ...)
- CEA : il s'agit principalement d'informations relatives aux piézomètres crépinés dans les Sables de Fontainebleau du réseau de suivi du CEA Saclay ainsi que d'études géotechniques réalisées pour la construction du Synchrotron sur le site de l'Orme des Merisiers.
- BRGM (données de sondage provenant de la Banque de Données du Sous-sol, BSS)
- CD91 (sondages situés au Nord de la zone d'étude, réalisés dans le cadre de la requalification de la RD36)

L'ensemble des sondages pour lesquels des coordonnées X, Y, Z étaient fournies dans les rapports d'étude ou pouvaient être estimées sur les plans d'implantation ont été renseignées dans une base de données (tableur format .xls). Les informations saisies dans la base de données comprennent le nom du sondage, ses coordonnées (X, Y en Lambert 93 et Z en m NGF), le type et la profondeur du sondage ainsi que la profondeur des interfaces entre les différentes couches. Il a finalement été possible d'intégrer 518 sondages, dont 409 proviennent de l'EPAPS, 58 du Cerema, 30 du CEA, 11 de la BSS et 10 du CD91 (Figure 5). Ils se répartissent en 86 sondages carottés, 208 sondages à la tarière, 175 sondages pressiométriques et 32 sondages destructifs, ainsi que quelques sondages pour lesquels le type de sondage n'était pas précisé.

On notera que la profondeur et la précision des sondages sont très variables. Les profondeurs varient entre 1,8 m et 93 m. De nombreux sondages courts ont en effet été réalisés à la tarière dans le cadre des études de voirie. La précision varie quant à elle en fonction du type de sondage, de la méthode utilisée pour le nivellement ainsi que du prestataire. L'interprétation d'un sondage diffère par exemple selon qu'elle soit réalisée par un géologue ou un géotechnicien, et selon leur connaissance de la géologie régionale. Dans la majorité des sondages, il n'est notamment pas possible de distinguer les formations de Lozère des Argiles à Meulière. Le contact entre les Limons des Plateaux et les formations sous-jacentes peut également être sujet à interprétation. Dans certains rapports d'études géotechniques les Limons des Plateaux et les Sables de Lozère sont parfois regroupés sous la mention « LP/SL indifférenciés ». La comparaison de sondages carottés et de sondages pressiométriques suggère par ailleurs qu'une interprétation basée sur l'analyse des paramètres mécaniques (sondage pressiométrique) tend à surestimer l'épaisseur des Limons des Plateaux par rapport à une interprétation basée sur une observation de la lithologie (sondage carotté).

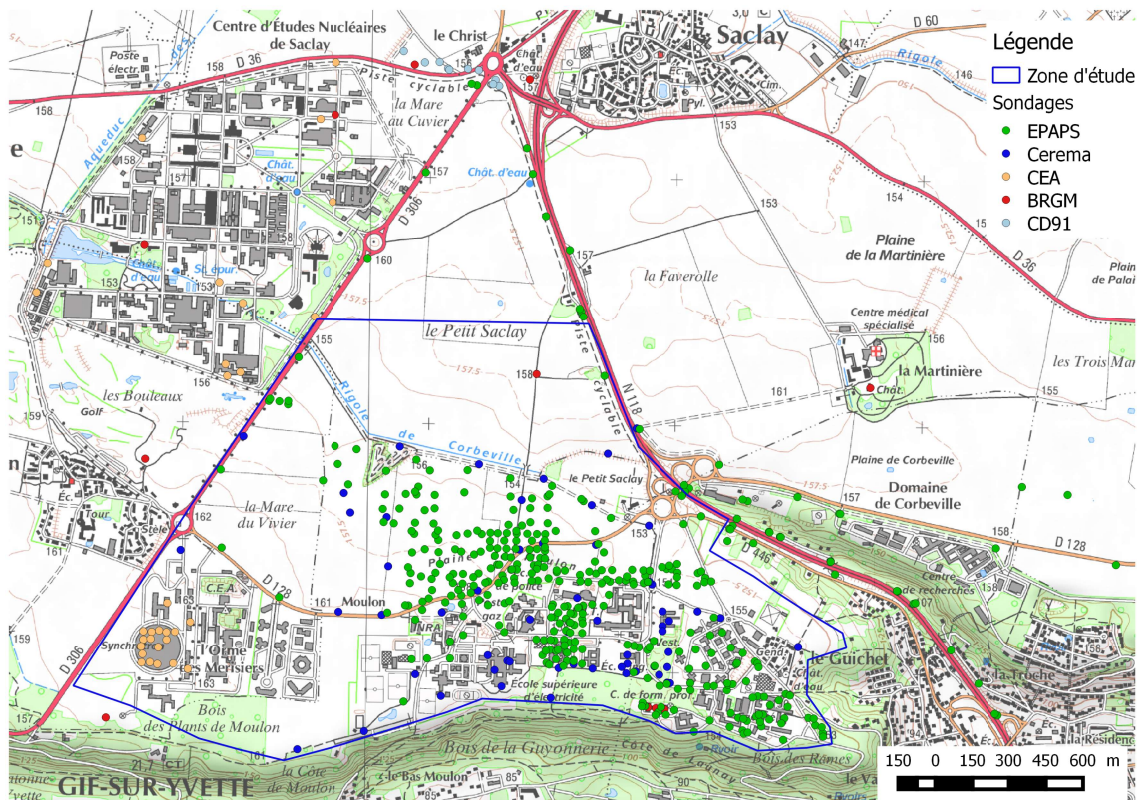


Figure 6 : Localisation des sondages en fonction de la source des données

2.1.2.2 Étapes de la modélisation

L'élaboration du modèle géologique a consisté à sélectionner les interfaces les plus pertinentes à modéliser, consolider les données d'entrée puis réaliser les interpolations par krigeage.

a . Sélection des interfaces à interpoler

Au regard du contexte géologique décrit dans le paragraphe 2.1.1.2, les formations intéressant la nappe superficielle sont les Limons des Plateaux, les Formations de Lozère et l'Argile à Meulière de Beauce.

L'analyse des sondages réalisés par le Cerema a montré que l'argile à meulière présente en partie supérieure un faciès ouvert, riche en blocs de meulière, dont le comportement hydrodynamique est proche des sables de Lozère. En conséquence, il a été envisagé dans un premier temps de regrouper, pour les interpolations, les formations superficielles en trois entités : i) les Limons des Plateaux, ii) une couche « aquifère » regroupant les Formations de Lozère et les Argiles à Meulière à blocs, iii) l'Argile à Meulière compacte plastique, constituant le substratum de la couche aquifère.

L'analyse des données de sondages a cependant montré que la distinction entre Formations de Lozère, Argile à Meulière « à bloc » et Argile à Meulière « compacte » ne pouvait être faite que dans un nombre restreint de sondages et restait très dépendante de l'appréciation du sondeur ou du géologue ayant établi la coupe de sondage. Il a donc finalement été décidé de ne réaliser les interpolations que de deux interfaces : la base des Limons des Plateaux et le toit des Sables de Fontainebleau.

b . Consolidation des données d'entrée

En raison de la grande disparité des données, il a été nécessaire de les critiquer afin d'écartier certains sondages entachés d'erreur ou d'incertitude.

Cette phase de consolidation des données a consisté à :

- détecter les sondages pour lesquels les cotes des interfaces entre les couches semblaient anormaux ou différaient fortement de celles mesurées dans les sondages voisins,
- examiner ces sondages pour lesquels des anomalies de limite stratigraphique ont été détectées, afin de déterminer si ces sondages doivent être conservés en l'état, faire l'objet d'une correction ou être écartés.

L'identification des sondages présentant des anomalies a été réalisée dans un premier temps à l'aide du logiciel de géostatistique GDM2014 du BRGM, qui offre la possibilité d'effectuer une validation croisée. Cette technique consiste à enlever une donnée et à re-estimer sa valeur en utilisant les données voisines. En répétant cette opération pour tous les points de donnée on peut évaluer l'erreur de ré-estimation (moyenne, écart-type, minimum et maximum) et comparer les performances de différentes méthodes d'estimation. Cela permet également de repérer les anomalies ou les singularités des jeux de données, comme le montre la Figure 7. Sur cette figure, les sondages sont représentés avec une croix de taille proportionnelle à l'erreur de ré-estimation, la couleur bleue correspondant aux points dont la valeur ré-estimée est plus faible que la valeur réelle, et les points rouges signalant l'inverse. La recherche de sondages anormaux s'est ensuite poursuivie en examinant le résultat des premières interpolations.

Les sondages pour lesquels des anomalies ont été détectées ont fait l'objet de vérifications portant sur le nivellement du sondage et les informations contenues dans la coupe de sondage. La cohérence entre la cote de la tête de l'ouvrage renseignée et le modèle numérique de terrain fourni par l'EPAPS (mailles de 10 m) a dans un premier temps été vérifiée. Dans la mesure où les travaux réalisés sur la ZAC occasionnent d'importants mouvements de terre et un remodelage de la topographie, les sondages pour lesquels des incohérences entre la cote de la tête du sondage et le MNT avaient été relevées ont majoritairement été écartées. Pour quelques sondages isolés où les données manquaient, et où il n'y pas de travaux en cours, la cote de la tête du sondage a été modifiée. Dans un deuxième temps, le découpage stratigraphique fourni dans les coupes de sondage a été examiné en se basant sur la description lithologique pour les sondages carottés et les sondages à la tarière ou sur les paramètres de forages et les résultats des essais pressiométriques pour les sondages pressiométriques.

Contrairement à ce que l'on pourrait supposer, les sondages carottés n'ont pas systématiquement fourni une information plus fiable que les sondages pressiométriques pour déterminer la cote du toit des Sables de Fontainebleau, car le pourcentage de récupération peut être assez faible dans la zone de transition (problème de lessivage des sables sous l'injection du fluide de forage).

A l'issue de cette phase de consolidation des données, 297 sondages ont été retenus pour l'interpolation du mur des Limons des Plateaux et 181 pour l'interpolation du toit des Sables de Fontainebleau. On notera que, pour de nombreux sondages, la cote du mur des Limons des Plateaux n'a pu être déterminée précisément. Il n'était cependant pas

toujours possible d'écarter ces sondages, faute de donnée plus précise à proximité.

Il a été envisagé d'utiliser la carte géologique pour forcer l'interpolation dans les zones d'affleurement des Sables de Fontainebleau, mais cela conduisait plutôt à dégrader la qualité de l'interpolation.

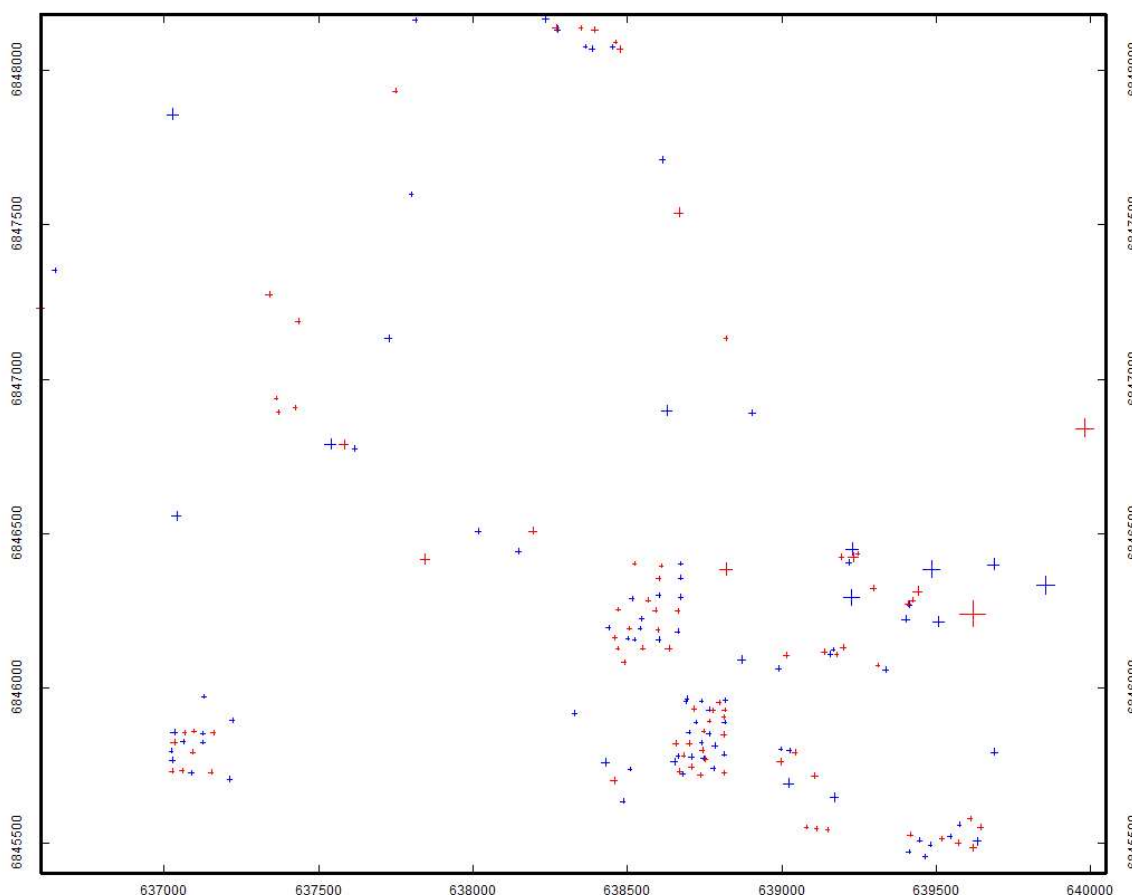


Figure 7: Validation croisée du toit des Sables de Fontainebleau (variogramme linéaire)

c . Interpolations réalisées par krigeage

Le krigeage est une méthode géostatistique d'interpolation linéaire qui permet d'obtenir une estimation non biaisée et dont l'erreur d'estimation est minimale. Le krigeage se base sur l'étude et la modélisation du variogramme, qui permet d'analyser et de quantifier les corrélations d'un phénomène en fonction de l'inter-distance entre deux points, ainsi que la continuité spatiale de ce phénomène.

Le logiciel de géostatistique GDM2014 du BRGM a été utilisé pour réaliser les interpolations par krigeage.

Une première interpolation du toit des Sables de Fontainebleau a été réalisée par krigeage avec variogramme linéaire sans dérive en utilisant l'ensemble des sondages situés dans la ZAC du Moulon et aux alentours. L'objectif de cette première interpolation était d'identifier la structure des assises géologiques sur un périmètre élargi.

Des interpolations du toit des Sables de Fontainebleau et du mur des Limons des Plateaux ont ensuite été menées sur une zone plus restreinte centrée sur la ZAC du Moulon, en utilisant cette fois des modèles de variogramme.

2.2 Avancées 2015-2017

2.2.1 Campagne de reconnaissance du Cerema

Les sondages ont permis d'affiner la succession géologique identifiée dans les données bibliographiques. On observe de haut en bas, les formations superficielles meubles qui couronnent le plateau :

- Argiles à Meulières de Beauce composés d'un faciès supérieur argileux, peu compact renfermant de nombreux blocs et graviers de meulière, que nous avons dénommé « faciès à blocs » (épaisseur moyenne de l'ordre de 3m), et d'un faciès inférieur composé d'une argile plastique compacte, dénommée « faciès argileux compact » (épaisseur moyenne supérieure à 2,8).

Sur aucun des différents sondages réalisés, pas plus que sur les sondages d'archive, il n'a été identifié de calcaire susceptible de correspondre aux reliquats de l'horizon de Beauce.

- Formation de Lozère, constituée de sables grossiers et présente à certains endroits sous forme de poches pouvant atteindre 4,0 m d'épaisseur.
- Limons des plateaux, légèrement argileux, d'une épaisseur moyenne de 1,2 m. On note des sur-épaisseurs localisées à l'approche de la rigole de Corbeville (>2,5m).

Le substratum géologique sous-jacent est composé :

- des Sables de Fontainebleau, caractérisés par de sables très fins de granulométrie serrée.

Les descriptions des coupes de sondages ont parfois eu du mal à individualiser précisément la transition entre les limons des plateaux et la formation de Lozère. En effet, la base des limons s'enrichit d'un cailloutis de matériaux granitiques qu'on pourrait attribuer à la formation de Lozère.

De même l'identification d'une transition nette et continue entre la formation de Lozère et les Argiles à Meulières s'est avérée particulièrement difficile. La formation de Lozère renferme localement des éléments siliceux assimilables à de la meulière, de plus des niveaux détritiques contenant des grains de quartz sont rencontrés dans les argiles franches, semblant indiquer que la formation de Lozère est imbriquée au sein de l'Argile à Meulière.

Selon les données bibliographiques, cet aspect enchevêtré s'expliquerait par les conditions de dépôt et les phénomènes de pédogénèse de milieu continental qui ont affecté ces formations. Après les dépôts en milieu lacustre, les calcaires de Beauce ont été émergés et ont subis des phases de dissolution précoces (Miocène inférieure). Différents apports fluvio-lacustres sont venus raviner les argiles de décalcification, avant même la mise en place de la formation de Lozère. Au Burdigalien (Miocène supérieur), l'épandage sablo-graveleux en provenance du massif central a été mis en place par un puissant système fluvial qui sans doute profondément remanié les assises en place.

Le tableau ci-dessous récapitule les épaisseurs des formations rencontrées lors des sondages et donne des épaisseurs moyennes. Les coupes de sondages et les mesures de diagraphies naturelles sont fournies en annexe 3 et 4 respectivement.

Épaisseurs des formations rencontrées (en m)	PzA	PzB	PzC	PzD	PzE	PzF	PzG	PzH	PzI	PzL	PzJ	PzK	Épaisseur moyenne (en m)
Limons des Plateaux	1,4	1	0,6	1,2	1	1,7	0,5	1,6	0,3	1,2	1,3	2,5	1,2
Formation de Lozère	4,8	1,7	1,4	0,4	1,7	0,3	1,9	0	0	1,7	1,6	0	1,3
AM de Beauce (en blocs)	2,4	4,8	>5,65	>3,8	2,3	5,8	1,5	1,3	0	1,8	3,6	5	>3,2
AM de Beauce (compacte)	>1,6	>1,2			>1,9		4,4		7	2,5	>1,2		>2,8

Tableau 1 - Synthèse des épaisseurs des formations géologiques rencontrés dans les piézomètres réalisés par le Cerema (AM : Argiles à Meulières)

2.2.2 Apports des mesures de radioactivité naturelle (RAN)

2.2.2.1 Principe de la mesure, log de référence

Un corps est dit radioactif lorsqu'il émet un rayonnement particulaire (α ou β) ou électromagnétique (γ). Ces derniers correspondent à des ondes électromagnétiques de forte énergie et de pouvoir de pénétration élevé.

Dans les formations géologiques, trois isotopes radioactifs jouent un rôle déterminant dans la radioactivité naturelle des roches : l'uranium, le thorium et le potassium.

Leurs isotopes radioactifs se fixent préférentiellement sur les sédiments fins et confèrent ainsi une radioactivité naturelle décroissante aux argiles, carbonates, dolomies, sables jusqu'à des valeurs de radioactivité très faible pour les évaporites (cf. Figure 8).

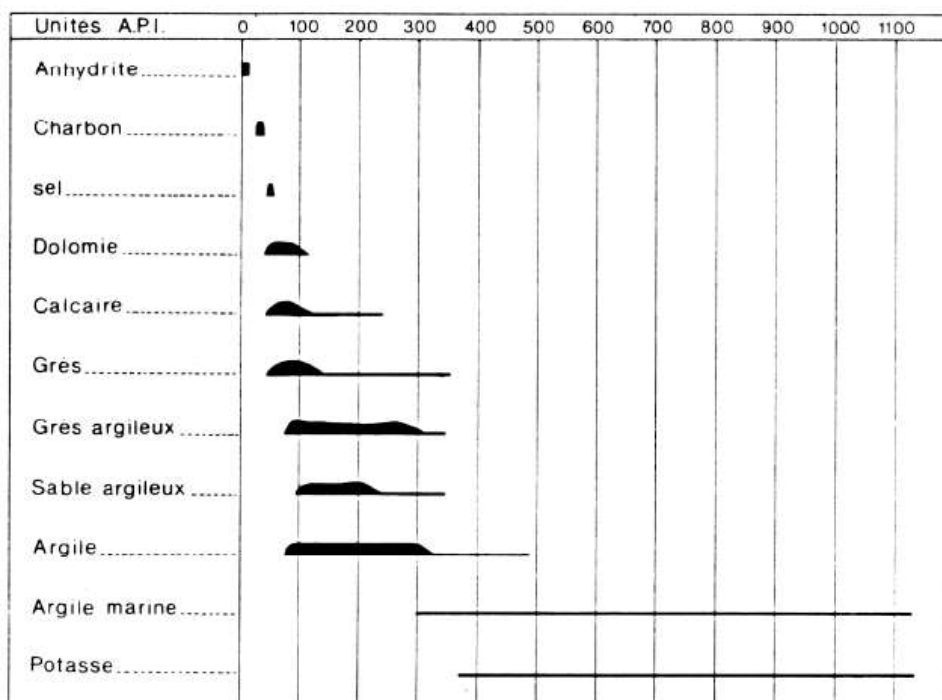


Figure 8 - Radioactivité des principales roches sédimentaires exprimée en A.P.I.

(d'après S. J. Pirson)

La diagraphie de Radioactivité Naturelle (RAN) consiste à enregistrer, en continu, dans un forage le rayonnement gamma émis par les éléments radioactifs contenus dans les différents sols et roches traversés par ce sondage. Les variations du rayonnement enregistré étant directement liées à la nature lithologique des sols traversés, cette mesure va permettre d'appréhender la succession des formations géologiques en place (cf. Figure 9).

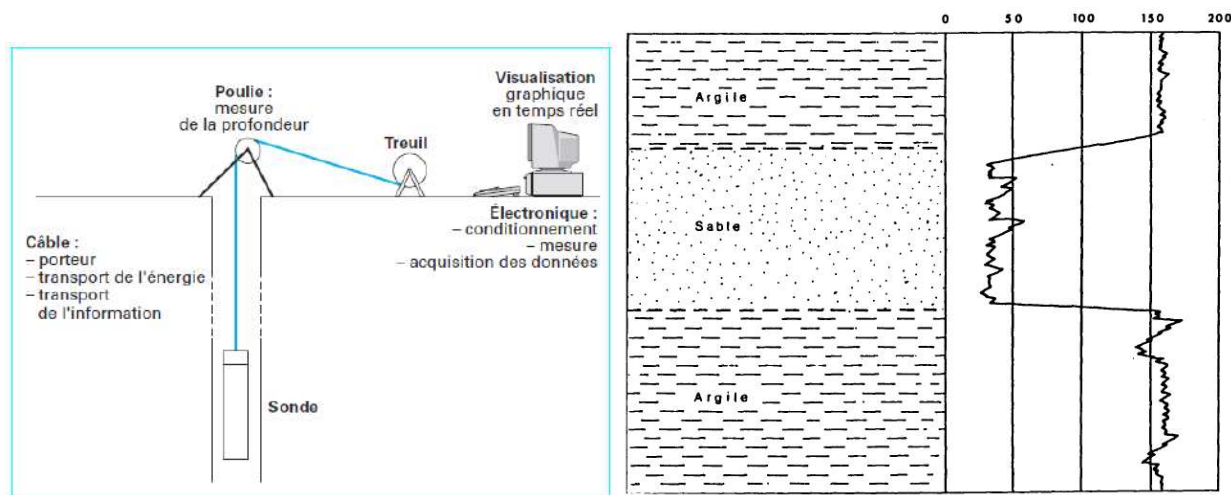


Figure 9 - Principe de la diagraphie RAN et aspect d'un log de mesure (unité A.P.I.)

L'appareil en service au Cerema d'île-de-France utilise un capteur à scintillation qui convertit le rayonnement gamma en photoélectron puis en impulsion électrique. La géométrie du dispositif d'acquisition permet d'investiguer environ 30cm de terrain à partir de la bordure de la paroi du forage. Le comptage réalisé est exprimé en nombre de rayonnement gamma enregistré par seconde (cps).

Le nombre de rayons gamma émis sur une courte période de temps étant très variable, la mesure est réalisée pendant une certaine durée (quelques secondes) sur laquelle on fait une moyenne des événements mesurés. Des variations de mesures sont également induites par la vitesse de translation de la sonde dans le forage et les caractéristiques propres de la sonde (géométrie du cristal et type de l'électronique).

De fait, la valeur absolue de la mesure est susceptible de fluctuer, mais les contrastes entre deux formations géologiques distinctes (présentant des lithologies homogènes) sont constants.

En 2016, l'apport potentiel des mesures de radioactivité a été examiné. La démarche a consisté à caler les comptages (cps) dans un sondage carotté afin d'associer les comptages à des lithologies de référence observées sur échantillons.

Sur la base de cet étalonnage, il a été considéré que chaque formation pouvait être individualisée sur la base du niveau de comptage et de la variabilité du comptage RAN (cf. Figure 10) :

- dans les limons des Plateaux (L), les comptages sont assez élevés (supérieurs à 90cps avec une dispersion assez importante) ;
- dans les Sables de Fontainebleau (SBF), les comptages sont faibles et assez homogènes (peu de dispersion) de l'ordre de 25 cps ;

Les coupes des sondages réalisés et les mesures de radioactivité naturelle associées

sont reportées en annexe I.

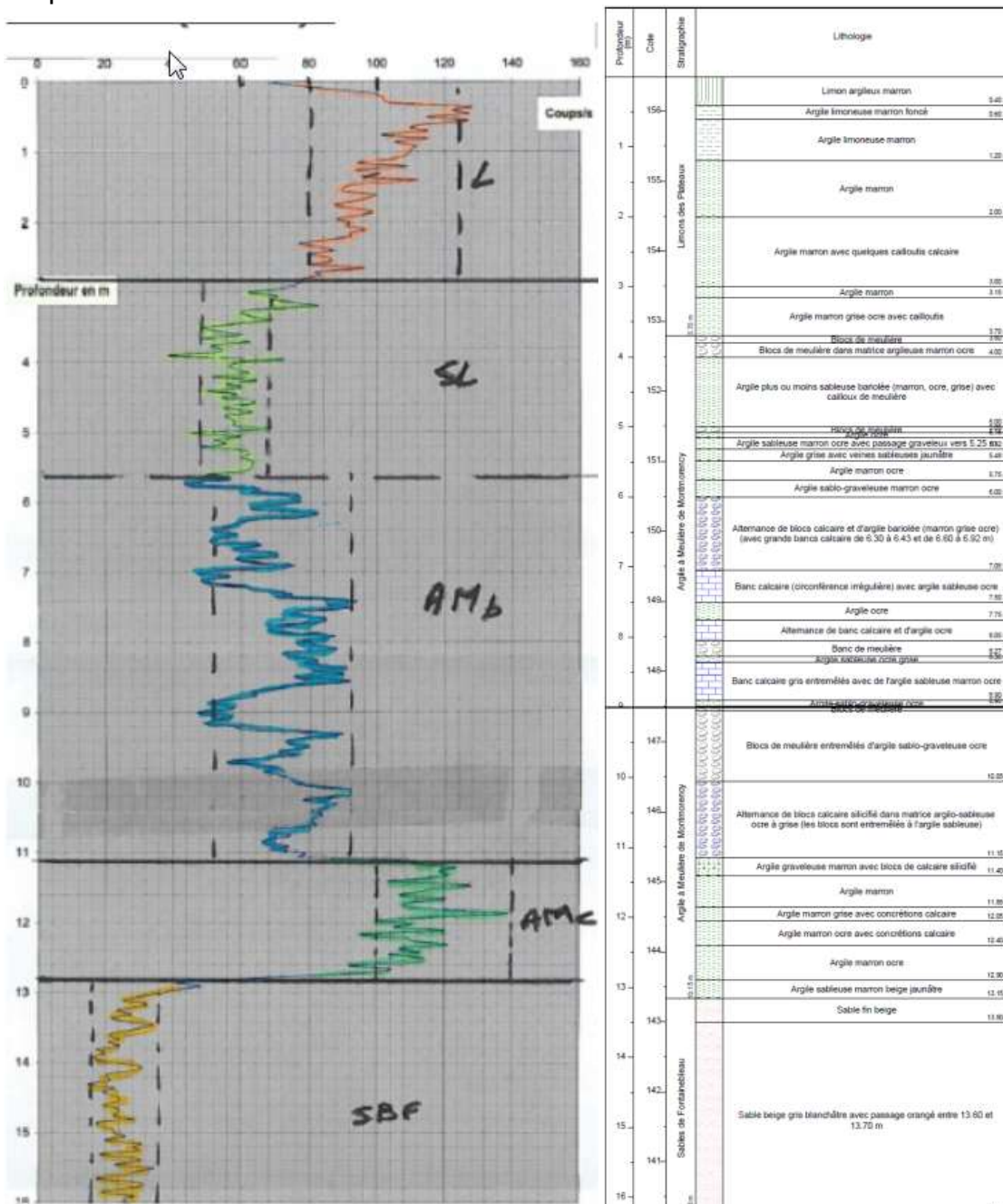


Figure 10 - Mesure RAN dans le sondage carotté C12 de l'étude de l'ENS (unité cps) et log lithologie observé

- dans l'ensemble des Sables de Lozère (SL) et des Argiles à Meulières de Montmorency, les mesures montraient une différenciation entre un niveau de comptage moyen peu dispersé associé aux Sables de Lozère (environ 60 cps), un niveau de comptage moyen (60 cps) avec une forte dispersion dans les Argiles à Meulières avec blocs (AMB) et un niveau de comptage élevé (110 cps) à faible dispersion correspondant à un niveau d'argile franche (AMC) à la base de la couche.

2.2.2.2 Profils, variabilité lithologique

Au regard des résultats obtenus sur le sondage de référence, il a été décidé de pratiquer de manière plus régulière des mesures de radioactivité dans les investigations réalisées par le Cerema et dans les sondages profonds (atteignant les sables de Fontainebleau) encore accessibles sur la zone d'étude ou à proximité.

Au global, 21 sondages (9 issus de la campagne du Cerema et 12 dans d'anciens sondages du CEA équipés en piézomètre) ont fait l'objet de mesures de radioactivité naturelle.

Ces mesures ont permis de retrouver les marqueurs des interfaces géologiques identifiés sur le sondage test et notamment le contact entre les Sables de Fontainebleau et l'Argile à Meulières. Les faibles comptages enregistrés dans les sables se distinguent aisément de ceux plus forts observés dans l'Argile à Meulières. Cependant, la masse argileuse franche et compacte constatée à la base de l'horizon de l'Argile à Meulière, au droit du sondage de calage n'est pas systématiquement retrouvée. Le profil en long schématisé établi d'ouest en est (cf. Figure 11) montre ainsi des comptages plus faibles au droit du sondage F49.

Cette baisse localisée d'argilosité pourrait avoir des implications sur le fonctionnement hydrogéologique de la nappe perchée et constituer un point privilégié d'infiltration des eaux de surface vers la nappe des sables plus profonde.

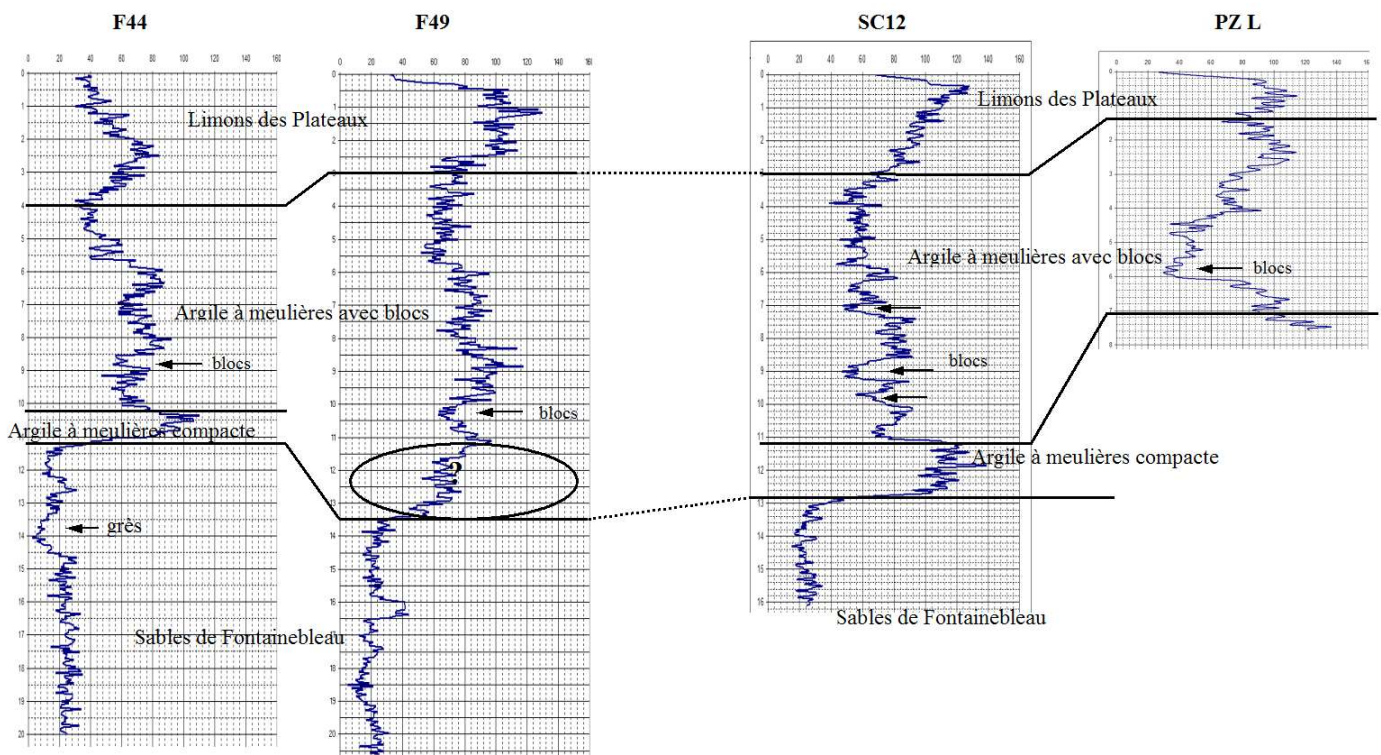


Figure 11 - Profil ouest-est établi à partir des mesures RAN

Contrairement à l'interprétation réalisée sur le sondage de référence, les logs RAN obtenus n'ont pas permis de retrouver de façon systématique une distinction nette entre l'Argile à Meulières et la formation de Lozère. Si des baisses significatives de comptages ont été observées dans les argiles aux niveaux où les descriptions géologiques indiquent des blocs (cf. Figure 12), la formation de Lozère, lorsqu'elle est évoquée dans les descriptions géologiques, n'est pas toujours associée à des comptages moyens (60 cps) peu dispersés. On notera que les baisses de comptage au droit des zones renfermant des blocs sont clairement identifiables et pourraient utilement être exploitées pour déterminer le pourcentage de masse rocheuse et ainsi anticiper d'éventuelles difficultés de terrassement.

Cette difficulté d'interprétation des mesures RAN est sans doute le reflet des conditions de mise en place de ces deux formations. Comme indiqué précédemment, les sables de Lozère se sont déposés sur des assises ayant subi de profonds remaniements liés à

l'émersion. Les dépôts fluviatiles de Lozère sont venus surcreuser localement l'Argile à Meulières occasionnant un enchevêtrement prononcé des deux horizons.

Enfin s'agissant de l'identification des Limons des plateaux, les mesures RAN ne permettent pas toujours de déterminer la base de l'horizon (jonction avec l'ensemble Argile à Meulières et formation de Lozère). En revanche, nous avons constaté de façon très fréquente, une décroissance notable des comptages au sein de cet horizon.

Sous un pic de comptage supérieur, traduisant la présence de matière organique, les comptages assez élevés décroissent sensiblement (de 100cps à 70cps) (cf. Figure 12).

Des mesures de l'activité des argiles ont été menées en laboratoire à différentes profondeurs au sein des Limons et ont confirmé une diminution de l'argilosité avec la profondeur (mesures de valeur au bleu à 1,25m et 2,75m indiquant respectivement des absorptions de bleu de 2,8 et 4,1 g/100g).

Cette mesure mériterait d'être reproduite pour confirmer sa représentativité, cependant elle est cohérente avec le modèle de stratification des limons sous l'effet des circulations superficielles : décalcification de la frange supérieure des limons (lehm) sous l'effet des précipitations qui de ce fait présente une argilosité plus marquée que les niveaux inférieurs (loess).

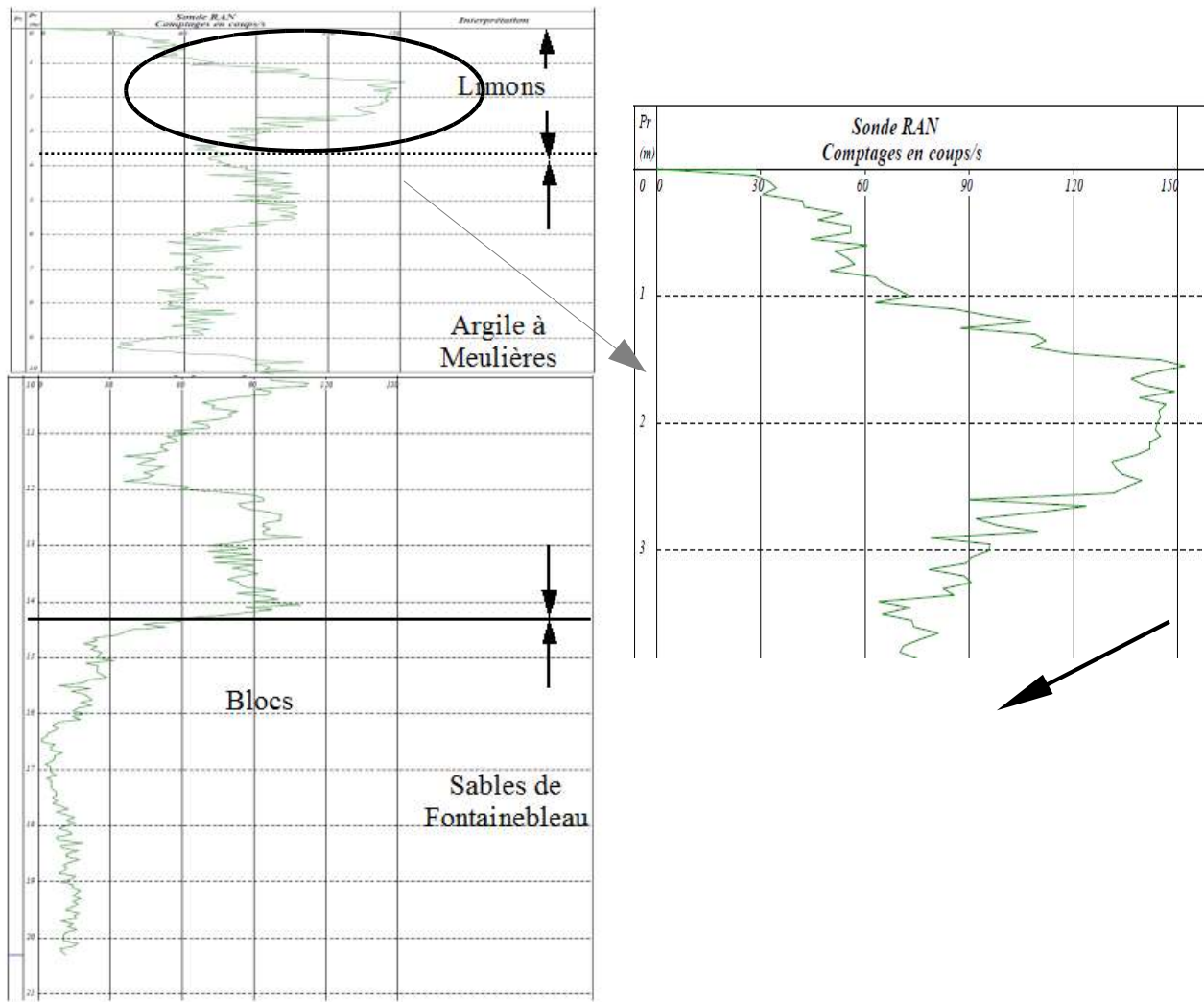


Figure 12 - Aspect du log RAN au droit du forage F41. Comptage dans l'Argile à Meulière et zoom sur la baisse de comptage avec la profondeur dans les Limons

2.2.3 Résultat des travaux d'interpolation

2.2.3.1 Interpolation du toit des Sables de Fontainebleau

L'interpolation du toit des Sables de Fontainebleau sur un périmètre élargi s'est appuyée

sur les données des 181 sondages validés, répartis de façon très hétérogène. De nombreux sondages se concentrent sur la partie Sud-Est de la ZAC du Moulon, où se trouvent l'Université Paris Saclay et les Grandes Ecoles (Supelec, ENS Paris Saclay, Ecole Centrale Paris). La couverture en sondages des parties Nord et Est de la ZAC est en revanche assez mauvaise.

Malgré cette répartition très hétérogène des sondages, les résultats de l'interpolation réalisée par krigeage avec variogramme linéaire sans dérive permettent d'identifier très clairement un abaissement du toit des Sables de Fontainebleau dans le prolongement du thalweg de Corbeville (Figure 13).

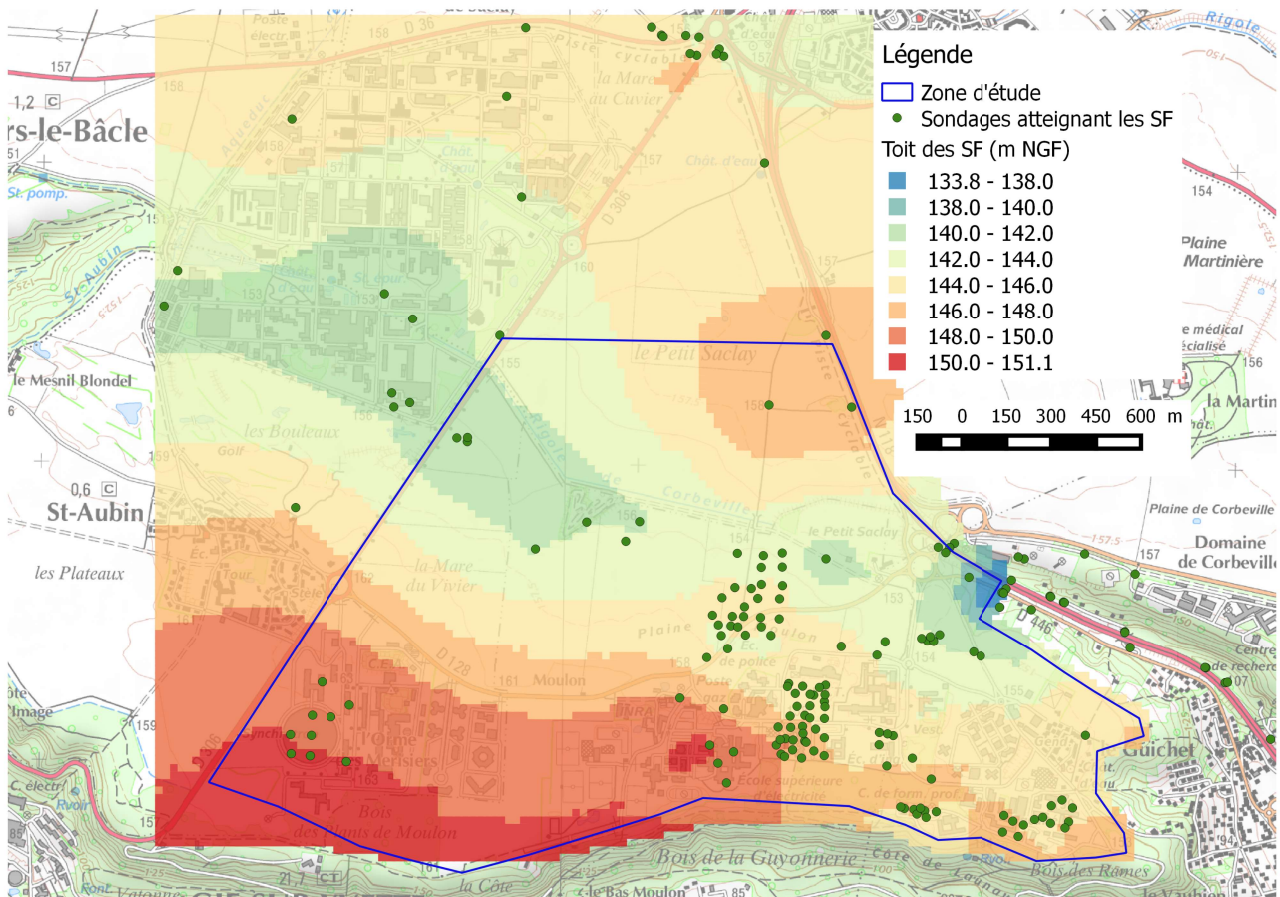


Figure 13: Interpolation du toit des Sables de Fontainebleau (variogramme linéaire)

Une deuxième interpolation a ensuite été réalisée en n'utilisant que les sondages situés au sud de la Rigole de Corbeville. Le variogramme obtenu a été ajusté par un modèle puissance isotrope (Figure 14). Les interpolations menées avec un modèle de variogramme anisotrope ont en effet été peu concluantes. L'ajustement du variogramme a été effectué prioritairement sur les petites distances.

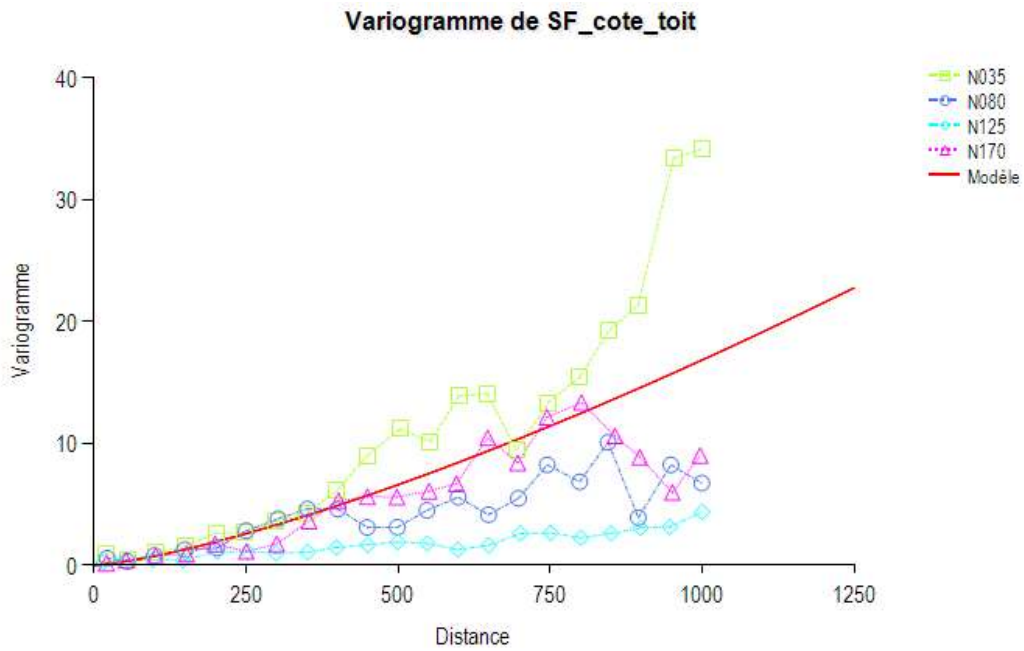


Figure 14: Variogramme du toit des Sables de Fontainebleau (ZAC du Moulon)

Les résultats de l'interpolation du toit des Sables de Fontainebleau sont présentés sur la Figure 15 et la carte des écarts-type d'interpolation est présentée sur la Figure 16. Les écarts-type sont les plus élevés dans les zones où il existe le moins de sondage.

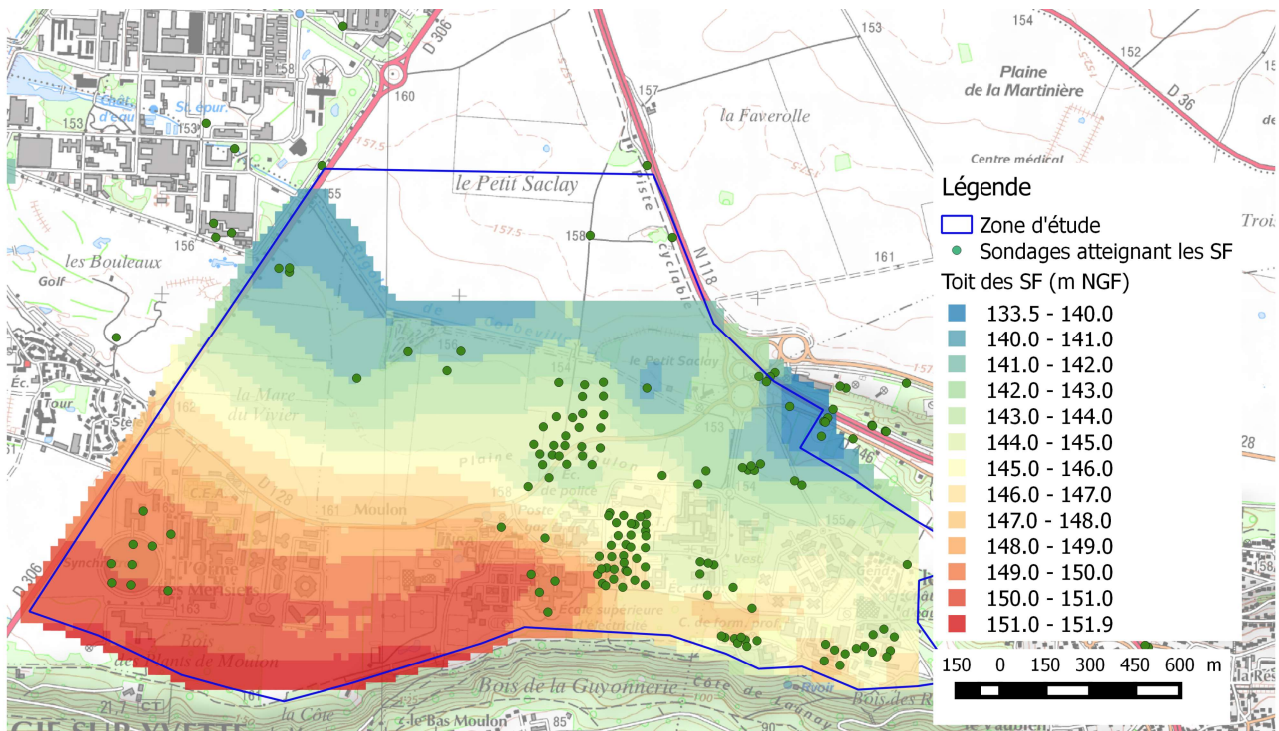


Figure 15: Interpolation du toit des Sables de Fontainebleau (modèle de variogramme)

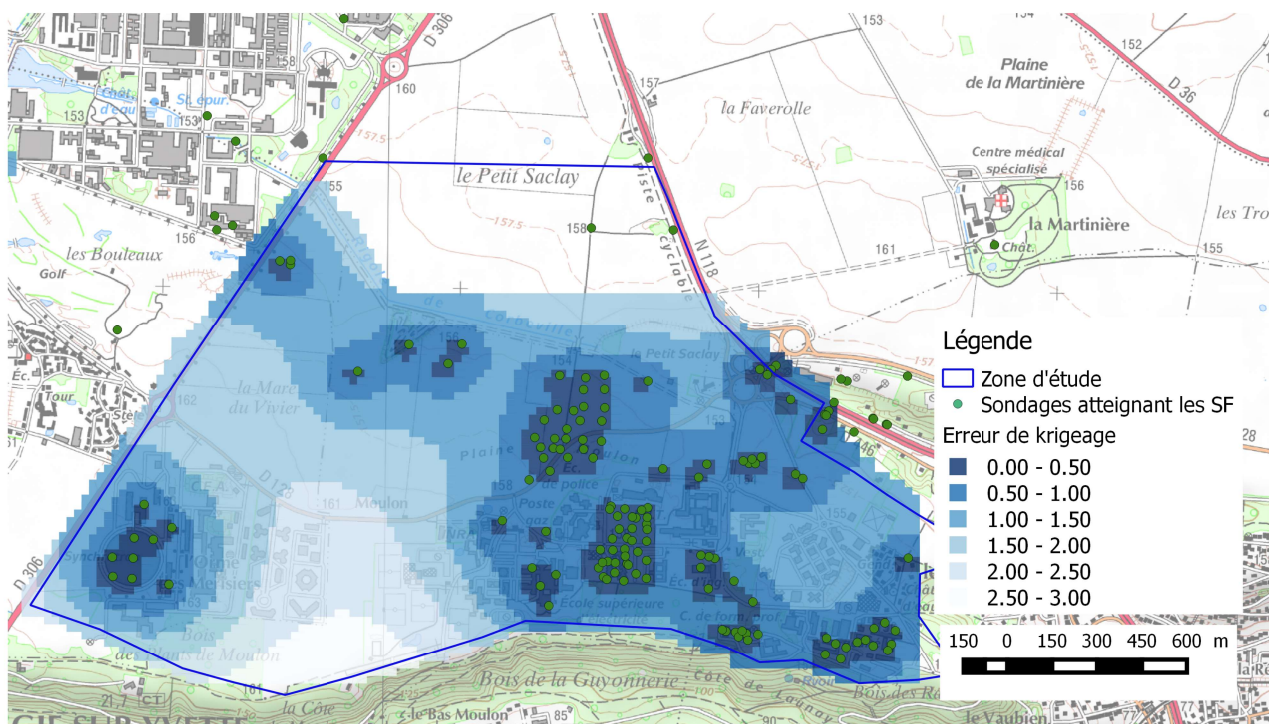


Figure 16: Carte des écarts-type d'interpolation pour le toit des Sables de Fontainebleau

2.2.3.2 Interpolation du mur des Limons des Plateaux

L'interpolation du mur des Limons des Plateaux a été uniquement réalisée en utilisant les sondages validés situés dans et à proximité immédiate de la zone du Moulon, soit 297 sondages. La partie Est de la ZAC est très bien couverte par les sondages, alors que la densité de sondages est beaucoup plus faible dans la partie Ouest. Le variogramme expérimental a pu être ajusté par un modèle puissance anisotrope, en utilisant la direction principale N35 (Figure 17).

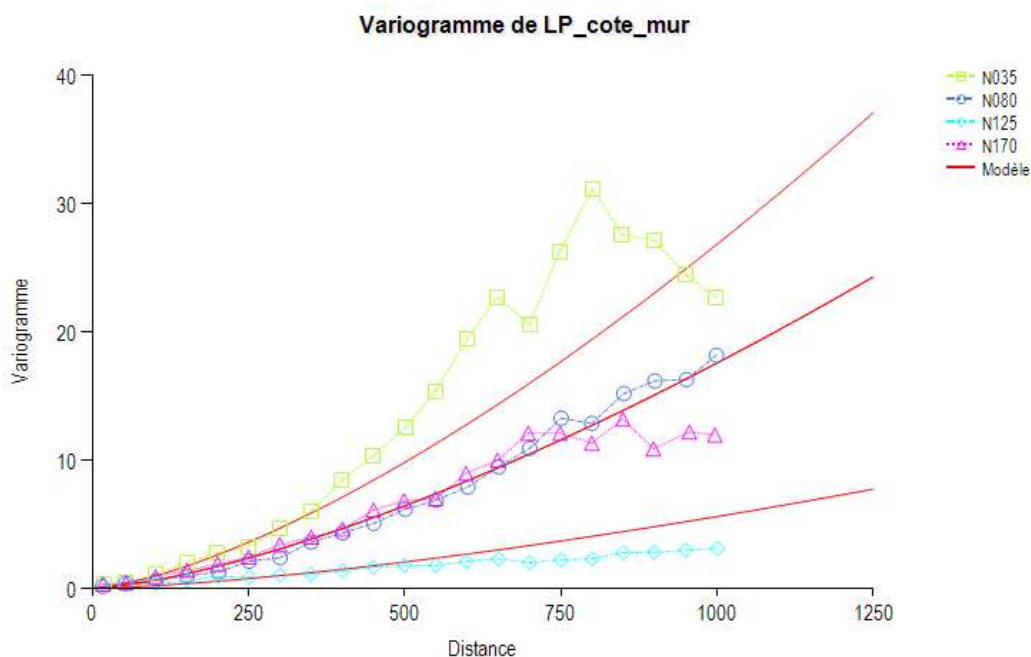


Figure 17: Variogramme du mur des Limons des Plateaux

Les résultats de l'interpolation du mur des Limons sont présentés sur la Figure 18 et la carte des écarts-type d'interpolation est présentée sur la Figure 19. Les écarts-type sont les plus élevés dans les zones où il existe le moins de sondages.

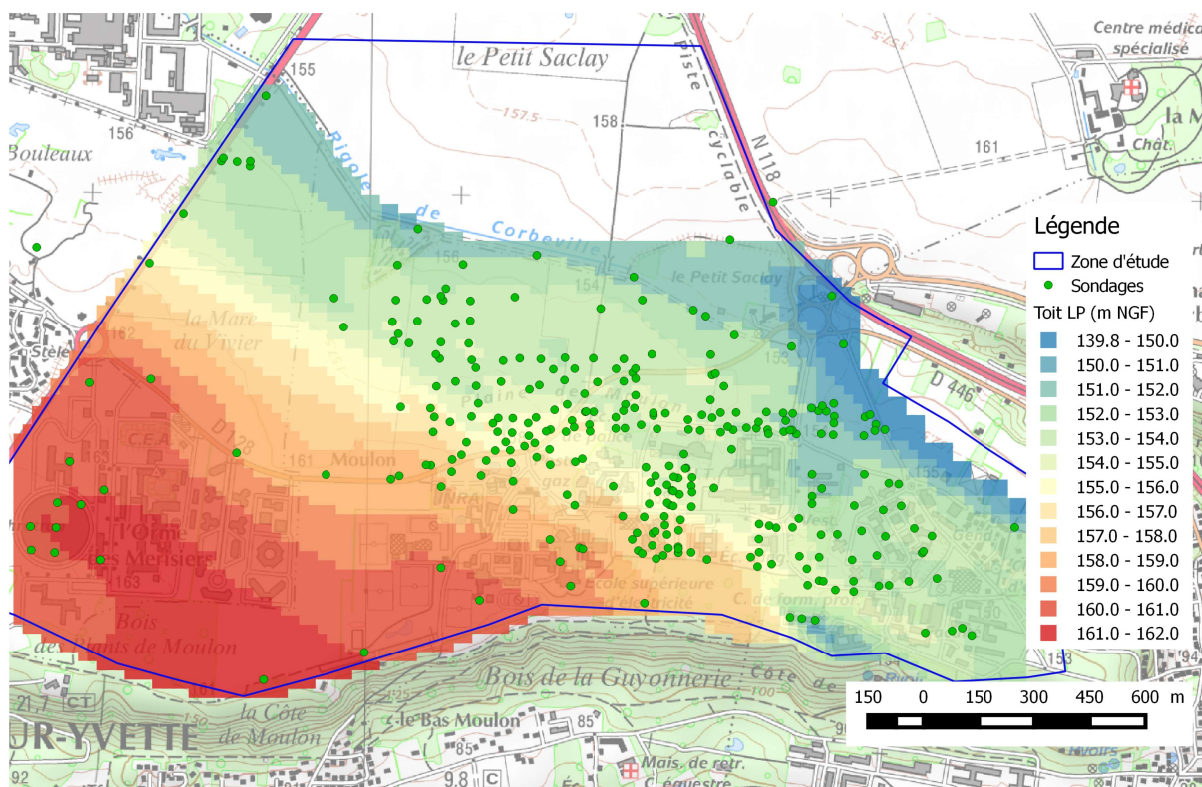


Figure 18: Interpolation du mur des Limons des Plateaux

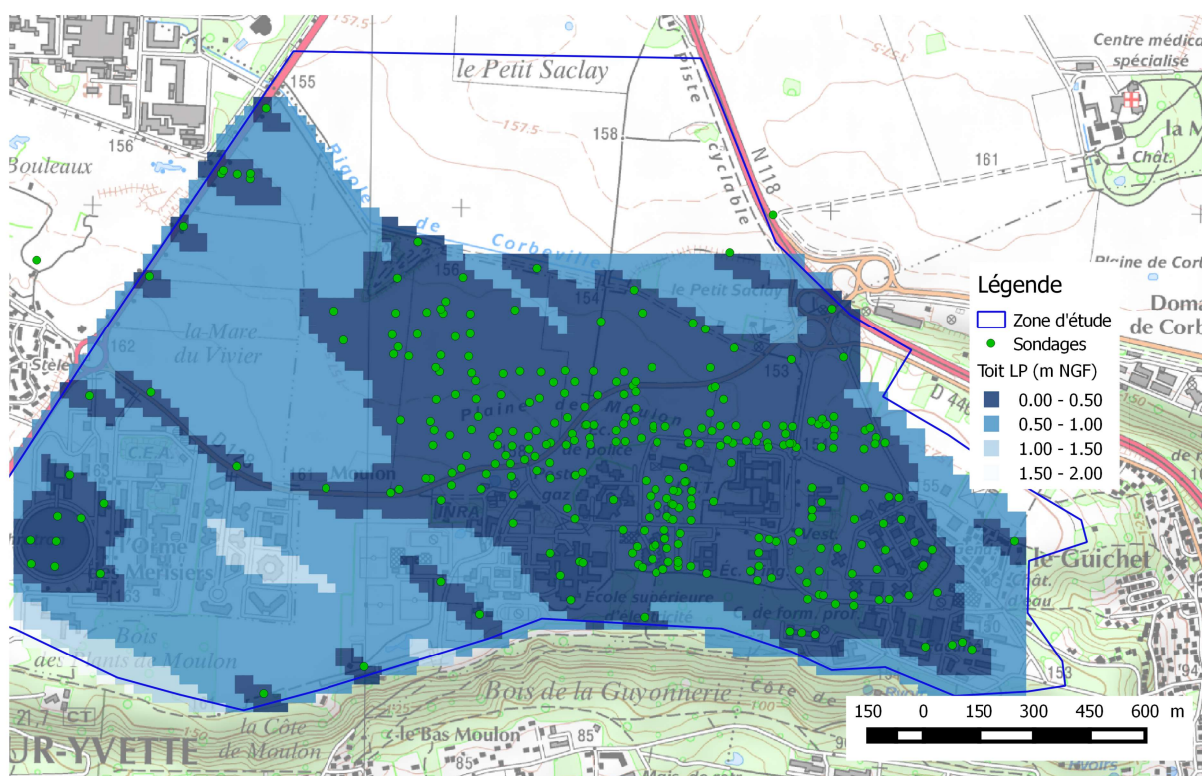


Figure 19: Carte des écarts-type d'interpolation pour le mur des Limons des Plateaux

2.2.3.3 Résultats, géométrie des assises géologiques

L'interpolation du toit des Sables de Fontainebleau réalisée sur une zone élargie met en évidence une disposition de l'interface géologiques cohérente avec la géomorphologie de cette zone du Bassin Parisien. Sur la ZAC du Moulon, le modèle interpolé semble montrer que le toit des Sables de Fontainebleau et le mur des Limons s'abaissent en direction du thalweg, selon un pendage N35 (Figure 20).

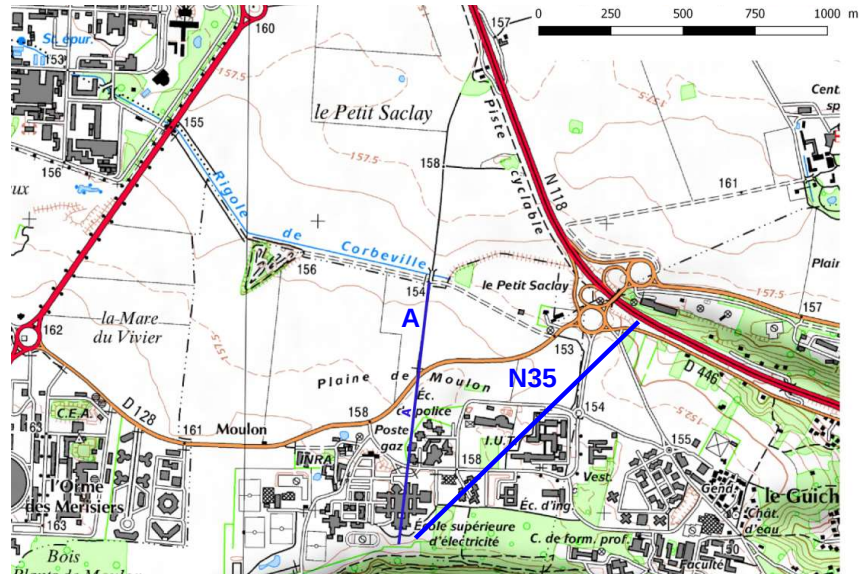
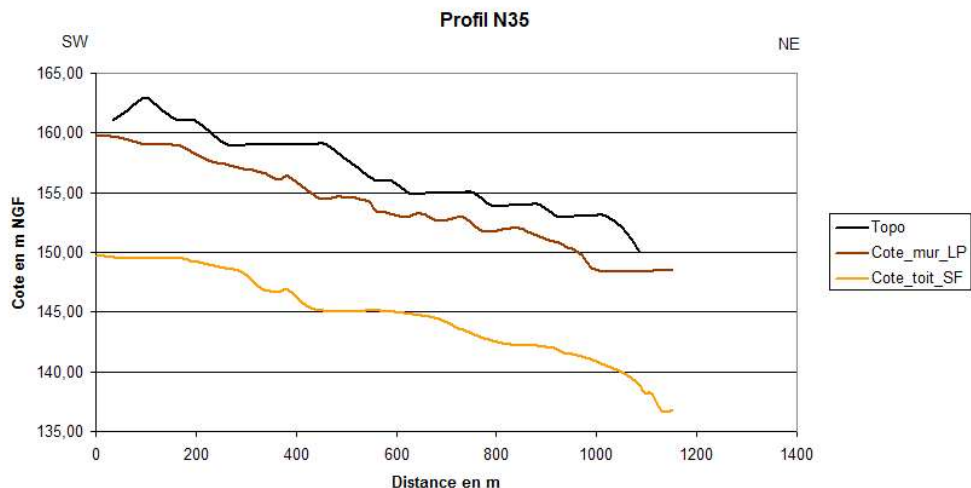
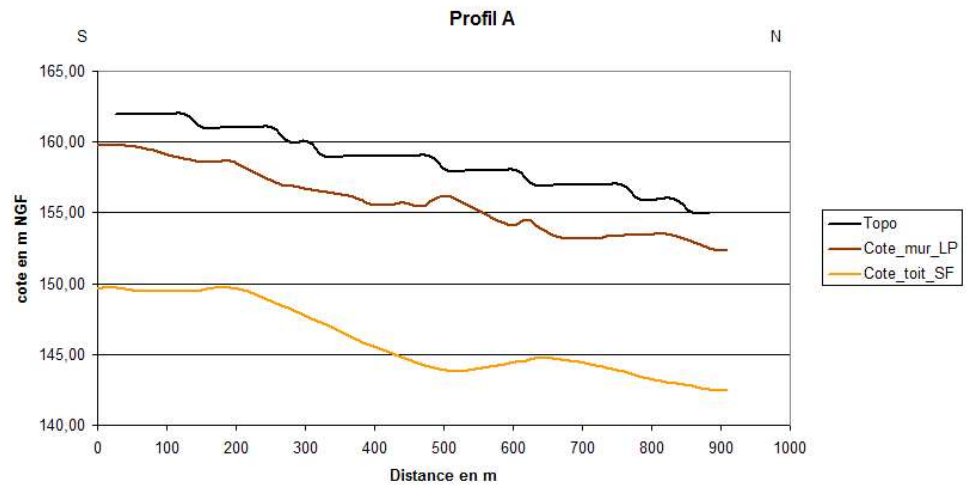


Figure 20:
Localisation et
aspect des coupes
géologiques
dédites du modèle
interpolé



2.3 Perspectives

Concernant le travail sur la géologie superficielle et sa caractérisation, trois axes de travail pourraient être explorés :

- la mise en évidence d'un pendage dans le toit des sables de Fontainebleau, apparemment en cohérence avec la morphologie de surface, mériterait d'être examiné en partie Nord de la rigole de Corbeville. L'intégration d'autres données d'archive, voire la réalisation de sondages spécifiques permettra d'étendre la modélisation vers le Nord ;
- les mesures de Radioactivité naturelle ont conduit à interroger la géométrie des couches de proche surface et notamment les épaisseurs réelles des limons des Plateaux. Un travail plus approfondi sur l'argilosité des limons et la variabilité de leur transition avec les argiles sous-jacentes pourrait être intéressant ;
- la présence apparemment discontinue d'un niveau d'argile compact à la base de l'Argile à Meulière mérite d'être examinée plus attentivement. Cette variation de faciès pourrait jouer un rôle important dans le fonctionnement hydrogéologique de surface en contribuant à l'alimentation de la nappe profonde des Sables de Fontainebleau.

3 Action II : Hydrogéologie de la nappe superficielle

3.1 Contexte et objectifs

3.1.1.1 Climatologie et précipitation

Le climat du plateau de Saclay peut être qualifié de climat océanique dégradé. L'influence de l'océan, caractérisée par une humidité importante et des amplitudes relativement modérées, bien que toujours dominante, s'atténue progressivement vers l'est en faveur de l'influence continentale.

Les données climatiques utilisées dans cette étude sont issues de la station météorologique de Toussus-le-Noble (78) (source : <http://www.infoclimat.fr/>).

La température moyenne annuelle pour la période 1981 - 2010 est de 11,0°C. Le mois le plus froid est celui de janvier, et le plus chaud est celui de juillet, les températures moyennes de ces mois étant respectivement +3,7°C et +19,1°C (normales 1981 - 2010). Selon ces mêmes normales, le cumul annuel de précipitations est de 689,8 mm. Les normales de la station de Toussus-le-Noble sont sensiblement identiques à celles de la station de Trappes (78), située à proximité, où le cumul annuel de précipitations (normales 1981 – 2010) est de 694,2 mm.

Lors de ces 8 dernières années, les cumuls de précipitation annuels enregistrés à la station de Toussus-le-Noble (Figure 21) ont été légèrement supérieurs aux normales en 2012 (+ 23 mm), 2014 (+ 2,4 mm) et 2017 (+ 16,6 mm), les autres années ayant été déficitaires. Le déficit de précipitation a été particulièrement important en 2011 (- 107,3 mm) et en 2015 (- 179,4 mm).

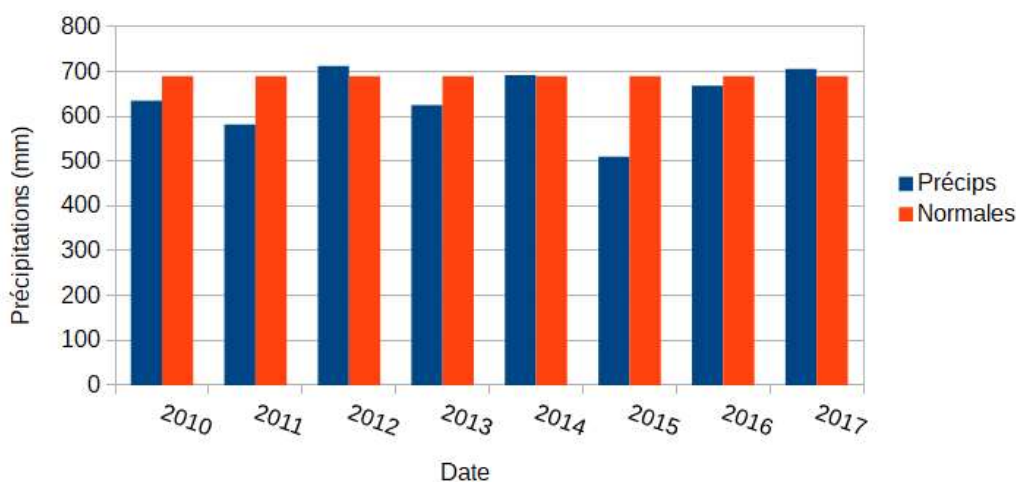


Figure 21: Comparaison des cumuls de précipitation annuels avec les normales (1981 - 2010) à la station de Toussus-le-Noble

Les cumuls annuels de précipitation ne rendent cependant pas compte des forts écarts de cumuls mensuels observés ces dernières années. La figure 22 présente ainsi les cumuls de précipitation mensuels enregistrés à la station de Toussus-le-Noble de 2012 à 2017. Si

le cumul annuel de 2016 est légèrement inférieur aux normales, cette année a, par exemple, été marquée par des mois de mars et de mai particulièrement excédentaires, qui ont provoqué des inondations en Ile-de-France, et notamment dans la vallée de l'Yvette (figure 23).

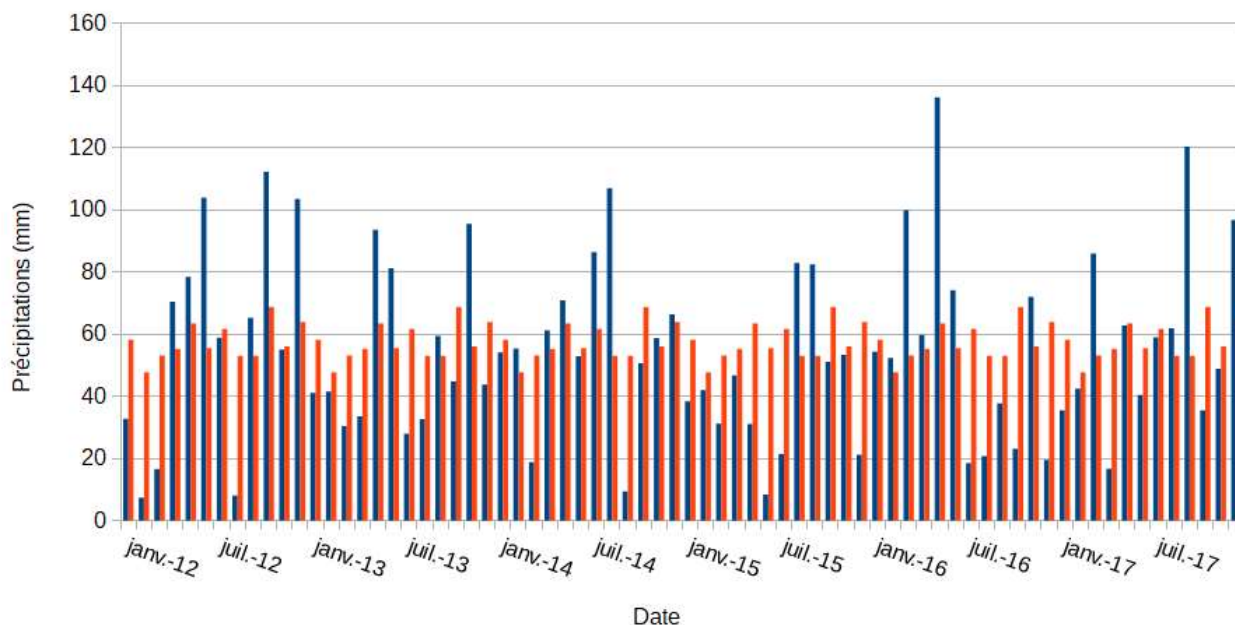


Figure 22: Comparaison des cumuls de précipitation mensuels avec les normales (1981 - 2010) à la station de Toussus-le-Noble



Figure 23: Inondation sur le campus de l'Université Paris Sud - juin 2016 (Source : <http://www.actu.u-psud.fr>)

3.1.1.2 Réseau hydrographique de surface

Le plateau de Saclay est incisé au sud par la vallée de l'Yvette et au nord par la vallée de la Bièvre, qui s'écoulent une centaine de mètres en contrebas. Ce plateau, à l'origine marécageux et réputé insalubre, subit de profondes modifications au XVII^{ème} siècle. Louis XIV fit en effet construire un vaste réseau de collecte des eaux de drainage et de ruissellement sur la plaine de Trappes et le plateau de Saclay afin d'alimenter les fontaines et jeux d'eau du château de Versailles. Ce réseau, constitué de plus de 200 km de rigoles alimentées par des drains de poterie enfouis dans le sol, dirigeait l'eau vers des étangs, qui s'écoulait ensuite gravitairement jusqu'aux réservoirs du château de Versailles. Ces travaux d'adduction eurent également pour conséquence un assainissement global du plateau de Saclay, qui, d'insalubre, devint agricole.

Le réseau de rigoles et d'étangs servit, après la chute de la monarchie, à alimenter la population de Versailles. Le fonctionnement hydraulique de ce réseau resta opérationnel jusqu'au milieu du XX^{ème} siècle, avant de se dégrader faute d'entretien, ou d'être partiellement détruit lors de projets d'aménagement. Les étangs et rigoles du plateau de Saclay font actuellement l'objet d'un programme de restauration (Annexe II), et leur fonctionnement est amené à changer avec la connexion du réseau d'eaux pluviales de certaines zones d'aménagement (Quartier du Moulon notamment).

La ZAC du Moulon se caractérise ainsi par la juxtaposition de ce réseau hydraulique ancien, d'hydrosystèmes caractéristiques des horizons géologiques et pédologiques peu perméables, tels que les mares et les mouillères, ainsi que d'aménagements hydrauliques récents conçus pour la gestion des eaux pluviales et la prévention des risques d'inondation.

a . Rigole de Corbeville

La zone d'étude est bornée au nord par la rigole de Corbeville, vestige du réseau de collecte du château de Versailles. Cette rigole, d'une profondeur pouvant dépasser les 2m, s'écoule d'Est en Ouest.

Le fonctionnement actuel de la rigole a été étudié par le bureau d'étude Artelia dans son étude sur la « Modélisation des écoulements du réseau hydrologique du plateau de Saclay » (Rapport de phase 1, 2013). Entre la RN118 et la RD306 (zone d'étude), la partie amont de ce tronçon de la rigole est divisée en deux branches (sud et nord). La branche sud comprend une liaison avec le réseau d'assainissement de la RN118.

A l'origine, la branche nord (branche amont principale) provenait de Palaiseau, mais elle est maintenant coupée par la RN118, et rejoint le réseau d'assainissement de la RN118. Une partie importante de la branche sud, aujourd'hui disparue, longeait la partie Ouest du thalweg du ru de Corbeville, comme le montre un plan datant de 1960 (Figure 24). Ces deux branches devaient permettre de collecter une partie importante des eaux s'écoulant en direction du thalweg de Corbeville.

En aval de l'embranchement, l'eau s'écoule en direction du CEA, pour aboutir finalement à l'étang de Villiers. Le trop plein de l'étang se déverse dans l'aqueduc des Mineurs. Le Centre d'Etudes Nucléaires (CEA) dispose d'un système de mesure en continu du débit de la rigole à l'entrée du site.

Le fonctionnement actuel de la rigole de Corbeville est synthétisé dans la Figure 25, issue du rapport d'Artelia (Artelia, 2013).

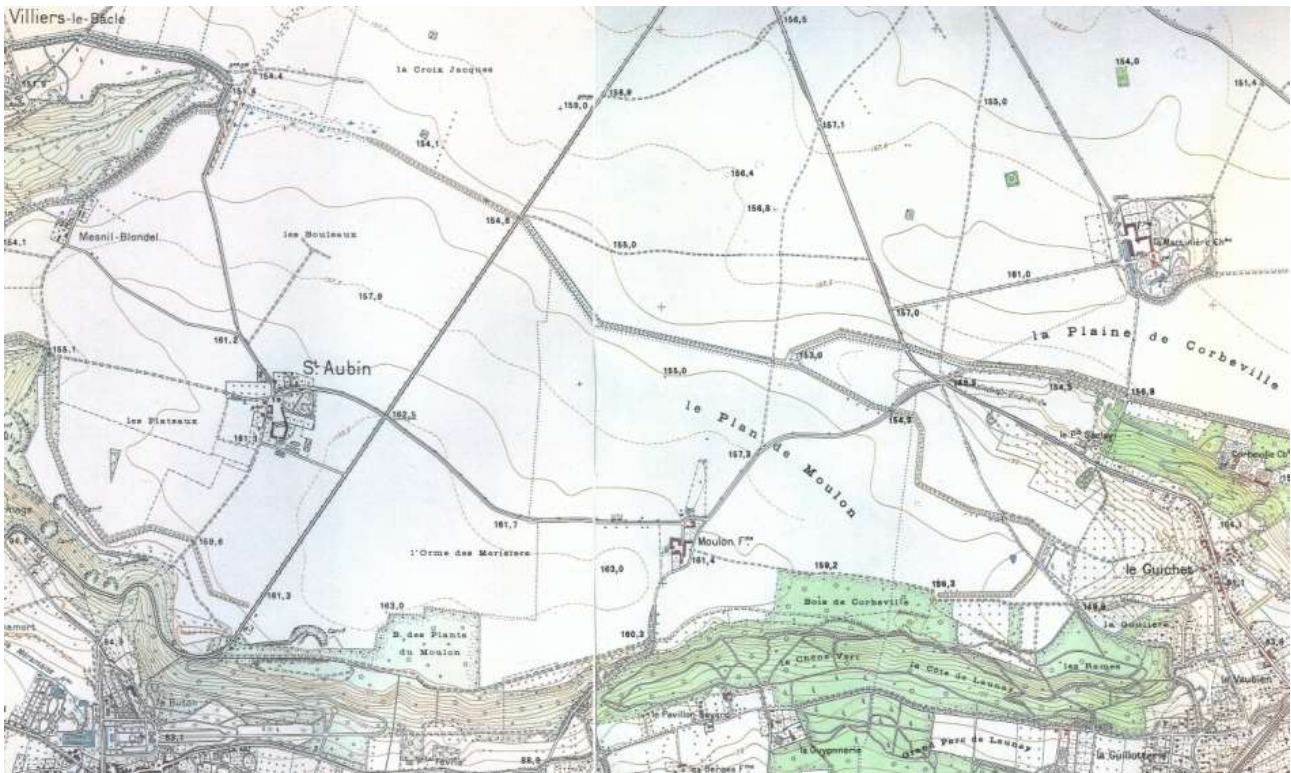


Figure 24: Plan du plateau de Saclay. Ministère de la construction. 1960. M. Charles GAY

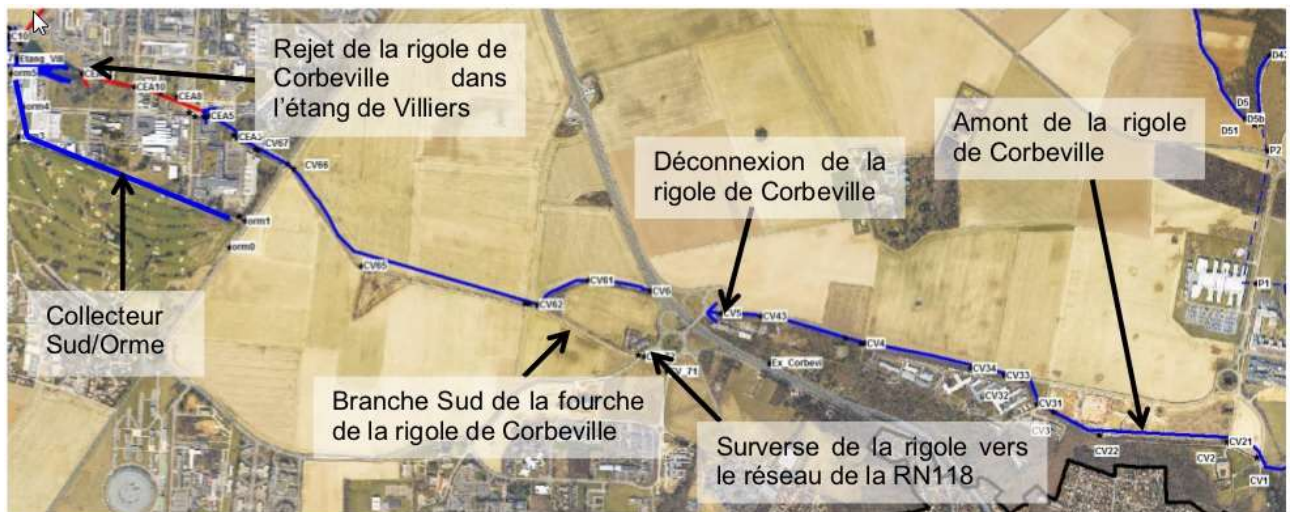


Figure 25: Fonctionnement de la rigole de Corbeville (Source : Artelia, 2013)

La plupart des terres agricoles sont équipées d'un réseau de drainage agricole, dont les drains se situent à environ 1 m de profondeur. Ces drains se rejettent dans des collecteurs principaux qui acheminent les eaux vers la rigole de Corbeville (Figure 27).



Figure 26: Vue de la rigole de Corbeville depuis le pont de pierre



Figure 27: Débouché d'un collecteur de drains dans la rigole de Corbeville

b . Mares et Mouillères

Malgré les travaux de drainage menés sur le plateau depuis le XVII^e siècle, de nombreux hydrosystèmes caractéristiques des zones humides subsistent sur le plateau de Saclay. Le dossier Loi sur l'eau de la ZAC du Moulon (Artelia) synthétise les connaissances disponibles sur les zones humides de la ZAC qui ont fait l'objet d'études menées par trois bureaux d'étude (Ecosphère, Sol Paysage et Biodiversita). Les zones humides identifiées sont listées dans le tableau 2, localisées sur le plan élaboré par Artelia et fourni en Annexe 2. Ces zones humides sont antérieures au projet d'aménagement de la ZAC du Moulon.

N° ZH	Nom ZH	Type dominant
42A	Rigole de Corbeville	Rigole et zone humide associée
42B	Dépression humide aux abords de la rigole de Corbeville	Mouillère ou dépression humide
47	Lagune du CEA	Plan d'eau artificiel
48	Mare au nord du Bois de la Guyonnerie	Mare
49	Les deux mares de Supélec	Mare
94	Mare de l'IUT à Orsay	Mare
95	Mare du bois rue Rostand à Orsay	Mare
96	Mouillère au nord du bois des Plants de Moulon	Mouillère ou dépression humide

Tableau 2 - Zones humides du quartier du Moulon (Source : Artelia, 2013)

Outre la rigole de Corbeville, plusieurs mares et mouillères ont été recensées par Artelia. Cinq mares ont été répertoriées, dont trois figuraient déjà sur le plan de 1960 (Figure 24) : les 2 mares de la Ferme du Moulon (appelées mares de Supélec dans le dossier Loi sur l'eau) et la mare du bois rue Rostand. Cette dernière a été réaménagée depuis les années 1960 et se trouve maintenant au fond d'un bassin de rétention de plusieurs mètres de profondeur (Figure 30). La « mare de l'IUT » (Figure 31) est également un bassin de rétention des eaux pluviales (bassin situé devant le bâtiment du Pôle



Figure 28: Mare de la ferme du Moulon (mare Nord) – ZH n°49



Figure 29: Mare de la ferme du Moulon (mare Sud) – ZH n°49

La faible perméabilité des horizons pédologiques et des formations géologiques superficielles favorisent les stagnations d'eau en période de hautes eaux. Le Cerema a pu observer depuis 2012 que certaines zones étaient inondées chaque hiver pendant plusieurs semaines, voire plusieurs mois. C'est notamment le cas de la zone humide située aux abords de la rigole de Corbeville, considérée comme une mouillère. Une mouillère est une dépression sans exutoire, régulièrement inondée, assez vaste (de plusieurs dizaines à plusieurs milliers de mètres carrés) mais peu profonde (quelques dizaines de centimètres) et avec des pentes très douces, située au sein de champs ou de plaines enherbées. Des zones de stagnation d'eau, de moins grande extension que la mouillère située à côté de la rigole, ont également été régulièrement observées dans les anciennes parcelles agricoles situées au nord de l'IUT (Figures 32 et 33).



Figure 30: Bassin de rétention du PUIO – ZH n°94



Figure 31: Mouillère aux abords de la rigole de Corbeville – ZH n°42B



Figure 32: Zones de stagnation d'eau temporaire (1)



Figure 33: Zones de stagnation d'eau temporaire (2)

c . Ouvrages de gestion des eaux pluviales de la ZAC du Moulon

Le projet d'aménagement d'aménagement du plateau de Saclay prévoit une gestion des eaux pluviales à plusieurs échelles :

- à l'échelle des îlots du Quartier Nord : une gestion des évènements courants,
- à l'échelle du quartier: une gestion des pluies exceptionnelles,
- à l'échelle du plateau (interface quartier/plateau) : une gestion des évènements très exceptionnels.

Pour atteindre ces différents objectifs, différents dispositifs de gestion des eaux pluviales, voire de gestion des inondations (débordement de la rigole), sont prévus dans le cadre de l'aménagement de la ZAC du Moulon. Le bassin du DECK (Figure 34), a ainsi été construit début 2015 le long des voies de bus en site propre, dans l'axe de la rue Noetzlin. Il prolonge une noue installée le long des bâtiments de DIGITEO et du PCRI (Figure 35). Plus récemment, un jardin contenant une mare et une zone inondable a été aménagé en 2017 au nord de l'IUT, à proximité de l'Ecole Centrale Paris Saclay (Figures 36 et 37). Ces aménagements sont en interaction avec la nappe, qui y affleure.



Figure 34: Réalisation du bassin du DECK (février 2015)



Figure 35: Noues le long des bâtiments DIGITEO et PCRI (février 2015)

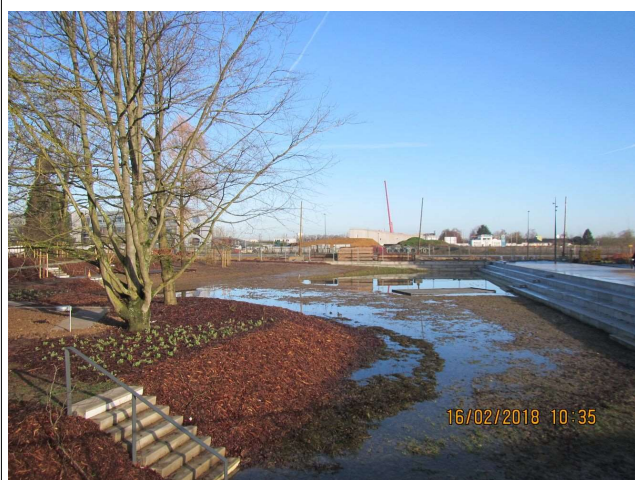


Figure 36: Jardin de l'IUT (1)



Figure 37: Jardin de l'IUT (2)

En complément des ouvrages de gestion des eaux pluviales intégrés aux bâtiments, l'hydrosystème de la Lisière du Moulon a été conçu pour répondre à différents objectifs (Artelia, 2016), notamment :

- réceptionner et collecter les eaux pluviales sur l'ensemble des secteurs aménagés à l'amont et les acheminer vers la rigole de Corbeville,
- favoriser l'infiltration des eaux vers la nappe superficielle pour permettre sa recharge et favoriser l'alimentation des zones humides,
- réguler les eaux pluviales et participer à l'épandage de la crue centennale de la rigole de Corbeville.

Ce vaste système de régulation et de stockage des eaux pluviales, que constitue la Lisière du Moulon, se décompose en deux ensembles complémentaires et indépendants :

- les noues des passages nord-sud (PNS, Figure 38),
- des casiers de stockage (Figure 39) des eaux ruisselées lors d'un événement pluvieux rare (50 ans).

Le principe de fonctionnement des casiers est fourni en Annexe II. En raison de leur principe de fonctionnement et de leur ampleur, ces casiers, aménagés en 2017, devraient avoir un impact fort sur le fonctionnement hydrogéologique de la ZAC.



Figure 38: Passage nord-sud (PNS)



Figure 39: Casiers de la Lisière du Moulon

3.1.1.3 Contexte hydrogéologique

Le plateau de Saclay est le siège d'un système aquifère composé de deux nappes superposées. Cet aquifère est limité au nord par la Bièvre et au sud par l'Yvette, qui le drainent fortement. Les deux nappes qui le constituent sont de bas en haut :

- la nappe des Sables de Fontainebleau, dont le réservoir principal est la formation des Sables de Fontainebleau, mais qui baigne également la formation peu perméable des Marnes à Huître et le Calcaire de Brie ; le substratum de cette nappe est la couche imperméable des Argiles Vertes ;

- la nappe superficielle, baignant les Limons des Plateaux et les Formations de Lozère, qui est soutenue par les Argiles à Meulière de Beauce, dont certaines peuvent elles-mêmes être le siège de circulations d'eau.

a . Nappe des Sables de Fontainebleau

Il s'agit d'une nappe libre sur l'ensemble du plateau. Son écoulement principal est orienté nord-ouest sud-est, mais sa surface piézométrique est fortement influencée par les vallées et thalwegs qui la drainent. Sa puissance mouillée peut atteindre 25 à 30 m au centre du plateau, alors que des lignes de source apparaissent à l'affleurement des Marnes à Huître ou des Argiles Vertes dans les vallées.

Cette nappe a fait l'objet de nombreuses études et sa surface piézométrique a été cartographiée à plusieurs reprises (Cojean, R., 1975 ; Vernoux J.F. et al., 1999). Elle est alimentée directement par infiltration des eaux météoritiques dans les zones d'affleurement des sables, ou indirectement par infiltration de ces eaux à travers les formations superficielles. Les eaux qui s'infiltrent par les versants sableux ne rejoignent souvent que très provisoirement la nappe, avant d'être drainées par les cours d'eau. Les fluctuations de la nappe ne réagissent donc que tardivement aux épisodes pluvieux, puisque la majeure² partie de l'eau qui la recharge doit percoler à travers les formations superficielles et en particulier les Argiles à Meulière à faciès argileux compact. D'après l'étude de Vernoux J.F. et al. (1999), la nappe des Sables de Fontainebleau réagit avec un temps de retard d'environ un an aux épisodes pluvieux. Des zones d'infiltration préférentielle semblent néanmoins exister par endroit, notamment sous les étangs, ainsi que dans certaines zones où l'épaisseur d'Argile à Meulière peu perméable est plus faible. Il existe par ailleurs des puits à sable construits autour de certains bâtiments du CEA ; ces puits, alimentés par des tranchées drainantes entourant les bâtiments, permettent d'infiltrer directement les eaux de la nappe superficielle dans la zone non saturée du réservoir des Sables de Fontainebleau.

La perméabilité de cette formation a été mesurée par le biais de plusieurs essais de pompages, et est comprise entre 6.10^{-5} et 7.10^{-6} m/s (Vernoux J.F. et al., 1999). Les travaux de modélisation réalisés plus récemment par Renard et Tognelli (2016) tendent à confirmer de telles valeurs de perméabilité, et fournissent des valeurs de porosité efficace comprises entre 20 et 30 %.

b . Nappe superficielle

L'argile à meulière retient, sur les plateaux, un réseau aquifère superficiel aux fluctuations saisonnières importantes, contenu dans les Limons des Plateaux, les Formations de Lozère quand elles sont présentes, et les Argiles à Meulière à faciès calcaire. Il est fréquemment considéré que ces formations superficielles ne sont pas le siège d'une nappe phréatique à proprement parler, mais plutôt d'une série de lentilles aquifères perchées, d'extension et d'épaisseurs variables (Vernoux J.F. et al., 1999).

Si la grande hétérogénéité de ces formations crée de forts contrastes de perméabilité, favorisant la formation de poches d'eau déconnectées les unes des autres, et où la composante principale de l'écoulement est verticale, certaines zones du plateau sont propices à la formation de nappes de faible étendue, s'écoulant en direction des versants ou des thalwegs avec un gradient hydraulique relativement élevé. Les chenaux et poches de sables argileux de Lozère constituent notamment des zones privilégiées où l'eau s'accumule. Certains puits creusés dans les Argiles à Meulière pouvaient également rester en eau tout au long de l'année, ce qui suggère que certaines circulations

²Les proportions respectives des différents modes de recharge sont sujettes à débat.

préférentielles existent aussi dans les Argiles à Meulière de Beauce (Cojean, R., 1975).

De par sa nature très hétérogène, il est très difficile de caractériser la perméabilité des formations baignées par cette nappe superficielle. Les fluctuations de cette nappe sont directement reliées à la pluviométrie, et il arrive souvent qu'au même endroit la nappe s'assèche presque complètement à la fin de la période estivale puis devienne affleurante en hiver ou au printemps. L'action des drains agricoles connectés aux rigoles réduit sensiblement la recharge de cette nappe, et par extension celle de la nappe des Sables de Fontainebleau.

Le fonctionnement de cette nappe superficielle est analysé dans la suite de cette étude.

3.1.2 Objectifs dans le cadre de la convention 2015 - 2017

Les objectifs de cette action hydrogéologique sont de mieux caractériser le fonctionnement de la nappe superficielle et de fournir les données nécessaires à la construction et au calage du modèle hydrologique urbain intégré, détaillé en partie 3 de ce rapport. L'objectif initial était notamment de déterminer si l'on peut considérer qu'il s'agit bel et bien d'une nappe, ou s'il s'agit plutôt de lentilles aquifères déconnectées les unes des autres. L'intégration de niveaux de sous-sols aux nouveaux bâtiments pour limiter l'étalement urbain, ainsi que l'introduction de techniques alternatives de gestion des eaux pluviales favorisant leur infiltration, sont en effet rendues complexes par la présence de cette nappe dont le fonctionnement est mal connu. La construction de sous-sols sous le niveau de la nappe nécessite la mise en place de dispositifs d'étanchéité (cuvelage étanche) ou de systèmes de drainage permanents. Une nappe sub-affleurante peut par ailleurs réduire les performances des ouvrages de gestion des eaux pluviales (réduction du volume utile des bassins, refus d'infiltration, rejet d'eaux d'exhaure dans les ouvrages). Enfin, les impacts cumulés des aménagements sur le fonctionnement de la nappe sont difficiles à appréhender.

Ce travail de caractérisation du fonctionnement hydrogéologique de la nappe superficielle sur la ZAC du Moulon a consisté à :

- poursuivre le suivi piézométrique en continu, initié par le Cerema en 2012, en complétant le réseau de suivi,
- réaliser des campagnes de relevés piézométriques manuels dans l'ensemble des piézomètres présents sur la ZAC du Moulon,
- instrumenter les débits d'exhaure d'un bâtiment,
- réaliser une synthèse des données de perméabilité disponibles.

3.2 Avancées 2015-2017

3.2.1 Fluctuations des niveaux de la nappe superficielle

3.2.1.1 Mise en place du réseau de suivi piézométrique

Depuis le début des travaux du Cerema en 2012, un réseau de 11 piézomètres a été installé sur la ZAC du Moulon afin de mesurer en continu les fluctuations du niveau de la nappe superficielle. Le réseau de suivi initial était composé de 8 piézomètres installés en 2012. On notera que deux sondages (PzF et PzH) ne furent pas équipés en piézomètre car aucune venue d'eau n'avait été constatée lors du forage. Il a été décidé de les remplacer par deux nouveaux piézomètres (PzI et PzJ). Malgré l'absence de venues d'eau observées lors des forages des PzI et PzJ, ces piézomètres furent équipés en piézomètre.

Le réseau de suivi a par la suite été complété par 3 piézomètres réalisés entre mars 2015 et octobre 2017. Les piézomètres PzK et PzL avaient pour objectif d'améliorer la couverture de la ZAC du Moulon et le PzO de remplacer le PzE, détruit en 2015 lors de la construction d'un des bâtiments de l'Ecole Centrale Paris.

Les emplacements des piézomètres sont représentés sur la Figure 40. Les piézomètres ont été installés majoritairement en partie Est de la zone d'étude pour des raisons d'accessibilité et de préservation des ouvrages, la pérennité des ouvrages étant notamment très incertaine au milieu des exploitations agricoles. Malgré la recherche d'emplacements aussi sûrs que possible, 6 piézomètres ont été détruits.

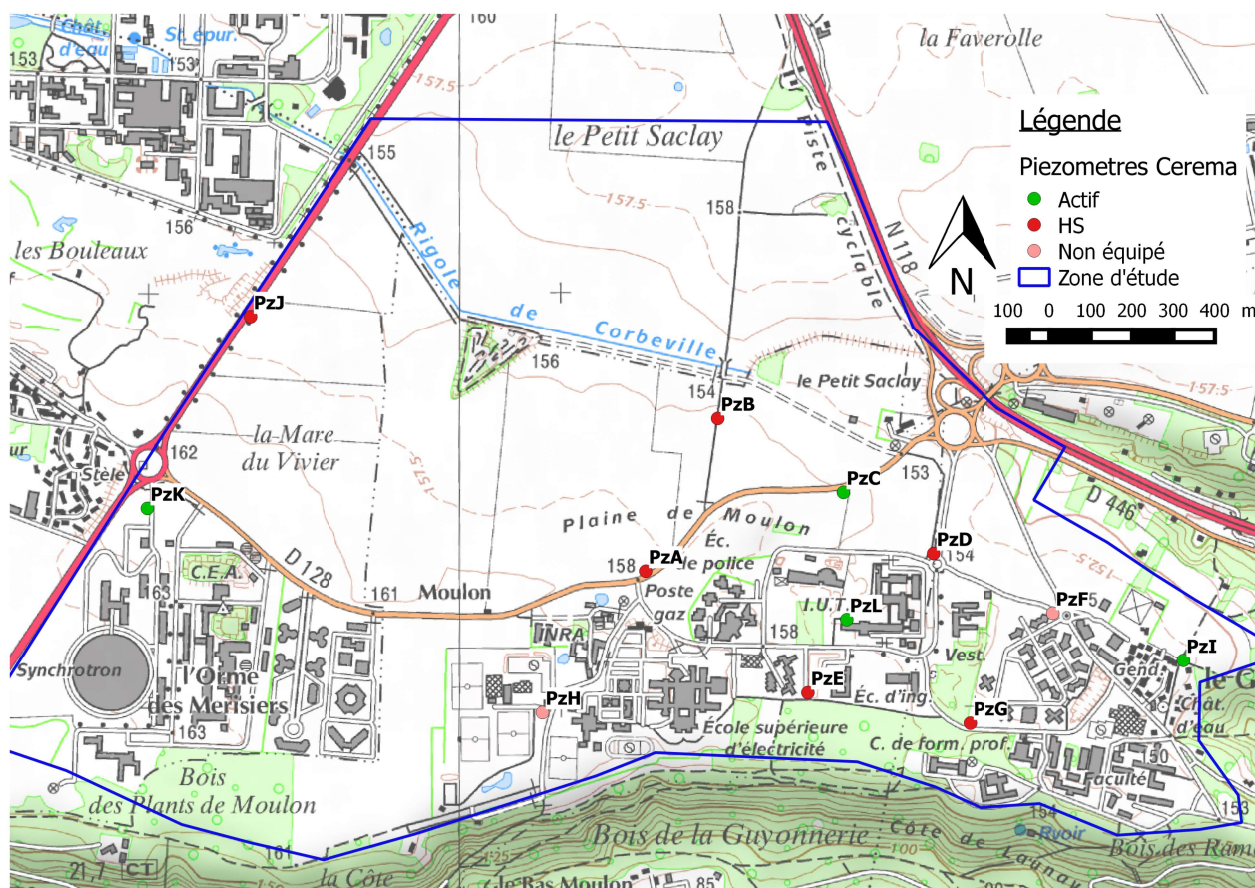


Figure 40: Emplacement des piézomètres installés par le Cerema

Les piézomètres ont été réalisés à la tarière 150 mm, et équipés de tubes PVC de diamètre 52/63 mm. Un massif filtrant a été mis en place dans l'espace inter-annulaire au niveau de la crépine puis recouvert d'un bouchon étanche de type bentonite à la base du tube lisse. Les caractéristiques des piézomètres sont synthétisées dans le tableau 3. Des bouches à clé ont été choisies pour assurer la protection des piézomètres, afin de limiter les risques de vol des sondes automatiques (protection passive). Les sondages des piézomètres PzG et PzI avaient atteint les Sables de Fontainebleau. Un bouchon de bentonite a été mis en place en fond de forage de manière à éviter une mise en communication de la nappe superficielle avec la nappe des Sables de Fontainebleau.

Piézomètre	Date de réalisation	Profondeur sondage (m/TN)	Hauteur des crépines (m)	Venue d'eau en forage	Etat
PzA	12/04/12	10,25	4,25 – 10,25	Oui	Détruit en juillet 2017
PzB	05/04/12	9	3 – 9	Oui	Détruit en septembre 2016
PzC	10/04/12	8,65	2,65 – 8,65	Oui	Opérationnel
PzD	16/04/12	6	0 – 6	Oui	Détruit en septembre 2017
PzE	19/04/12	7,4	1,4 – 7,4	Oui	Détruit en septembre 2015
PzF	17/04/12	9	Non équipé	Non	-
PzG	31/07/12	10,5	??	Non	Détruit en novembre 2015
PzH	18/04/12	7,5	Non équipé	Non	-
PzI	26/10/12	9	1,6 – 7,6	Non	Opérationnel
PzJ	08/11/12	9	3 – 6	Non	Détruit en juin 2014
PzK	05/03/15	8,1	3,6 – 8,1	Oui	Opérationnel
PzL		8,2	2,7 – 7,7	Oui	Opérationnel
PzO	25/10/17	7,8	3 – 7,3	Non	Opérationnel (sec)

Tableau 3 - Synthèse des caractéristiques des piézomètres réalisés par le Cerema

Le tableau 3 met en évidence le caractère non systématique des venues d'eau en forage. Il est par ailleurs intéressant de signaler que les premières venues d'eau franches ont été observées à des profondeurs variables selon les forages, comme cela est mentionné sur les coupes de sondage (Annexe 1) : 2 m dans le PzA, 5,7 m dans le PzB, 6,9 m dans le PzC ou encore 3,35 m dans le PzD.

On notera par ailleurs que les piézomètres PzJ et PzO sont toujours restés secs.

3.2.1.2 Instrumentation des piézomètres

Les piézomètres installés par le Cerema ont été équipés de sondes de mesure et d'enregistrement autonomes des niveaux d'eau. Ces sondes piézométriques mesurent la pression (somme de la pression atmosphérique et de la pression due à la colonne d'eau) à l'aide d'un capteur de pression intégrée, ainsi que la température.

Les sondes utilisées proviennent de deux constructeurs différents, mais ont un fonctionnement analogue :

- les sondes « Mini-Diver », commercialisées par Schlumberger Water Services, offrent une précision typique de $\pm 0,5 \text{ cmH}^2\text{O}$ pour la pression et $\pm 0,1^\circ\text{C}$ pour la température,

- les sondes « Levelogger Edge », commercialisées par Solinst, offrent une précision typique de $\pm 0,5$ cmH²O pour la pression et $\pm 0,05$ °C pour la température³.

Deux sondes mesurant la pression atmosphérique ont par ailleurs été installées (une de type Baro-Diver et une de type Baro-Logger). Les sondes barométriques permettent de compenser les données des sondes piézométriques, et ainsi déterminer la hauteur de la colonne d'eau située au-dessus de la sonde piézométrique.

Les chroniques des sondes barométriques ont été comparées afin de vérifier leur bon fonctionnement. Cela a permis d'identifier des anomalies correspondant à des périodes où l'une des sondes était submergée à cause d'un niveau de nappe particulièrement haut. Les données du barodiver ont été utilisées pour la compensation barométrique, hormis lors des 3 événements où il a été brièvement submergé, et où les données du barologger ont été retenues. En dehors de ces périodes d'anomalies, la différence de pression mesurée par les deux capteurs est inférieure à 0,02 m (en valeur absolue).

Le tableau 4 récapitule le type de sonde utilisée pour équiper chaque piézomètre, la date de mise en service de la sonde et, le cas échéant, la date de « retrait » de la sonde. On notera que la protection de tête du piézomètre PzB a été endommagée à la fin de l'été 2014. La sonde qui l'équipe a été retirée le 11/10/14, puis réinstallée le 25/03/15, une fois le piézomètre réparé. Pour certains piézomètres hors service, les sondes ont pu être récupérées (sondes du PzB et du PzD). Les piézomètres PzE et PzG ont en revanche été détruits avant que les sondes puissent être récupérées. La sonde piézométrique du PzA ainsi que la sonde barométrique qui se trouvait dans ce piézomètre ont par ailleurs été volées.

	Type de sonde piézométrique	Date de mise en service	Date de retrait / destruction
PzA	Mini-Diver	06/06/12	30/10/15
PzB	Mini-Diver	06/06/12	11/05/16
PzC	Levelogger	07/06/12	En service
PzD	Levelogger	26/07/12	22/09/17
PzE	Levelogger	26/07/12	03/08/15
PzG	Levelogger	20/03/13	20/10/15
PzI	Mini-Diver	20/03/13	En service
PzK	Mini-Diver	25/03/15	En service
PzL	Mini-Diver	31/07/15	En service

Tableau 4 - Type de sondes utilisées pour l'instrumentation des piézomètres et période d'instrumentation des différents piézomètres

Les chroniques piézométriques obtenues après la compensation barométrique ont été comparées avec les mesures manuelles effectuées lors des maintenances, afin de vérifier la validité des mesures automatiques.

³Données constructeurs

<http://www.solinst.com/Prod/3001/3001-data-loggers.html> et

<http://www.swstechnology.com/groundwater-monitoring/groundwater-dataloggers/mini-diver>



Figure 41: Téléchargement des données des sondes autonomes

3.2.1.3 Suivi des variations piézométriques

Les chroniques piézométriques sont présentées ci-dessous, en fonction de la profondeur de la nappe (Figure 42) et de la cote piézométrique (Figure 43). Les profondeurs minimales, maximales, moyennes ainsi que le battement de la nappe sont synthétisées dans le tableau 5. La durée du suivi a également été ajoutée, afin de pouvoir relativiser la comparaison des statistiques obtenues pour les différents piézomètres.

Il apparaît globalement que la nappe est peu profonde. Située en moyenne entre 1,8 et 3,4 m de profondeur, elle peut devenir quasi-affleurante en période de hautes eaux (profondeur minimale inférieure à 1 m dans la plupart des piézomètres).

Le comportement des piézomètres peut être regroupé en différentes catégories, en se basant sur l'allure générale des chroniques, l'étiage observé dans les piézomètres, ainsi que le battement.

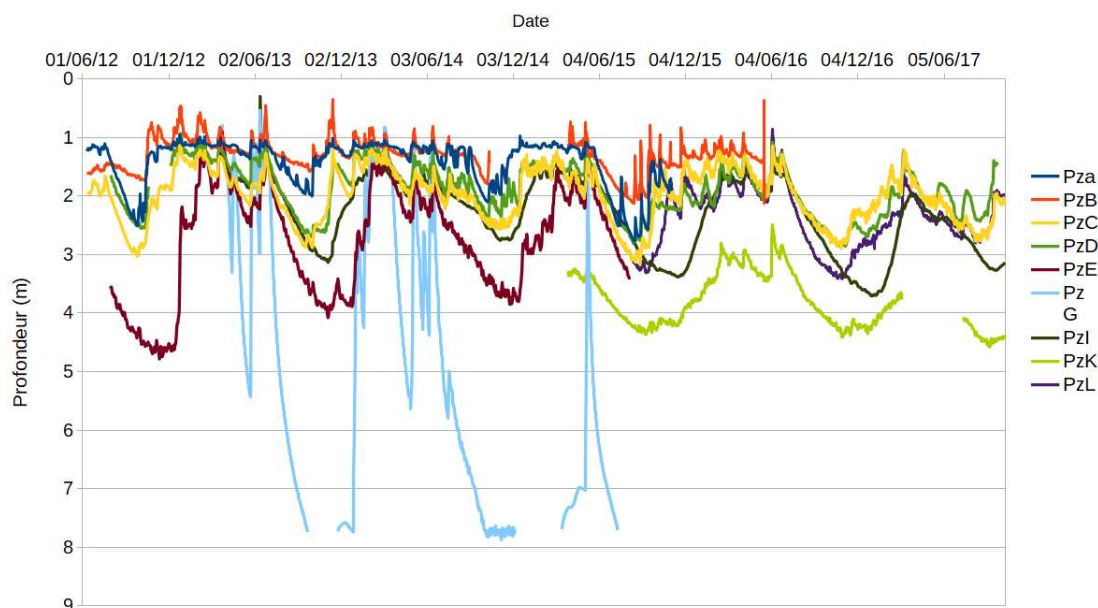


Figure 42: Fluctuations de la profondeur de la nappe mesurées dans les piézomètres du Cerema entre le 6 juin 2012 et 12 octobre 2017

Le piézomètre PzG présente clairement un comportement atypique : le niveau d'eau augmente périodiquement de façon très rapide, avant de décroître jusqu'à ce que le piézomètre se vide totalement. Dans la mesure où le sondage du PzG avait atteint le toit des Sables de Fontainebleau, on peut se demander si le bouchon étanche mis en place en fond de piézomètre assure bien son rôle et si l'eau ne s'écoule pas progressivement vers les Sables de Fontainebleau. Le remplissage très rapide de ce piézomètre lors d'évènements pluvieux de forte intensité pourrait quant à lui s'expliquer par la présence à proximité du PzG de la fin de l'ancienne branche sud de la rigole de Corbeville. Ce tronçon passait juste à côté du bassin de rétention situé rue Rostand (ancienne mare visible sur le plan de 1960, Figure 24), et il est probable que de l'eau transite par l'ancienne rigole remblayée, lorsque le bassin d'orage se remplit, ce qui conduirait à un remplissage rapide du PzG.

Profondeur (m)	Minimale	Maximale	Moyenne	Battement (m)	Durée de suivi (jours)
PzA	0,94	2,77	1,43	1,83	1242
PzB	0,35	2,12	1,29	1,78	1274
PzC	1,11	3,17	1,99	2,07	1954
PzD	0,93	2,86	1,89	1,99	1842
PzE	0,89	4,78	2,77	3,9	1104
PzG	0,53	7,87	4,97	7,34	680
PzI	0,3	3,71	2,31	3,41	1668
PzK	2,49	4,58	3,81	2,09	803
PzL	0,86	3,41	2,39	2,56	805

Tableau 5 - Valeurs statistiques des profondeurs de la nappe mesurées dans les différents piézomètres

Les autres piézomètres ont un comportement relativement homogène avec une cyclicité saisonnière bien marquée. La recharge des nappes commence en général fin novembre – début décembre et se poursuit jusqu'à la fin de l'hiver, voire le début du printemps. Il s'ensuit une période plus ou moins longue où les niveaux de nappe restent relativement hauts, tant que la réserve utile n'est pas complètement épuisée. Les niveaux de nappe baissent ensuite franchement (à partir de juillet ou août selon les années) jusqu'à la fin de la période étiage. Les variations de la nappe sont par ailleurs extrêmement sensibles aux précipitations, comme le montrent les nombreux pics visibles sur les chroniques.

Des distinctions entre le comportement des différents piézomètres peuvent néanmoins être soulignées. Le niveau maximal du piézomètre PzA est visiblement « tamponné », ce qui s'explique par sa localisation. Situé à moins de 2 m du fossé de la RD128, son niveau maximal s'aligne sur le niveau d'eau dans le fossé. Dans une moindre mesure, les niveaux maximaux des piézomètres PzB, PzC et PzD peuvent être également « tamponnés » par la présence de drains agricoles (PzB), de fossés (PzC) ou d'ouvrages de gestion des eaux pluviales (PzD).

On peut par ailleurs observer que, pour certains piézomètres, en particulier le PzE et dans une moindre mesure le PzI, la période d'étiage a tendance à se prolonger plus longtemps que dans les autres piézomètres. L'amplitude du battement mesuré dans ces piézomètres est par ailleurs nettement supérieure (3,4 et 3,9 m, respectivement dans les PzE et PzI) à celle du battement mesuré dans les autres piézomètres (entre 1,8 et 2,5 m, PzG non compris).

Ainsi, les piézomètres situés dans la zone centrale de la ZAC du Moulon, à savoir les PzA, PzB, PzC, PzD, PzK et PzL semblent avoir un comportement relativement homogène, alors que les piézomètres situés plus près de la bordure du plateau ont un comportement légèrement différent, avec des battements de nappe plus importants.

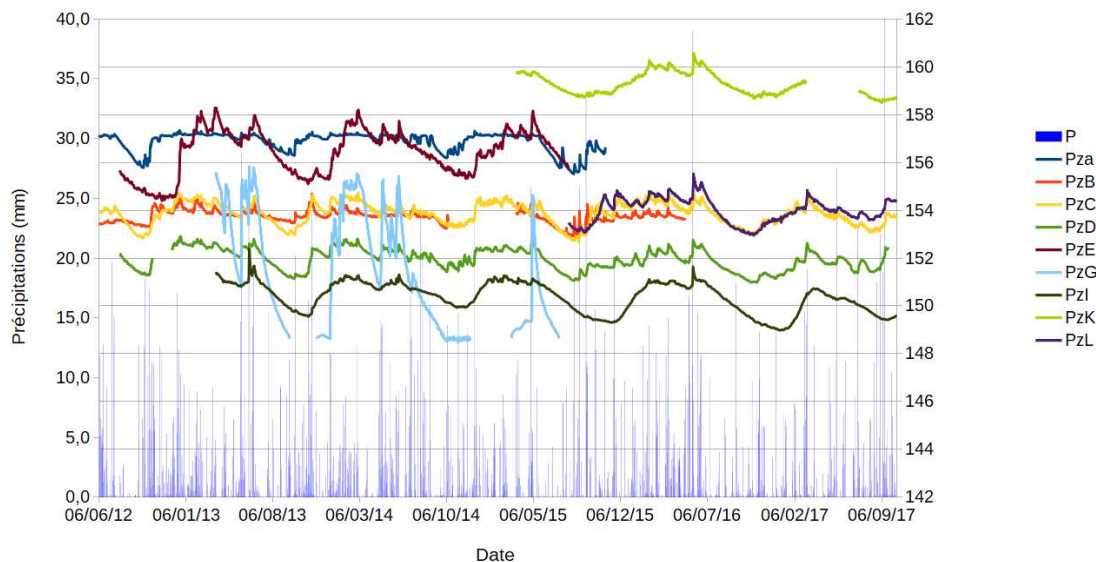


Figure 43: Fluctuations de la cote piézométrique mesurées dans les piézomètres du Cerema entre le 6 juin 2012 et 12 octobre 2017

3.2.2 Suivi des débits d'exhaure

3.2.2.1 Présentation du point de mesure et du dispositif de suivi

La présence d'une nappe superficielle, très peu profonde en certains points de la zone d'étude, invite à s'interroger sur ses interactions avec les objets urbains présents dans le sous-sol et notamment les éléments de drainage destinés à limiter l'impact des remontées de nappe sur le bâti ou éviter l'inondation de niveaux souterrains (parkings enterrés, sous-sols).

Un suivi des volumes collectés au niveau de l'un des bâtiments de la ZAC a donc été mis en œuvre afin de mieux appréhender l'incidence de ce type de dispositifs de drainage sur le fonctionnement hydrogéologique de la nappe superficielle. L'objectif était ici d'obtenir une première estimation des volumes susceptibles d'être prélevés et éventuellement rejetés en surface ou dans les réseaux d'eaux pluviales, mais aussi d'analyser l'influence des fluctuations du niveau de la nappe sur les débits collectés par le système de drainage.

L'instrumentation a été réalisée au niveau d'un vide sanitaire situé sous l'amphithéâtre de l'Institut des Sciences des Plantes de Paris-Saclay (IPS2, ex-Institut Biologique des Plantes). La partie visible du dispositif de drainage est constitué d'un puisard maçonné ($0.83 \times 0.83 \times 1.33\text{m}$), alimenté par un drain dont la surface de collecte n'est pas véritablement connue, faute de plan de drainage (on peut néanmoins supposer que le rabattement de la nappe superficielle est assuré par un réseau de drains situé sous le bâtiment ou en sa périphérie). L'altitude de la zone du vide sanitaire où est installé le puisard est d'environ 153 mNGF et se situe à une profondeur de l'ordre de 1.5 m par rapport au terrain naturel à proximité du bâtiment. Le radier du puisard est située à la cote 152.14 mNGF. L'arrivée du drain via laquelle sont acheminés les volumes prélevés dans la nappe superficielle est positionnée 60 cm plus haut à 152.74 mNGF (cf. figure 44).

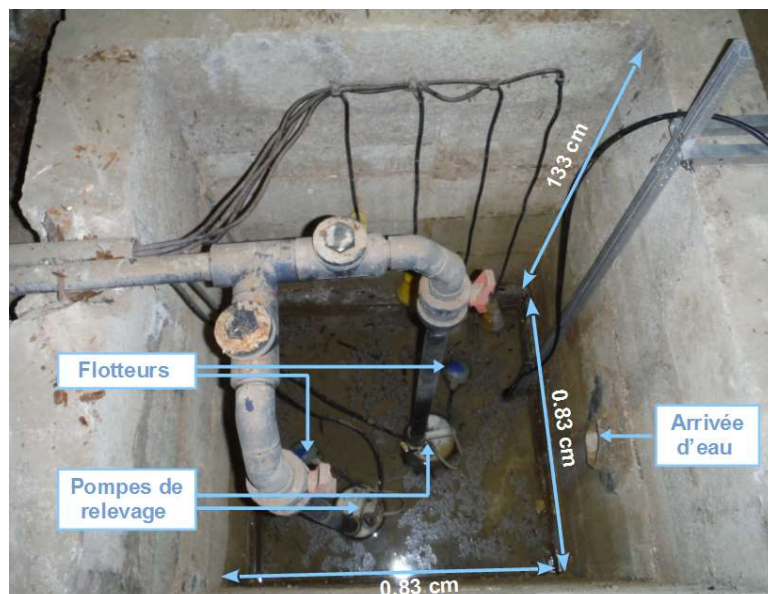


Figure 44: Puisard via lequel sont collectées puis pompées les eaux d'exhaure sous le bâtiment IPS2

Le puisard est équipé de deux pompes de relevage activées par un système de flotteurs. La mise en marche de l'une des deux pompes se produit lorsque le niveau d'eau dans le

puisard atteint une trentaine de centimètres. Le pompage s'interrompt avec le retour en position basse des flotteurs (quelques centimètres au-dessus du niveau du radier). Le basculement de la première pompe à la seconde, d'un cycle de pompage à l'autre, est apparu assez aléatoire sur la période d'observation (pas d'alternance stricte dans le fonctionnement des deux pompes). Chaque cycle de pompage couvre une hauteur de marnage d'environ 22 cm pour un volume d'approximativement 144 l.

La hauteur de marnage, le volume correspondant et le débit moyen des deux pompes ont pu être estimés grâce au suivi du niveau d'eau dans le puisard avec un capteur de pression de type « bulle à bulle ». La mesure à une fréquence élevée des variations de la hauteur d'eau (période d'enregistrement de l'ordre de la seconde), couplée à celle des temps de fonctionnement de chacune des deux pompes, a en particulier permis d'évaluer de façon précise le débit de ces dernières sur plusieurs dizaines de cycles de remplissage. Sur la période considérée pour l'estimation de ces débits, les durées de remplissage du puisard sont de manière générale apparues très largement supérieures au temps nécessaire à sa vidange ; cette situation permet de considérer que l'arrivée d'eau souterraine via le drain durant les cycles de vidanges est négligeable et donc n'introduit pas de biais significatifs dans le calcul des débits de pompage (les variations de hauteur d'eau enregistrée étant alors essentiellement expliquées par le pompage). Le résultat de cette estimation des débits est présenté dans le tableau 6 :

Pompe	Pompe 1		Pompe 2	
	Vidange	Remplissage	Vidange	Remplissage
Durée moyenne	98 s	5 h 30 min	133 s	5 h 55 min
Volume	144.9 l	144.9 l	144.7 l	144.7 l
Débit	1.47 l/s	> 0.01 l/s	1.08 l/s	> 0.01 l/s

Tableau 6 – Synthèse des mesures effectuées pour l'estimation du débit moyen associé à chacune des pompes installées dans le puisard du bâtiment IPS2 (NB : les écarts constatés sur les débits mesurés pour les différents cycles de vidanges apparaissent négligeable et justifient l'utilisation d'une valeur moyenne)

Le débit des deux pompes étant connu, le volume prélevé dans la nappe au niveau du bâtiment a par la suite été directement déduit des temps de fonctionnement des pompes. Le suivi de ces temps de fonctionnement s'est étalé sur une période de 18 mois entre avril 2016 et septembre 2017.

3.2.2.2 Premiers résultats du suivi

Le volume total d'eau d'exhaure mesuré sur la période du 01/04/2016 au 30/09/2017 au niveau de l'Institut des Sciences des Plantes de Paris-Saclay s'élève à 171 m³. Sur la période de septembre 2016 à septembre 2017, qui exclut les évènements exceptionnels de mai 2016, le volume annuel prélevé dans la nappe atteint environ 100 m³. L'interprétation de ce volume reste assez difficile en absence d'informations complémentaires sur le plan de drainage du bâtiment. Un tel volume apparaît néanmoins relativement faible au regard de la surface du bâtiment ; rapportés à cette dernière les volumes prélevés n'atteignent ainsi qu'une vingtaine de millimètres.

Le débit moyen correspondant à ce volume annuel se révèle très nettement inférieur aux estimations mentionnées dans les études antérieures : les travaux de Geother (2014) aboutissent ainsi à une valeur de 125 l/h contre 10 l/h pour le suivi mené du 01/04/2016 au 30/09/2017. Si l'hypothèse d'une influence des travaux réalisés à proximité du bâtiment IPS2 pourrait être avancée pour expliquer ces différences, il convient probablement de demeurer prudent dans l'interprétation des résultats de l'étude de

Geother en raison de la faible durée d'observations considérée pour l'estimation de ce débit. (La comparaison des niveaux de nappes mesurés à l'époque à ceux observés sur la période d'instrumentation du bâtiment IPS2 ne permet par ailleurs pas réellement de conclure à un impact des travaux à proximité du bâtiment IPS2).

Les variations des volumes journaliers prélevés au niveau du bâtiment sont présentées dans le graphique ci-dessous :

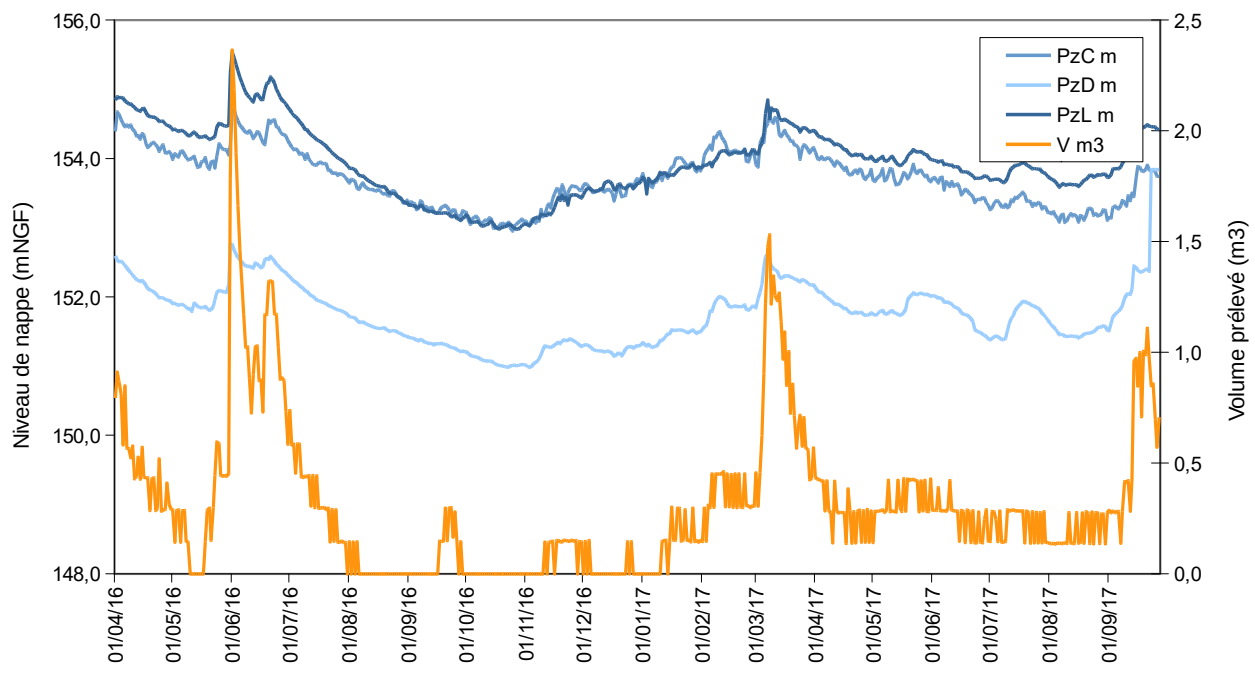


Figure 45: Evolution des volumes journaliers collectés sous l'amphithéâtre de l'institut des sciences des plantes et des niveaux de nappes sur trois piézomètres proches sur la période d'instrumentation

Le graphique précédent met clairement en évidence l'influence des variations du niveau de la nappe superficielle sur les volumes collectés par le dispositif de drainage de l'Institut des Sciences des Plantes. L'élévation du niveau piézométrique se traduit ainsi par une forte augmentation des volumes journaliers prélevés au niveau du puisard, tandis que certaines périodes de basses eaux s'accompagnent d'une quasi absence de pompages. Les graphiques ci-dessous permettent de confirmer les observations précédentes, tout en renseignant sur le caractère non-linéaire de la relation hauteur de nappe - débit d'exhaure :

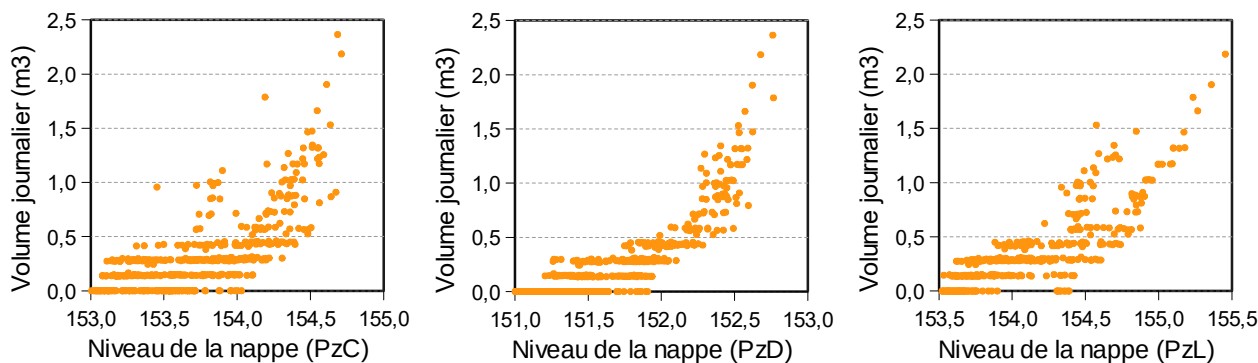


Figure 46: Relation niveau de nappe débit d'exhaure pour les piézomètres C, D et L

3.2.3 Cartographie de la surface piézométrique

3.2.3.1 Recensement des piézomètres et campagnes de mesures manuelles

En complément de l'instrumentation de ses piézomètres, le Cerema s'est attaché à recenser de façon aussi exhaustive que possible les piézomètres installés par différents maîtres d'ouvrage dans le cadre de leurs études géotechniques. 135 piézomètres ont ainsi été recensés dans la zone d'étude, dont 37 étaient encore fonctionnels en octobre 2017 (Figure 47). Les piézomètres se concentrent sur la partie Est de la ZAC du Moulon.

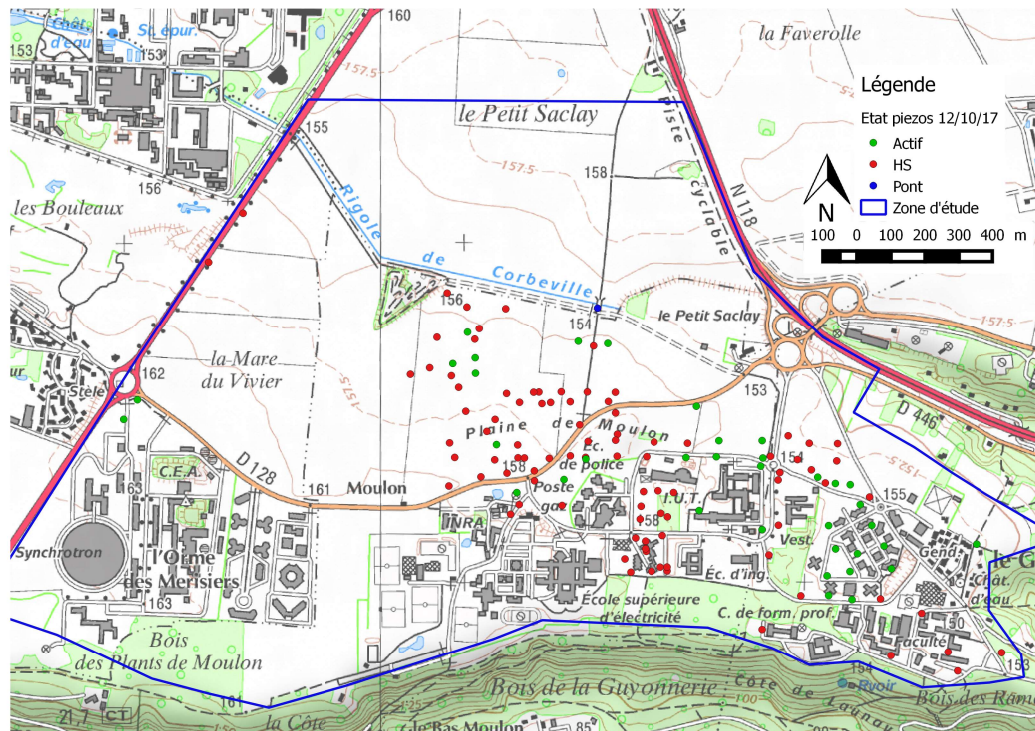


Figure 47: Recensement des piézomètres installés sur la ZAC du Moulon

Le Cerema a ensuite réalisé de façon périodique des campagnes de relevés piézométriques dans l'ensemble des piézomètres installés sur la ZAC du Moulon. 17 campagnes de relevés piézométriques ont ainsi été effectuées entre le 24/06/14 et le 12/10/17. Les piézomètres installés dans le cadre d'études géotechniques sont en général détruits assez rapidement, si bien que le nombre de piézomètres relevés lors des différentes campagnes a varié significativement (de 26 à 45). Selon les périodes, certains secteurs de la ZAC du Moulon ont pu bénéficier d'une meilleure couverture. Le niveau d'eau dans la Rigole de Corbeville a également été mesuré en prenant comme référence le sommet du pont la traversant à proximité du PzB, nivelé par le Cerema.

3.2.3.2 Niveaux d'eau relevés en forage et présence d'eau dans les fouilles

Certains rapports d'études géotechniques mentionnent de façon systématique la présence d'eau ou non dans les forages. C'est notamment le cas des études réalisées par le bureau d'étude SAGA, titulaire du marché d'études géotechniques de l'EPAPS. Ce niveau d'eau a pu être mesuré lors du forage, ou à la fin des investigations, avant rebouchage des forages. Le niveau d'eau mesuré ne constitue donc pas nécessairement un niveau d'eau stabilisé, et il semble peu pertinent de comparer les différents niveaux

mesurés. Il est en revanche intéressant de géo-référencer ces sondages afin de distinguer les zones où la présence d'eau est systématique, de celles où elle est plus aléatoire. Afin de disposer de données relativement homogènes, seuls les sondages réalisés par SAGA et par le Cerema ont été utilisés. Ils permettent néanmoins de bien couvrir la ZAC du Moulon.

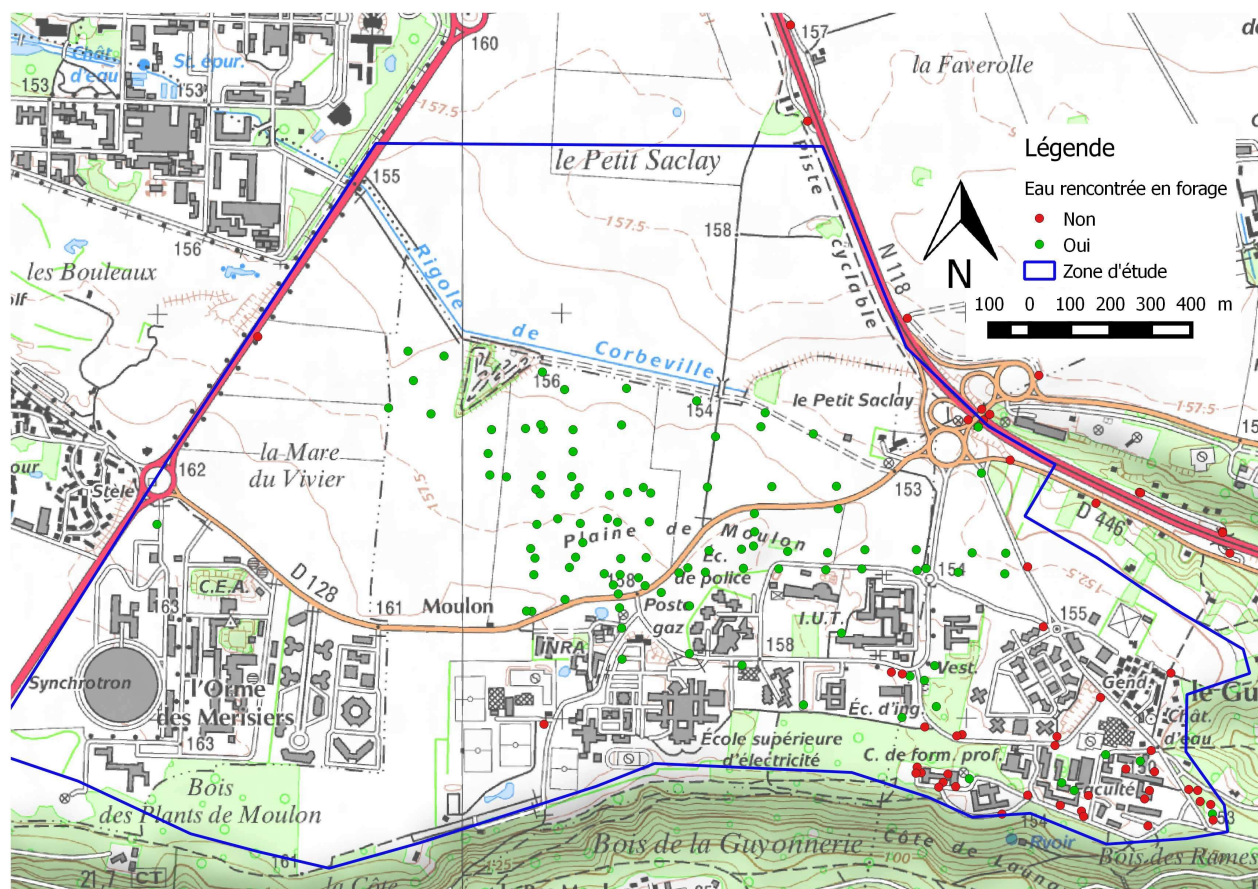


Figure 48: Carte des sondages dans lesquels des venues d'eau ont été observées

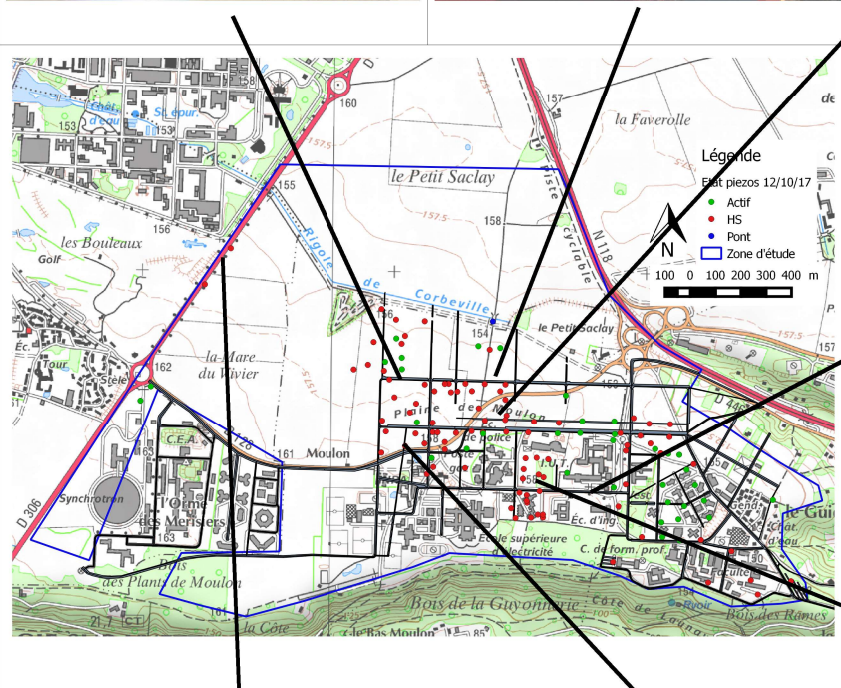
La carte obtenue permet de distinguer très clairement deux zones :

- la partie centrale et la partie nord de la ZAC du Moulon, où de l'eau a systématiquement été rencontrée en forage,
- la partie sud-est de la zone de la ZAC où des niveaux d'eau ont épisodiquement été rencontrés, mais où la plupart des sondages étaient secs.

La présence d'eaux souterraines sur la majeure partie de la ZAC a par ailleurs pu être vérifiée lors des travaux de terrassement de différents chantiers, comme le montrent les photos ci-dessous (Figure 49). On notera que le niveau d'eau dans les fouilles ainsi que les débits d'exhaure varient grandement selon les périodes du cycle hydrologique. Il n'a pas été possible de disposer de retours d'expérience quantitatifs sur les volumes d'eau pompés en phase chantier. Si les venues d'eau lors des terrassements de l'École Centrale Paris, réalisés lors du printemps et de l'été 2015, semblent avoir été relativement faibles, des venues d'eau beaucoup plus importantes ont été signalées ou observées par le Cerema dans le cadre d'autres travaux de terrassement, comme ceux du bâtiment DIGITEO ou de l'École Normale Paris Saclay. Lors des pompages réalisés en phase chantier, il est cependant souvent difficile de distinguer la part des eaux souterraines de celle des eaux de ruissellement, issues des précipitations.



Figure 49: Venues d'eau observées dans diverses fouilles de la ZAC du Moulon





3.2.3.3 Cartes piézométriques

Des cartes piézométriques ont été dressées en interpolant les niveaux d'eau mesurés lors des campagnes de relevés piézométriques. Ces interpolations ont été réalisées par krigeage avec variogramme linéaire sans dérive, à l'aide du logiciel GDM (Version 2014, BRGM). Cette méthode présente l'avantage d'être assez robuste et en général bien adaptée pour l'interpolation de surfaces piézométriques. Le résultat des interpolations a ensuite été importé sous QGis, et les courbes isopièzes ont été légèrement modifiées, notamment pour supprimer certains artefacts de l'interpolation.

Les cartes piézométriques de juin 2014, mars 2015, mars 2016 et novembre 2016 sont présentées ci-dessous. Elles correspondent à 3 périodes hydrologiques différentes, et reflètent par ailleurs des stades d'aménagement de la ZAC différents. Les premières interpolations ont été effectuées en utilisant l'intégralité des piézomètres mesurés, et sans ajouter aucun point. Dans un deuxième temps, certains piézomètres au comportement suspect ont pu être écartés, et des points correspondants aux niveaux d'eau dans la rigole de Corbeville ont été ajoutés. Cette démarche progressive est décrite pour la carte de juin 2014.

a . Carte piézométrique du 24 juin 2014

Le 24 juin 2014, les niveaux d'eau ont été mesurés dans 34 piézomètres, dont près de la moitié se situait dans les anciennes parcelles agricoles entre la rigole de Corbeville et la RD128. Lors de ce relevé, des travaux de terrassement avaient lieu le long de la RD128 et la RN306. Le Cerema a ainsi pu observer, le 24 juin, la présence d'eau dans toutes les fouilles situées entre le rond point de Saint-Aubin et la rigole de Corbeville (Figures 50 et 51). Dans la mesure où il n'y avait eu aucune précipitation durant les deux semaines précédant le relevé, il a été supposé que les niveaux d'eau présents dans les fouilles pouvaient être considérés comme représentatifs du niveau de la nappe superficielle, et une mesure a été effectuée dans une fouille située à proximité du PzJ (Figure 51).



Figure 50: Venues d'eau dans une fouille située le long de la RN306 (24 juin 2014)



Figure 51: Mesure du niveau d'eau et prélèvement d'eau dans une fouille le long de la RN306 (24 juin 2014)

Une première interpolation a été réalisée en utilisant tous les niveaux d'eau mesurés dans des piézomètres, sans tenir compte de la rigole de Corbeville ni de l'eau présente dans les fouilles (non-montrée). Une seconde interpolation a été réalisée en ajoutant :

- 4 points au niveau de la rigole (la cote du radier de la rigole fournie dans le rapport d'Artelia (2013) a été utilisée),
- 1 point correspondant au niveau d'eau mesuré dans la fouille située à proximité du PzJ, en prenant comme repère de nivellement ce piézomètre.

Bien que la précision de la mesure effectuée dans la fouille ne soit pas aussi bonne que pour les autres relevés piézométriques, cela a permis de disposer d'un point dans une zone où aucune information sur le niveau de la nappe phréatique n'était disponible, hormis les niveaux d'eau mesurés dans le PzJ, jugés peu représentatifs (niveaux d'eaux occasionnels, situés entre 8,2 et 8,9 m de profondeur).

La figure 52 présente les résultats de cette interpolation. Les niveaux de nappe diminuent graduellement, ce qui laisse supposer l'existence de circulations horizontales des eaux souterraines, et donc d'une nappe phréatique continue dans la majeure partie de la zone étudiée. Les sens d'écoulement sont orientés à l'Est et au Nord Est vers le thalweg de Corbeville, et au Nord vers la rigole de Corbeville, qui semble jouer le rôle d'axe de drainage. Les gradients sont relativement élevés, de l'ordre de 5 à 10‰ (par exemple, 7,5‰ entre le PzA et le PzB, et 6,9‰ entre le PzA et le PzD). Ces sens d'écoulement sont cohérents avec le pendage des couches géologiques, mis en évidence à l'aide du modèle géologique, ainsi qu'avec le tracé initial de la rigole de Corbeville, dont la branche sud, aujourd'hui disparue, devait capter les eaux s'écoulant à l'est vers le thalweg de Corbeville (Figure 20).

La comparaison des relevés effectués le 24 juin 2014 avec les chroniques des piézomètres instrumentés montre que le niveau de la nappe est représentatif d'un niveau de moyennes eaux.

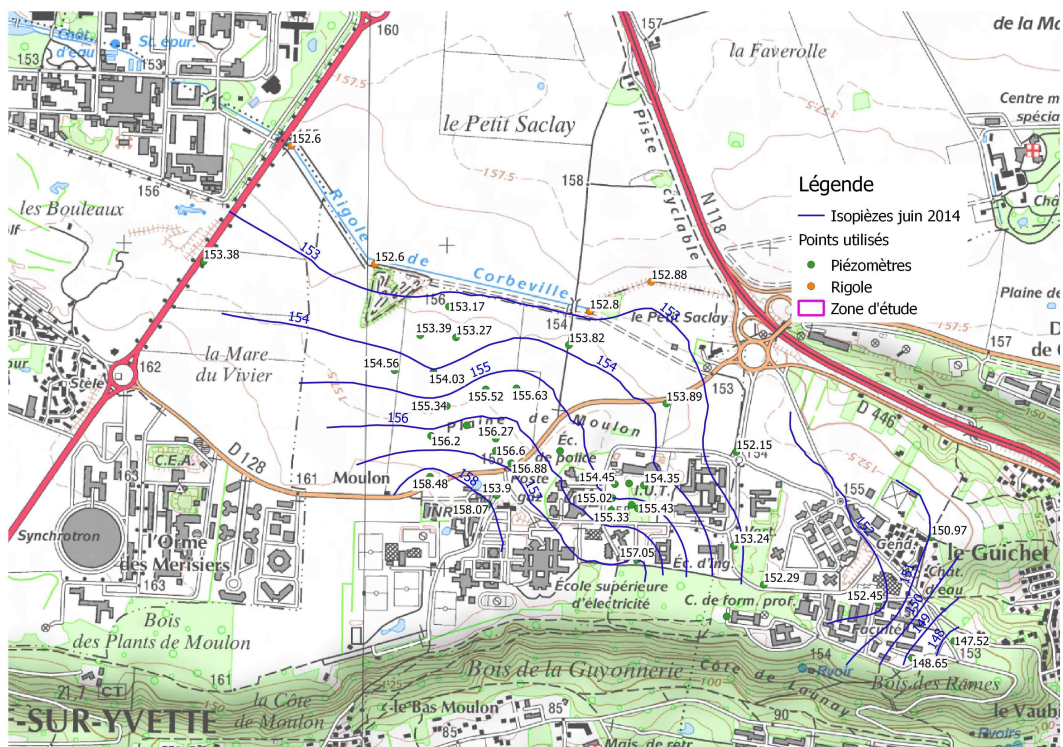


Figure 52: Carte piézométrique obtenue par interpolation des niveaux d'eau mesurés le 24 juin 2014

b . Cartes piézométriques de hautes eaux mars 2015 et mars 2016

Des interpolations ont ensuite été réalisées à partir des relevés du 25 mars 2015 (43 piézomètres) et du 8 mars 2016 (43 piézomètres), correspondant à la période de hautes eaux. De la même manière que pour l'interpolation du 24 juin 2014, 4 points ont été ajoutés au niveau de la rigole.

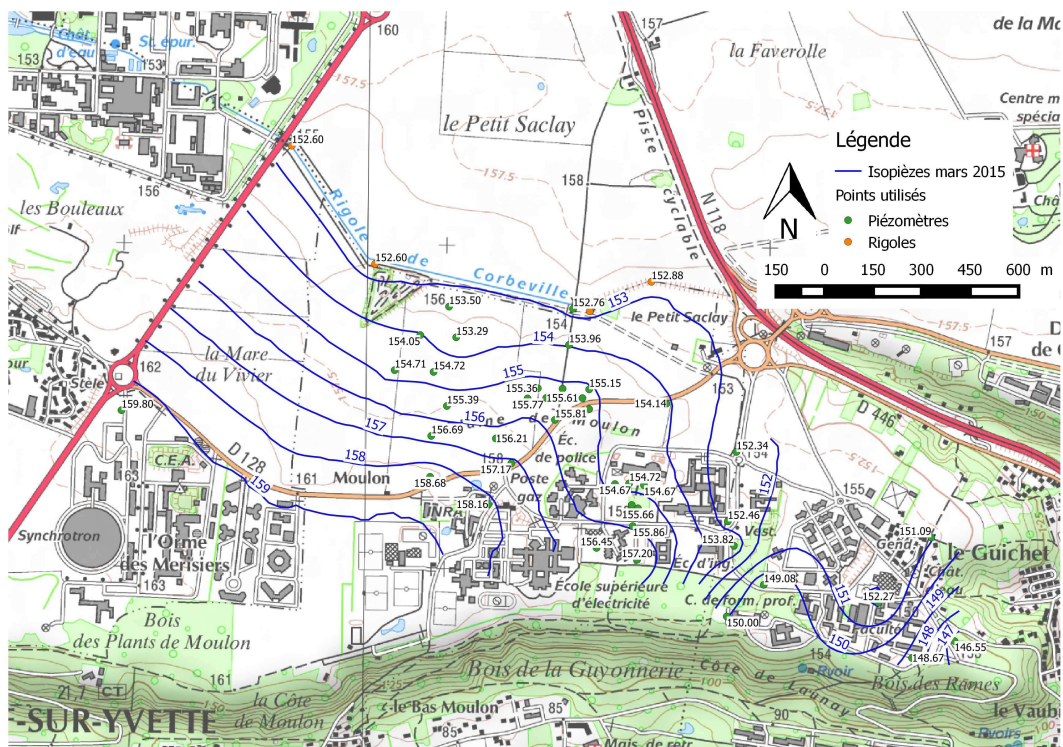


Figure 53: Carte piézométrique obtenue par interpolation des niveaux d'eau mesurés le 25 mars 2015

Ces interpolations confirment les sens d'écoulement obtenus précédemment en période de moyennes eaux (relevé de juin 2014). On retrouve notamment la ligne de partage des eaux suivant grossièrement la RD128 en partie nord-est de la ZAC du Moulon, et qui correspond à une « crête » topographique. La répartition spatiale des piézomètres a cependant fortement évolué entre mars 2015 et mars 2016, si bien que des différences significatives peuvent être observées localement. En mars 2016, la plupart des piézomètres situés dans les parcelles agricoles entre la RD128 et la rigole de Corbeville avaient été détruits, mais 16 piézomètres ont été installés par l'EPAPS le long des voies de bus en site propre, dans l'axe de la rue Noetzlin. Ces 16 piézomètres sont répartis en deux transects parallèles qui encadrent des ouvrages de gestion des eaux pluviales, dont certains sont enterrés, et d'autres à ciel ouvert, comme le bassin de rétention non étanche construit en face de l'IUT (bassin dit du DECK) au début de l'année 2015 (Figure 54 et 55).



Figure 54: Bassin du DECK (mai 2015)



Figure 55: Bassin du DECK (février 2018)

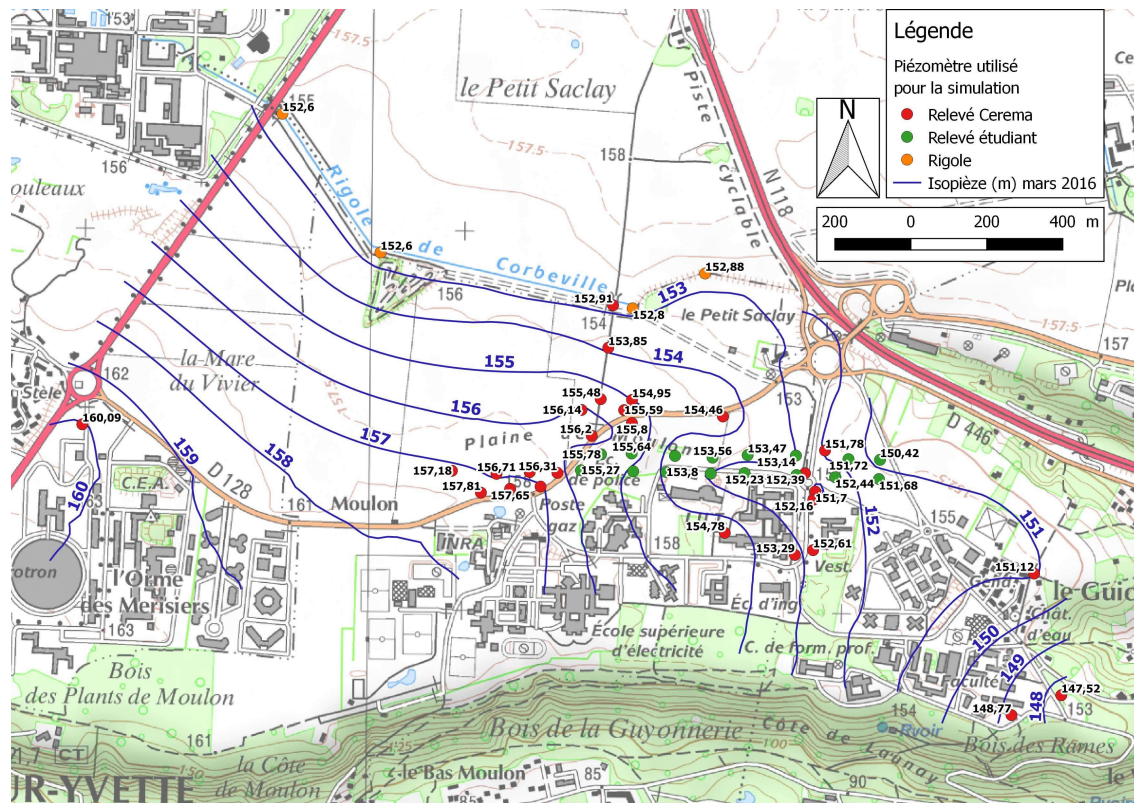


Figure 56: Carte piézométrique obtenue par interpolation des niveaux d'eau mesurés le 8 mars 2016

Plusieurs limites de ces interpolations peuvent toutefois être soulignées. Le manque de points en partie ouest de la zone d'étude rend peu fiable le résultat des interpolations, ce qui explique l'allure très régulière et peu naturelle des courbes isopièzes obtenues pour cette partie de la ZAC. Le résultat des interpolations est également assez incertain dans la partie sud est de la ZAC, où l'analyse de la présence d'eau en forage peut laisser penser qu'il y aurait plutôt des poches d'eau déconnectées les unes des autres qu'une véritable nappe.

Plateaux, 43 dans les Argiles à Meulière, 58 dans les Formations de Lozère / Argiles à Meulière et 13 dans les Sables de Fontainebleau. De même que pour l'élaboration du modèle géologique, il est souvent difficile de distinguer, sur la base des coupes de sondages, les Argiles à Meulière des Formations de Lozère. Lorsque le faciès dans lequel l'essai a été réalisé semblait correspondre clairement aux Argiles à Meulière, l'essai a été rattaché aux Argiles à Meulière. Dans le cas contraire, l'essai a été rattaché à la catégorie Formations de Lozère / Argiles à Meulière. Le tableau 7 récapitule les valeurs statistiques obtenues par formation. La répartition des essais en fonction des classes de perméabilité est représentée, pour chaque formation, dans la Figure 58.

K (m/s)	LP	AM	FL/AM	SF
Nb essais	24	43	58	13
K min	$2,0 \cdot 10^{-9}$	$2,5 \cdot 10^{-9}$	$3,1 \cdot 10^{-9}$	$2,8 \cdot 10^{-7}$
K max	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$5,2 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$8,1 \cdot 10^{-6}$
K moy	$3,2 \cdot 10^{-6}$	$8,2 \cdot 10^{-7}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$2,8 \cdot 10^{-6}$
K med	$1,6 \cdot 10^{-7}$	$2,0 \cdot 10^{-7}$	$3,5 \cdot 10^{-7}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$
Ecart type	$4,6 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$8,2 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$

Tableau 7 – Synthèse des résultats des essais de perméabilité réalisés sur la ZAC du Moulon

Les résultats obtenus pour les formations superficielles font état d'une grande variabilité (valeurs comprises entre $2,0 \cdot 10^{-9}$ et $3,0 \cdot 10^{-5}$ m/s) et ne permettent pas de différencier nettement les perméabilités de ces formations. La répartition des perméabilités obtenues pour les Limons semble être perméable, alors qu'elle est plutôt mono-modale pour les autres formations (Figure 58). Les perméabilités des Limons se regroupent ainsi autour d'un pôle très peu perméable (10^{-8} – 10^{-9} m/s), et d'un pôle plus perméable (10^{-6} m/s).

Les perméabilités obtenues pour les Argiles à Meulière sont légèrement plus faibles que celles obtenues pour les Argiles à Meulière et Formations de Lozère indifférenciées, mais cette différence est peu marquée. La comparaison est par ailleurs rendue difficile à cause du biais constitué par les descriptions peu précises des coupes de sondages.

On notera que certains essais ont pu être réalisés à plusieurs profondeurs dans le même forage. Pour ces forages, selon les cas, les perméabilités obtenues dans les Limons pouvaient être soit supérieures soit inférieures à celles des Argiles à Meulière / Formations de Lozère.

Enfin, les perméabilités des Sables de Fontainebleau sont nettement plus homogènes, avec une valeur moyenne de $2,0 \cdot 10^{-6}$ m/s, cohérente avec les valeurs bibliographiques, bien que légèrement plus faibles. On notera que les valeurs de perméabilité pour les Sables de Fontainebleau proviennent toutes des études géotechniques du Synchrotron, ce qui limite les biais liés au type d'essai et à l'opérateur.

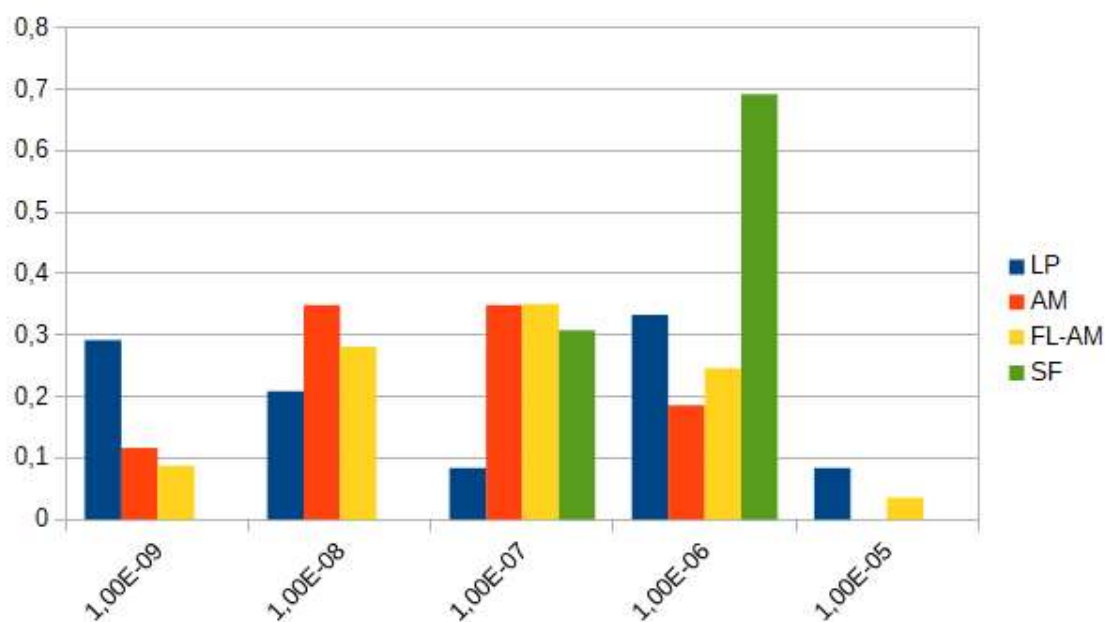


Figure 58: Classes de perméabilité en fonction des formations obtenues à partir des essais des perméabilité

Il est par ailleurs intéressant d'examiner les perméabilités obtenues en fonction du type d'essai réalisé (Tableau 8). Pour cette comparaison, tous les essais réalisés dans les Argiles à Meulière et les Formations de Lozère ont été regroupés. Il en ressort globalement que les essais superficiels de type Porchet donnent en général des perméabilités plus élevées que les essais réalisés à plus grande profondeur (Lefranc ou essai dans des piézomètres). Ce résultat est particulièrement flagrant pour les Limons des Plateaux, où la perméabilité obtenue est de $3,0 \cdot 10^{-6}$ en moyenne avec les essais Porchet et de l'ordre $1,0 \cdot 10^{-8}$ avec les essais Lefranc/Nasberg. Ces différences pourraient s'expliquer par l'existence d'une macro-porosité à faible profondeur, notamment due au réseau racinaire, mais pourrait également provenir des protocoles expérimentaux.

K (m/s)	Lefranc / Nasberg		Essai piézomètre		Porchet	
	LP	FL/AM	LP	FL/AM	LP	FL/AM
Nb essais	10	69	3	24	8	7
K min	$2,0 \cdot 10^{-9}$	$2,5 \cdot 10^{-9}$	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$2,7 \cdot 10^{-7}$	$8,3 \cdot 10^{-7}$
K max	$5,3 \cdot 10^{-8}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$7,5 \cdot 10^{-7}$	$2,8 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$5,2 \cdot 10^{-6}$
K moy	$1,4 \cdot 10^{-8}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-7}$	$5,6 \cdot 10^{-7}$	$6,3 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-6}$
K med	$4,3 \cdot 10^{-9}$	$2,6 \cdot 10^{-7}$	$4,7 \cdot 10^{-8}$	$3,0 \cdot 10^{-7}$	$6,8 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$
Ecart type	$1,9 \cdot 10^{-8}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$	$4,1 \cdot 10^{-7}$	$7,1 \cdot 10^{-7}$	$4,5 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$

Tableau 8 – Synthèse des résultats des essais de perméabilité réalisés sur la ZAC du Moulon, en fonction du type d'essai

3.3 Synthèse / Perspectives

Les interpolations des niveaux piézométriques, réalisées à plusieurs périodes, ont mis en évidence des gradients hydrauliques marqués, qui tendent à montrer l'existence de circulations d'eau horizontales sur la majeure partie de la zone d'étude. Les sens d'écoulement sont orientés à l'Est et au Nord Est vers le thalweg de Corbeville, et au Nord vers la rigole de Corbeville, qui semble jouer le rôle d'axe de drainage. Ces sens d'écoulement sont cohérents avec l'abaissement du toit des formations géologiques en direction du thalweg et de son prolongement, où passe la rigole. La figure 59 présente les profils hydrogéologiques obtenus pour les relevés de mars 2015 (hautes eaux) et novembre 2016 (basses eaux).

L'observation des niveaux d'eau en forage, la présence d'eau dans les fouilles, l'analyse des chroniques piézométriques ainsi que la corrélation entre les fluctuations des niveaux de nappe et des débits d'exhaure mesurés dans le bâtiment de l'Institut des Sciences des Plantes de Paris-Saclay (IPS2) confirment la présence d'une nappe superficielle sur la majeure partie de la ZAC du Moulon. La présence d'eau souterraine au sud et au sud est de la ZAC est en revanche plus aléatoire, ce qui pourrait s'expliquer dans cette zone par une épaisseur moindre de Limons des Plateaux et de Formations de Lozère. Il est ainsi plus difficile d'identifier des circulations horizontales franches au sud et au sud est de la ZAC, et il est possible que l'eau y soit plutôt présente sous forme de poches déconnectées les unes des autres. Des facteurs anthropiques (construction des bâtiments de l'université) pourraient également avoir perturbé le fonctionnement hydrogéologique de cette zone (construction de bâtiment, mise en communication de la nappe superficielle de la nappe des Sables de Fontainebleau, remblaiement de la rigole de Corbeville).

Il semble par ailleurs très probable que la nappe superficielle ne baigne pas seulement les Limons des Plateaux, comme cela est considéré dans certains rapports d'études géotechniques, car des venues d'eau ont pu être observées en forage dans les Formations de Lozère ou les Argiles à Meulière, et que les niveaux piézométriques peuvent par ailleurs s'abaisser sous la base des Limons (Figure 59).

Cette étude a ainsi permis de grandement améliorer la compréhension du fonctionnement hydrogéologique de la ZAC du Moulon, mais l'estimation des débits d'exhaure reste très difficile, notamment en raison des incertitudes qui demeurent sur la perméabilité de ces formations superficielles. L'analyse des perméabilités a en effet révélé une très forte variabilité des valeurs, qui s'explique en partie par l'hétérogénéité de ces formations superficielles mais aussi par les incertitudes inhérentes aux essais employés pour mesurer la perméabilité.

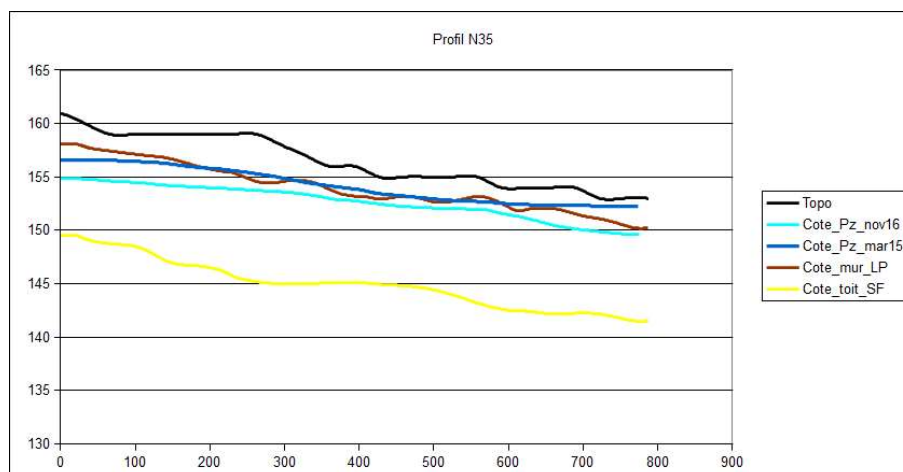
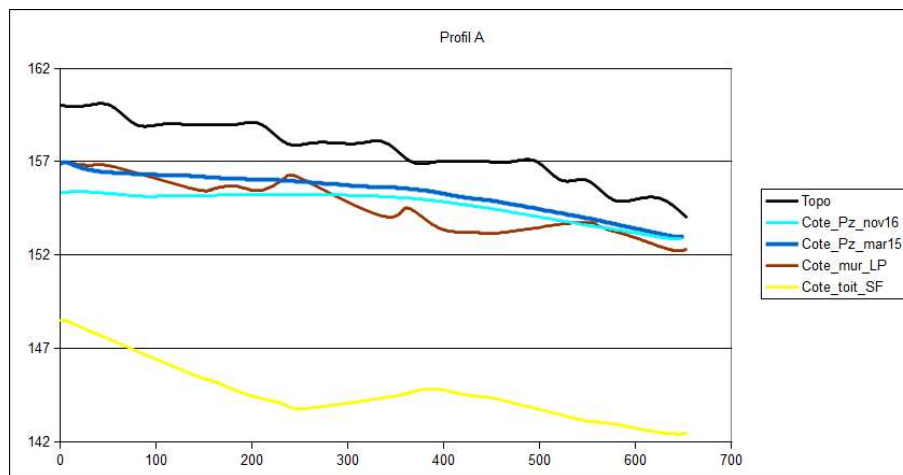
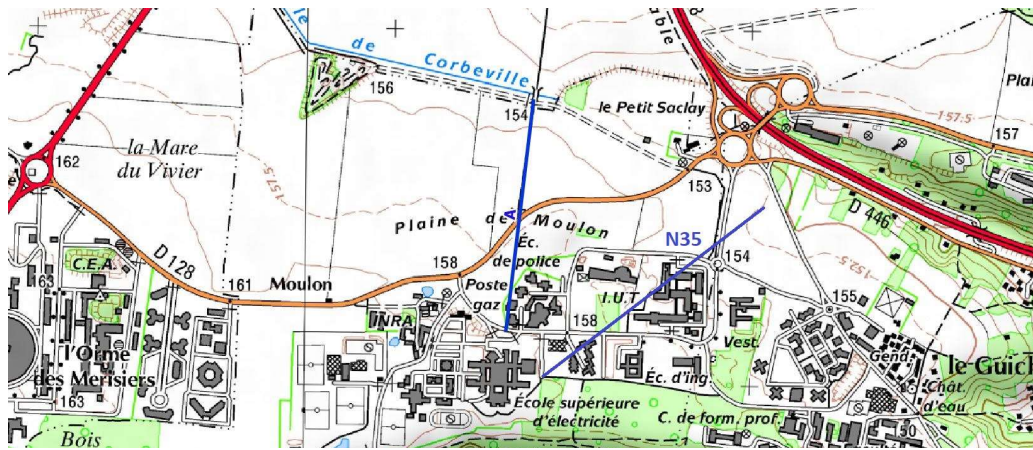


Figure 59: Profils hydrogéologiques obtenues à partir des relevés de mars 2015 et novembre 2016

Le suivi des débits d'exhaure dans le bâtiment IPS2 a permis de mettre en évidence l'influence des fluctuations du niveau de la nappe sur les débits collectés par le système de drainage. L'absence d'informations sur le réseau de drainage de ce bâtiment limite clairement la portée des enseignements et il serait particulièrement intéressant de mettre en place d'autres suivis des débits d'exhaure dans des bâtiments existant, mais aussi de disposer de plus de retours d'expérience en phase chantier sur ces débits. Ces retours d'expérience, en phase chantier et exploitation, constituent le meilleur moyen pour estimer

la perméabilité « en grand » des formations superficielles, calculer de façon plus fiable les débits d'exhaure pour de nouveaux bâtiments, et alimenter les travaux de modélisation hydrologique numérique.

Enfin, l'estimation des impacts cumulés d'aménagement aux effets contraires (rabattement de la nappe dû au drainage de certains bâtiments d'une part, et recharge de la nappe par les ouvrages d'infiltration des eaux pluviales) est particulièrement complexe. Le suivi piézométrique mis en place a déjà permis d'identifier certains impacts d'aménagements anthropiques sur le fonctionnement hydrogéologique de la zone d'étude (circulations d'eau probables dans le tronçon remblayé de la rigole de Corbeville, influence du bassin du DECK). Cette étude hydrogéologique de la ZAC du Moulon présente la particularité d'avoir pu commencer suffisamment tôt le suivi piézométrique pour disposer d'un état initial. Il semble donc particulièrement intéressant de poursuivre ce suivi piézométrique en le complétant de suivis des débits d'exhaure afin de pouvoir observer l'impact réel des aménagements. Pour cela, il serait nécessaire de compléter le réseau piézométrique mis en place par le Cerema en améliorant la couverture de la ZAC et en ciblant certains aménagements interagissant avec la nappe (bâtiment où les débits sont instrumentés, ouvrage d'infiltration, zone des « casiers »). De nouveaux piézomètres pourraient aussi être installés dans des zones où les travaux sont terminés. En outre, la caractérisation fine de la géologie et de l'hydrogéologie de la zone d'étude pourrait opportunément être utilisée pour mener des modélisations hydrogéologiques numériques, qui permettraient de valider les hypothèses faites sur le fonctionnement hydrogéologique de la nappe superficielle et de comparer les résultats obtenus avec deux types de modèle (modèle hydrogéologique et modèle URBS).

4 Action III : Développement et évaluation d'un modèle hydrologique urbain intégré

4.1 Contexte et objectifs

4.1.1 Le modèle URBS et son application à la ZAC de Moulon

4.1.1.1 Principe général

L'étude du fonctionnement hydrologique des milieux construits est rendue particulièrement délicate par leur hétérogénéité et la multiplicité des objets urbains (surfaces revêtues, réseaux souterrains, ouvrages de gestion des eaux pluviales...) susceptibles de perturber les flux hydriques en surface comme dans le sous-sol. Le modèle URBS, développé par l'IFSTTAR (Morena, 2004 ; Rodriguez et al., 2008), fait aujourd'hui l'objet d'un codéveloppement avec le Cerema, initié dans le cadre de la thèse d'Yinghao Li (2015). Ce modèle apparaît comme l'un des rares outils offrant une représentation intégrée du cycle de l'eau urbain.

Le modèle URBS est un modèle distribué : ce dernier repose sur une discrétisation des bassins versants étudiés en plusieurs entités spatiales et offre par conséquent la possibilité de rendre compte de l'hétérogénéité des surfaces, du sous-sol et des processus hydrologiques dont ils sont le lieu. L'une des particularités du modèle URBS réside dans le choix d'une description à l'échelle de la parcelle cadastrale des processus hydrologiques, ce qui permet d'une part de s'appuyer sur des bases de données urbaines pour alimenter le modèle, et fournit d'autre part une représentation assez cohérente du processus de transfert des parcelles vers le réseau (cf. Figure 60).

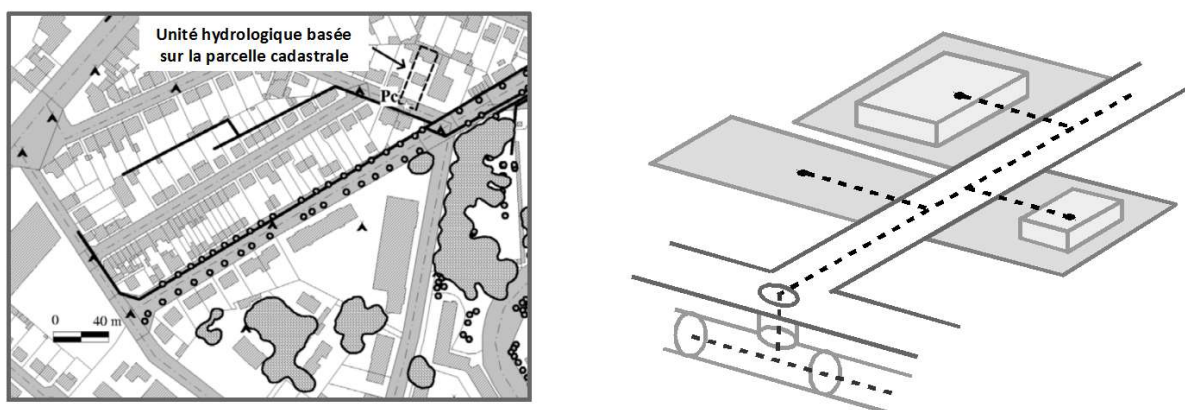


Figure 60 - Discretisation adoptée dans URBS: découpage du bassin versant en unités hydrologiques basées sur la parcelle cadastrale connectées au réseau viaire et souterrain

Chaque unité hydrologique, correspondant à une parcelle cadastrale et la portion de voirie adjacente, est raccordée au réseau viaire lequel est lui-même connecté au réseau d'assainissement. La représentation de ces unités hydrologiques s'appuie sur la

description de trois profils verticaux, correspondant à trois types d'occupation du sol (surfaces naturelles, voiries et bâtiments). Ces profils sont eux même représentés par une succession de réservoirs permettant de simuler différents flux hydriques en surface et dans le sous-sol en distinguant zone saturée et non-saturée (cf. Figure 61).

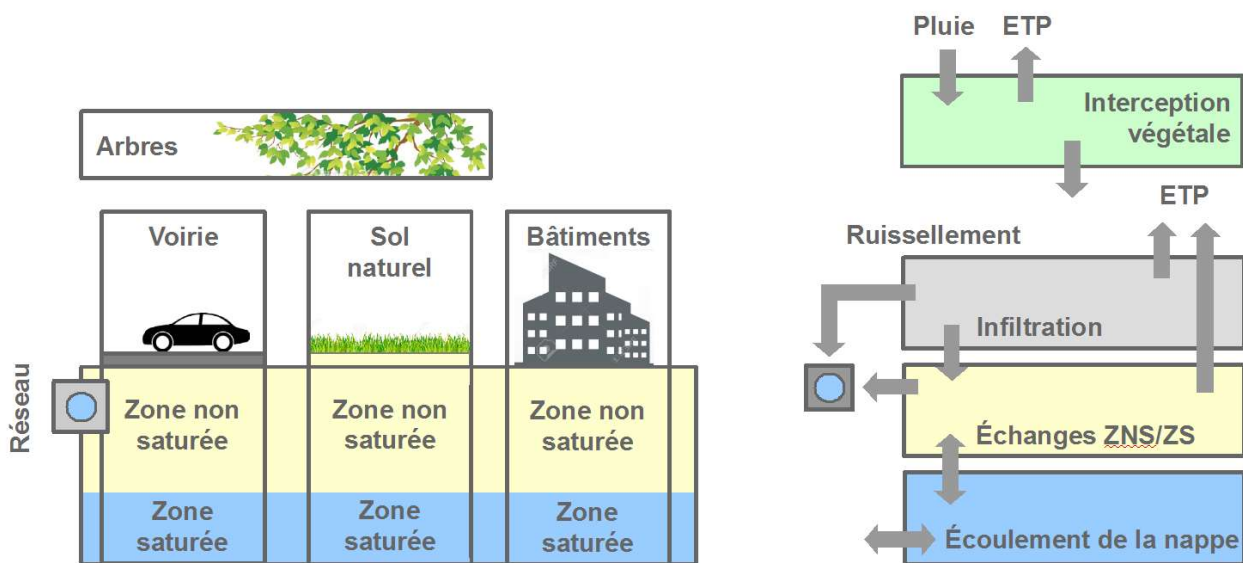


Figure 61 - Représentation de l'unité hydrologique dans URBS (découpage selon trois profils d'occupation des sols représentés par 4 réservoirs)

La production du ruissellement peut ainsi être modélisée au niveau de chaque unité hydrologique en tenant compte de l'occupation des sols. Les processus de transfert dans le réseau d'assainissement sont décrits à partir d'un modèle relativement simple de propagation des débits de l'amont vers l'aval (méthode de Muskingum), lequel s'avère particulièrement adapté pour les simulations sur des périodes longues qui constituent la principale application du modèle URBS.

Outre la représentation des trois types d'occupation des sols au niveau de l'unité hydrologique, le modèle offre également la possibilité de simuler plusieurs techniques « alternatives » de gestion des eaux pluviales telles que les noues ou les toitures stockantes (végétalisées ou non). Dans l'application proposée par la suite, ces techniques se limiteront aux noues végétalisées dont la représentation a pu être consolidée dans le cadre de ce partenariat. Le schéma de modélisation des noues est présentée en 4.2.2.2.

4.1.1.2 Applications au cas d'étude de la ZAC de Moulon

La modélisation hydrologique de la ZAC de Moulon à partir du modèle URBS (Li, 2015) constitue la première application de cet outil à un projet d'aménagement réel. Ce travail, initié en 2011, avait pour objectif d'améliorer la compréhension du fonctionnement hydrologique de la ZAC et d'évaluer l'impact du projet sur le cycle de l'eau. Les spécificités hydrogéologiques de la zone d'étude ont conduit à interroger plus particulièrement l'incidence de l'aménagement sur le niveau de la nappe superficielle (déjà quasi-affleurante en certains points de la ZAC) et les modalités de gestion des eaux pluviales compte tenu de la faible perméabilité des formations géologiques de surface.

La validation des simulations effectuées pour l'état « initial » (avant que ne débutent les travaux liés au projet d'aménagement) s'est essentiellement appuyée sur des observations du niveau de la nappe superficielle en différents points du bassin versant. Le

recours à ce type de données constitue l'une des originalités de l'application de URBS à la ZAC de Moulon : outre les difficultés méthodologiques soulevées par l'utilisation de sources multiples mais localisées d'information, cette approche donne une place particulièrement importante aux processus de subsurfaces dont la représentation s'avère souvent très sommaire en hydrologie urbaine.

Les travaux menés dans le cadre de la thèse d'Yinghao Li (2015) ont alors été l'occasion de contribuer au développement du modèle URBS, en améliorant notamment la représentation des flux souterrains dans la zone saturée de manière à mieux reproduire la variabilité spatiale et temporelle du niveau de la nappe superficielle.

Les simulations réalisées pour l'état initial se sont avérées assez concluantes, le modèle permettant de reproduire de façon satisfaisante les fluctuations des niveaux de nappe mesurés sur une majorité de piézomètres. Des écarts importants ont néanmoins été observés en certains points du bassin versants entre les niveaux de nappes mesurés et simulés, suggérant que les modélisations effectuées ne rendaient compte que de façon partielle de la variabilité des caractéristiques et des processus hydrologiques sur la zone d'étude.

La paramétrisation du modèle utilisée à l'état initial pour reproduire les observations piézométriques a par la suite été conservée pour évaluer l'incidence de l'aménagement. Les résultats obtenus en intégrant dans les données d'entrées les modifications de l'occupation des sols et du réseau d'assainissement ont alors permis de conclure à une possible élévation du niveau de la nappe superficielle suite au projet d'aménagement (cf. Figure 62).

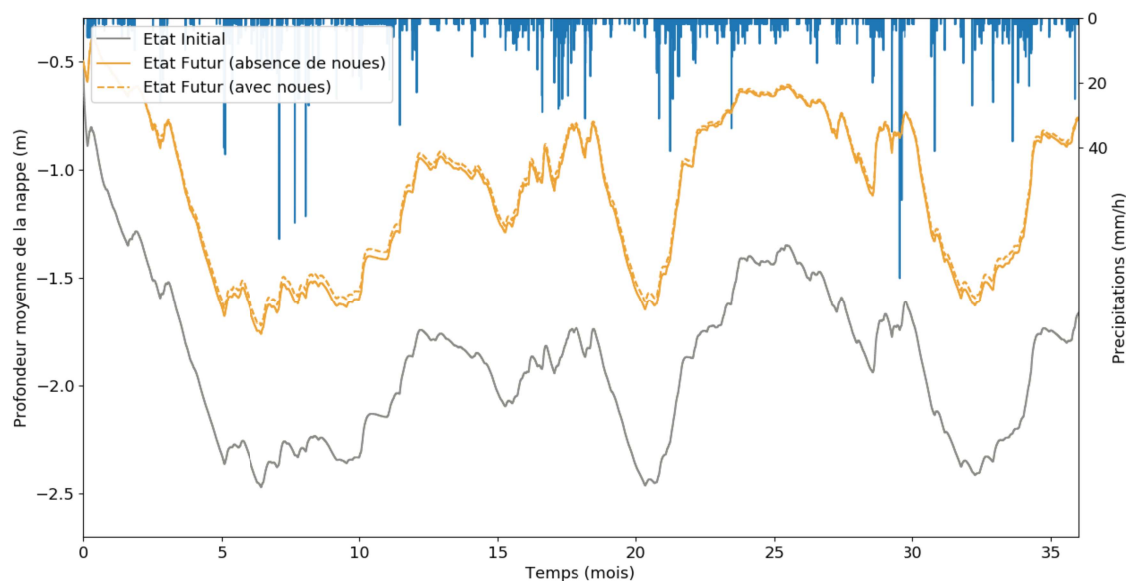


Figure 62 - Résultats obtenus à l'issue de la thèse d'Yinghao Li (2015) : évolution du niveau de la nappe suite à l'aménagement de la ZAC de Moulon

Différents scénarios de gestion des eaux pluviales ont alors pu être testés à l'état futur, afin notamment d'évaluer l'effet d'un transfert via des noues des volumes générés au niveau de certaines parcelles. De façon surprenante, la comparaison des niveaux de nappe simulés pour ces différents scénarios n'a pas permis de conclure à une incidence significative des dispositifs de gestion des eaux pluviales pour les configurations testées.

Cette première application du modèle URBS sur la ZAC de Moulon a permis d'illustrer l'intérêt d'un tel outil dans un contexte opérationnel, en apportant un certain nombre

d'éléments de réponse quant à l'impact du projet d'aménagement sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant étudié. Suite à ce travail, différentes pistes ont pu être avancées pour tenter d'expliquer certaines limites du modèle (notamment la difficulté à reproduire la variabilité des données piézométriques acquises sur la zone d'étude) et conforter les résultats obtenus en interrogeant notamment la représentation de certains processus.

Peuvent ainsi être mentionnées :

- La représentation du sous-sol qui demeure assez simpliste dans la version actuelle de URBS et qui pourrait être affinée afin de rendre compte de la variabilité horizontale et verticale des caractéristiques hydrogéologique du bassin versant.
- L'omission de certains processus tels que le drainage de la nappe au niveau des sous-sols de certains bâtiments, mal quantifié mais susceptible d'influencer localement ou de façon plus globale les niveaux de nappes simulés par le modèle.
- Des hypothèses sur les conditions d'écoulement de la nappe en limite du domaine de modélisation, telle que l'hypothèse d'un flux nul vers l'extérieur de la zone d'étude ou celle d'une absence d'interaction de la nappe superficielle avec la nappe des sables de Fontainebleau.
- La représentation peu réaliste des noues, qui ne permet pas de simuler de façon réellement satisfaisante l'infiltration des eaux pluviales (les volumes infiltrés étant excessivement réduits) ni de rendre compte du mode de fonctionnement envisagé par l'EPA Paris-Saclay qui imposera une régulation des débits à l'exutoire de ces ouvrages.
- Des questions autour du poids du flux d'infiltration de la nappe superficielle vers le réseau (respectivement évalué à 30 et 18% des précipitations à l'état initial et à l'état aménagé) et de son éventuelle sensibilité au prétraitement des données géographiques utilisées en entrée du modèle.

Les travaux de modélisation menés entre 2015 et 2017 dans le cadre de la convention avec l'EPA-Paris Saclay visaient à approfondir certains de ces questionnements afin de consolider les résultats obtenus à l'issue de la première phase du partenariat.

4.1.2 Objectifs dans le cadre de la convention 2015-2017

Les travaux menés par l'IFSTTAR et le Cerema entre 2015 et 2017 se sont essentiellement attachés à conforter la représentation du fonctionnement hydrologique de la ZAC de Moulon, à l'état initial et à l'état aménagé. De façon plus concrète, cette troisième action de la convention s'est articulée autour de :

- L'analyse de la sensibilité du modèle (et plus particulièrement des niveaux de nappes et des bilans hydriques simulés) à différents choix ou hypothèses de modélisation
- Le développement et l'implémentation de nouvelles fonctionnalités permettant de représenter d'une façon plus détaillée et a priori plus réaliste le fonctionnement hydrologique de la zone d'étude

Cette démarche de consolidation des résultats a été conduite de manière à approfondir certaines des difficultés ou interrogations soulevées à l'issue de la thèse d'Yinghao Li (2015), mais également pour répondre à des questionnements plus spécifiques formulés par l'EPA Paris-Saclay (effet d'une régulation des débits au niveau des noues, incidence d'une interaction de la nappe superficielle avec la nappe des sables, comportement du

bassin versant pour des pluies de projets...).

Bien qu'offrant des perspectives pour des applications opérationnelles, le modèle URBS demeure pour l'heure un outil de recherche. Comme indiqué en 4.1.1.2, l'application du modèle URBS à la ZAC de Moulon appelle encore à approfondir de nombreuses composantes du cadre de modélisation proposé. Face à l'étendue des questions scientifiques susceptibles d'être examinées, il s'est avéré nécessaire d'opérer des choix quant aux aspects de cette application à aborder dans la suite. Le travail de consolidation des résultats de modélisation effectué entre 2015 et 2017 s'est construit autour de trois « thématiques » :

- *La représentation des flux souterrains*, les écoulements de proches surfaces étant en effet au cœur des questionnements abordés dans le cadre du partenariat avec l'EPA-Paris-Saclay. Seront alors examinés : la modélisation des débits d'exhaure, les hypothèses sur les conditions aux limites dans le sous-sol et l'incidence d'une interaction entre la nappe superficielle et la nappe des sables.
- *Le fonctionnement du réseau hydrographique* constitué par le réseau viaire, le réseau d'assainissement et les techniques de gestion des eaux pluviales. L'étude de cette composante peut être justifiée par le fait que les débits rejetés par temps de pluie sont une préoccupation importante pour l'aménageur. Différents volets seront alors abordés : la modélisation des noues et de la régulation des débits, le fonctionnement du réseau d'assainissement et le comportement du bassin versant pour des pluies de projets.
- *L'incidence du prétraitement des données géographiques*, un sujet jusqu'alors traité de façon assez marginale dans les différentes applications de URBS, mais auquel les résultats d'Yinghao Li (2015) invitent à prêter d'avantage attention (suspicion d'une influence de la discrétisation sur certains termes du bilan hydrique).

Les avancées réalisées autour de ces différents sujets permettront enfin de proposer une « actualisation » des résultats de l'application du modèle URBS à la ZAC de Moulon et apporteront un éclairage sur les actions à mener pour poursuivre le développement de l'outil et préciser les impacts du projet d'aménagement.

4.2 Avancées 2015-2017

4.2.1 Représentation des flux souterrains

4.2.1.1 Modélisation des débits d'exhaure

L'implémentation d'un module permettant de simuler le drainage de la nappe superficielle au niveau du sous-sol de certains bâtiments et le rejet des volumes prélevés vers le réseau d'assainissement est ici motivée par la volonté d'évaluer l'incidence d'une telle modification du cycle de l'eau sur le fonctionnement hydrologique de la ZAC de Moulon. L'objectif est en particulier de déterminer si l'absence de prise en compte de ce processus dans l'application du modèle à la ZAC de Moulon est de nature à biaiser les résultats sur le bilan hydrologique et le niveau de la nappe superficielle.

a . Choix d'une relation débit d'exhaure – niveau de nappe

Le développement et la paramétrisation de ce module supplémentaire s'appuient en grande partie sur les observations conduites au niveau du bâtiment IPS2 (cf. 3.2.2). Pour simuler le prélèvement et le rejet des eaux d'exhaure dans URBS, une relation entre le débit d'exhaure et la charge hydraulique au-dessus du niveau du système de drainage du sous-sol (différence entre l'altitude de nappe et l'altitude de ce système de drainage) doit nécessairement être introduite. Plusieurs options peuvent ici être envisagées pour décrire cette relation :

- Une approche « simpliste » supposant une relation linéaire entre charge hydraulique et débits collecté (a priori non conforme aux observations, mais reposant sur un unique paramètre)
- Une approche « empirique » visant à reproduire la relation observée entre les niveaux de nappe et les volumes prélevés (relation puissance à deux paramètres)
- Une approche « à base physique », s'appuyant sur une formule classique d'hydrogéologie adaptée à la description du sol adoptée dans URBS

L'absence d'information sur le plan de drainage du bâtiment IPS2 est l'une des principales difficultés rencontrées pour le développement du module « débits d'exhaure ». Si différentes solutions peuvent en pratique être mises en œuvre pour collecter les volumes au niveau du sous-sol, une solution fréquente consiste à avoir recours à un radier drainant (le sous-sol est alors drainé sur la totalité de sa surface).

Dans la suite, une approche « à base physique », compatible avec une telle configuration et permettant de produire des débits d'exhaure du même ordre de grandeur que les débits observés, est donc privilégiée : chaque bâtiment du bassin versant est assimilé à un puits circulaire dont la profondeur correspond à celle du sous-sol.

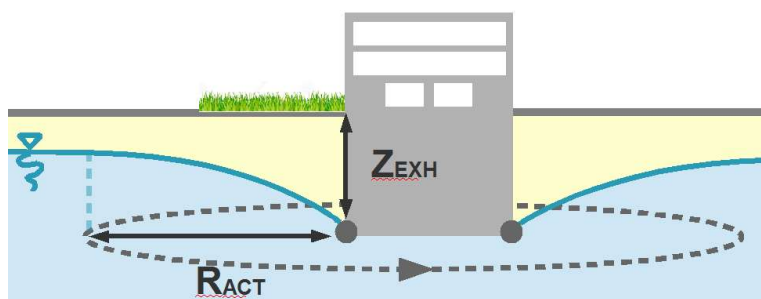


Figure 63 - Représentation du drainage au niveau des bâtiment

En reprenant l'hypothèse du modèle URBS d'une décroissance exponentielle de la conductivité hydraulique du sol avec la profondeur, l'application de la loi de Dupuit permet d'écrire :

$$Q_{EXH} = \pi \times M \times K_s \frac{[f(z_s) - f(z_{EXH})]}{\ln(R_{ACT}/R_{EQ})} \quad (4:1)$$

Où : Q_{EXH} désigne le débit d'exhaure (en $m^3 \cdot s^{-1}$), K_s la conductivité hydraulique à saturation du sol en surface (en $m \cdot s^{-1}$), M un paramètre caractérisant la décroissance de la conductivité (en m^{-1}), R_{EQ} le rayon équivalent du bâtiment estimé à partir de sa surface (en m), f une fonction de la forme $f(z) = \exp(-z/M) \times (z+M)$ et R_{ACT} le rayon d'action du puits auquel le bâtiment est assimilé, correspondant à la zone d'influence du drainage.

Cette formulation présente l'avantage de ne s'appuyer que sur un unique paramètre R_{ACT} (les autres étant déjà fixés dans le modèle) dont le sens reste plus facile à appréhender que pour une approche strictement empirique.

b . Paramétrisation du module

Le volume d'eau prélevé en nappe au niveau du bâtiment IPS2 s'élève à 171 m^3 sur la période du 01/04/16 au 30/09/17. En absence d'information précise sur le plan de drainage, la surface drainée sous le bâtiment peut être supposée comprise entre 2100 et 3800 m^2 (surfaces approximatives de l'amphithéâtre et du bâtiment dans sa totalité). Cette hypothèse permet de situer la hauteur d'eau prélevée dans la nappe superficielle rapportée à la surface drainée entre 30 et 54 mm à l'échelle annuelle.

La valeur du paramètre R_{ACT} peut alors être ajustée sur la base de cette estimation, en sélectionnant des valeurs permettant de retrouver des volumes cohérents avec les observations au niveau de la parcelle comprenant le bâtiment IPS2 (cf. Figure 64).

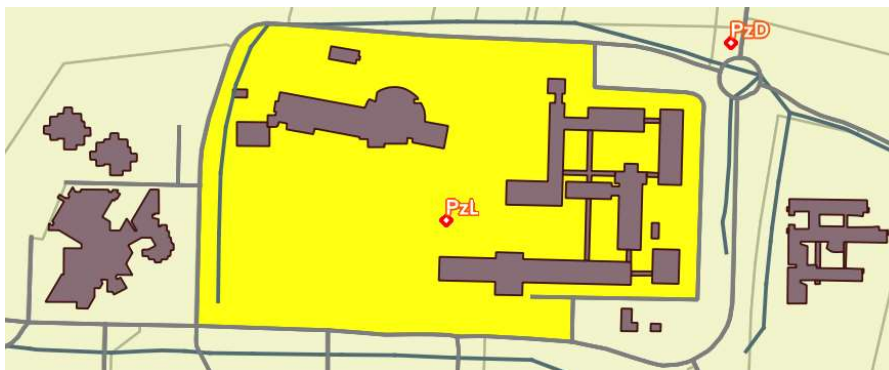


Figure 64 - Parcelle intégrant le bâtiment IPS2

À l'issu des simulations réalisées avec URBS après intégration du module « débits d'exhaure », des hauteurs d'eau annuelle de 28 et 53 mm ont respectivement pu être obtenues pour $R_{ACT} = 25 \text{ m}$ et $R_{ACT} = 10 \text{ m}$. Dans la suite, cette gamme de valeur est donc retenue pour la comparaison de différents scénarios sur l'occupation du sous-sol.

c . Comparaison de différents scénarios

En absence d'information détaillée sur la nature des bâtiments existant ou futurs, les scénarios utilisés pour tester l'influence des débits d'exhaure sur le fonctionnement hydrologique du bassin demeurent relativement simples. Deux configurations, basée sur l'hypothèse d'une profondeur homogène de sous-sol sur l'ensemble des bâtiments de la ZAC, sont ici retenues ; la première avec $Z_{EXH} = 2,5 \text{ m}$ (soit approximativement un niveau de sous-sol) et l'autre avec $Z_{EXH} = 5 \text{ m}$ (soit approximativement deux niveaux de sous-sol).

Les résultats obtenus pour l'état initial sur le bilan hydrologique de la ZAC sont présentés dans le tableau 9 :

Scénario	P	ET	Q _{NAT}	Q _{VOI}	Q _{BAT}	I _{RES}	Q _{INF}	Q _{EXH}	Δ _{STOCK}
Référence	100	67.4	2.6	2.6	5.0	28.6	0	0.0	-6.1
Z _{EXH} =2,5m, R _{ACT} =10 m	100	67.2	2.4	2.6	5.0	28.2	0	0.9	-6.2
Z _{EXH} =2,5m, R _{ACT} =25 m	100	67.3	2.5	2.6	5.0	28.4	0	0.5	-6.1
Z _{EXH} =5m, R _{ACT} =10 m	100	66.6	2.2	2.6	5.0	26.4	0	4.2	-6.8
Z _{EXH} =5m, R _{ACT} =10 m	100	66.9	2.3	2.6	5.0	27.2	0	2.5	-6.5

Tableau 9 - Bilan hydrologique associé aux différents scénarios sur les débits d'exhaure à l'état actuel (simulation pour une période de trois ans ; les différents termes sont exprimés en pourcentage de la pluie P ; ET désigne l'évapotranspiration, Q_{NAT,VOI,BAT} le ruissellement sur les surfaces naturelles, les voiries et le bâti, I_{RES} l'infiltration vers le réseau, Q_{INF} l'infiltration dans les noues, Q_{EXH} le terme associé aux débits d'exhaure et Δ_{STOCK} la variation du stock d'eau dans le sol)

Le bilan hydrologique apparaît de manière générale peu sensible à l'introduction du module « débit d'exhaure », bien que des scénarios assez défavorables aient ici été choisis (l'hypothèse d'un ou deux niveaux de sous-sol sur l'ensemble des bâtiments est en effet assez extrême et devrait conduire à surestimer le terme Q_{EXH}). Le volume d'eaux d'exhaure Q_{EXH} simulé sur trois ans n'excède ainsi pas 17.6 mm (soit 0.9 % des précipitations) pour le scénario Z_{EXH} = 2,5 m. Pour les configurations testées, la prise en compte des débits d'exhaure n'induit pas non-plus de différences très significatives sur le niveau moyen de la nappe (en moyenne, moins de 2 cm pour l'hypothèse Z_{EXH} = 2,5 m et 6 cm pour l'hypothèse Z_{EXH} = 5 m). Cette influence quasi-négligeable des débits d'exhaure sur les résultats des simulations à l'état initial est en partie prévisible, compte tenu de la faible proportion de surfaces bâties à l'échelle de la ZAC.

Les résultats obtenus pour l'état futur sont présentés ci-dessous :

Scénario	P	ET	Q _{NAT}	Q _{VOI}	Q _{BAT}	I _{RES}	Q _{INF}	Q _{EXH}	Δ _{STOCK}
Référence	100	52.8	3.4	5.7	13.4	30.8	1.3	0	-5.0
Z _{EXH} =2,5m, R _{ACT} =10 m	100	52.6	3.1	5.6	13.4	30.6	1.5	1.2	-5.2
Z _{EXH} =2,5m, R _{ACT} =25 m	100	52.7	3.2	5.7	13.4	30.7	1.4	0.6	-5.1
Z _{EXH} =5m, R _{ACT} =10 m	100	51.8	2.9	5.6	13.4	27.9	1.9	6.1	-5.9
Z _{EXH} =5m, R _{ACT} =10 m	100	52.4	3.0	5.6	13.4	29.3	1.6	3.0	-5.4

Tableau 10 - Bilan hydrologique (en % des précipitations) associé aux différents scénarios sur les débits d'exhaure à l'état futur (ET : évapotranspiration, Q_{NAT,VOI,BAT} : ruissellement sur les surfaces naturelles, les voiries et le bâti, I_{RES} : infiltration vers le réseau, Q_{INF} : l'infiltration dans noues, Q_{EXH} : volume d'eaux d'exhaure et Δ_{STOCK} : variation du stock d'eau dans le sol)

Ici encore, la représentation des débits d'exhaure ne semble pas induire de différences significatives en termes de bilan hydrologique, même si les volumes associés se révèlent légèrement supérieurs à ceux simulés pour le bassin versant à l'état initial. Comme à l'état initial, le rabattement de la nappe au niveau des sous-sols donne lieu à une diminution du ruissellement sur les surfaces naturelles Q_{NAT} et de l'infiltration vers le réseau d'assainissement I_{RES}. Ces différences restent néanmoins minimes et ne se traduisent pas par des modifications importantes du niveau de la nappe superficielle :

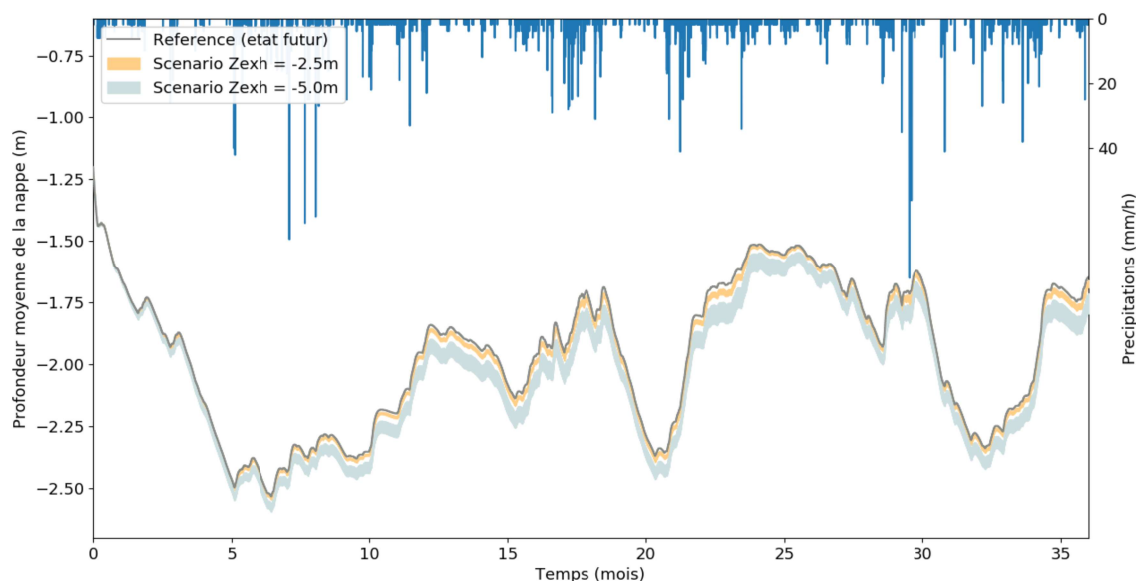


Figure 65 - Niveaux de nappe moyen simulés à l'état futur pour les différents scénarios sur les débits d'exhaure (les fuseaux correspondent à l'enveloppe générée pour la gamme de valeur de R_{ACT}).

De manière générale, les résultats précédents suggèrent que l'absence de représentation des débits d'exhaure dans URBS n'est pas de nature à biaiser de façon significative l'étude du fonctionnement hydrologique de la ZAC de Moulon et de l'impact de son aménagement. Les simulations effectuées pour des scénarios d'occupation du sous-sol pourtant très défavorables tendent donc à conforter les résultats obtenus à l'issue des premières applications de URBS à la ZAC de Moulon.

Il faut souligner que les résultats obtenus demeurent très dépendant de la paramétrisation du module « débits d'exhaure » qui ne s'appuie ici que sur les mesures effectuées au niveau du sous-sol du bâtiment IPS2. L'instrumentation d'autres bâtiments doit donc être envisagée pour s'assurer de la représentativité de ces observations. Le suivi des débits d'exhaure au niveau du bâtiment DIGITEO Labs, initié en octobre 2017, devrait permettre de conforter l'estimation des volumes prélevés à l'échelle du bassin versant.

4.2.1.2 Effets des conditions aux limites latérales dans le sous-sol

a . Introduction

Les conditions d'écoulement de la nappe superficielle à l'échelle de la ZAC s'avèrent complexes et très variables (dans le temps et dans l'espace), ce qui rend délicat le choix des conditions aux limites dans le modèle URBS. Pour l'application initiale du modèle, l'hypothèse d'un flux nul en périphérie du domaine d'étude avait été retenue. Si une telle hypothèse apparaît raisonnable au regard du très faible gradient de la nappe autour de la ZAC, il semble néanmoins nécessaire d'évaluer son incidence en la comparant à d'autres types de conditions aux limites.

Deux options sont envisagées dans la suite : (1) la *définition d'une condition en flux*, en faisant l'hypothèse d'un flux constant et orienté vers l'extérieur, en périphérie du domaine d'étude et (2) la *définition d'une condition en charge*, en introduisant une hypothèse sur la profondeur de la nappe superficielle en périphérie du domaine d'étude.

b . Hypothèse d'une condition en flux

Les tests réalisés sous l'hypothèse d'une « vidange » de la zone saturée, sous l'effet d'un flux Q_{OUT} dirigé vers l'extérieur du domaine d'étude, visent à répondre à certaines interrogations soulevées à l'issue de la thèse d'Yinghao Li (2015) quant au réalisme de la condition de flux nul. Cette dernière pourrait en effet contraindre le modèle à compenser l'absence d'écoulement vers l'aval du bassin versant par une infiltration excessive de la nappe vers le réseau (empêchant alors de reproduire la dynamique observée au niveau des piézomètres).

L'incidence sur les performances du modèle de l'introduction d'une condition de flux non-nul en limite de domaine d'étude n'est pas abordée dans la suite (notamment parce que son évaluation supposerait de procéder à un nouveau calage du modèle). Des simulations sont néanmoins réalisées afin d'analyser l'effet de ce type de conditions aux limites sur le bilan hydrique et les niveaux de nappes à l'état initial :

Scénario	P	ET	Q_{NAT}	Q_{VOI}	Q_{BAT}	I_{RES}	Q_{OUT}	Δ_{STOCK}
Référence	100	68.1	2.9	2.7	5.0	32.2	0	-10.7
$Q_{OUT}= 25$ mm/an	100	67.3	2.3	2.6	5.0	30.5	3.8	-11.5
$Q_{OUT}= 50$ mm/an	100	66.7	1.9	2.6	5.0	29.3	7.7	-13.1
$Q_{OUT}= 100$ mm/an	100	65.4	1.6	2.6	5.0	28.3	15.3	-18.1
$Q_{OUT}= 150$ mm/an	100	64.2	1.6	2.6	5.0	27.2	22.9	-23.5

Tableau 11 - Bilan hydrologique (en % des précipitations) associé aux différents hypothèses sur les conditions aux limites (ET : évapotranspiration, $Q_{NAT,VOI,BAT}$: ruissellement sur les surfaces naturelles, les voiries et le bâti, I_{RES} : infiltration vers le réseau, Δ_{STOCK} : variation du stock d'eau dans le sol)(N.B. : les différences avec le tableau 9 pour le scénario de référence s'expliquent par l'utilisation d'un niveau initial de nappe différent)

Les valeurs choisies pour le flux Q_{OUT} en limite du domaine de modélisation, délibérément élevées, s'étalent de 25 à 150 mm/an. De façon prévisible, l'introduction de ce flux se répercute sur l'ensemble des termes du bilan hydrologique et en premier lieu sur le ruissellement au niveau des surfaces naturelles et l'infiltration vers le réseau du fait de l'abaissement du niveau de la nappe.

De la même manière, les niveaux de nappes simulés (cf. Figure 66) suivent une diminution proportionnelle au flux Q_{OUT} . Les configurations $Q_{OUT} = 100$ mm/an et $Q_{OUT} = 150$ mm/an donnent lieu à des écarts importants par rapport à l'hypothèse de référence. Il convient cependant de souligner que ces dernières ne sont pas réellement compatibles avec les connaissances sur l'hydrogéologie de la zone d'étude. Pour les valeurs 25 et 50 mm/an, plus plausibles (quoiqu'encore assez élevées), l'incidence de la modification des conditions aux limites reste à l'inverse assez modérée au regard des incertitudes sur les niveaux de nappe simulés pour le scénario de référence (cf. écart entre les niveaux de nappes observés et simulés dans les travaux antérieurs).

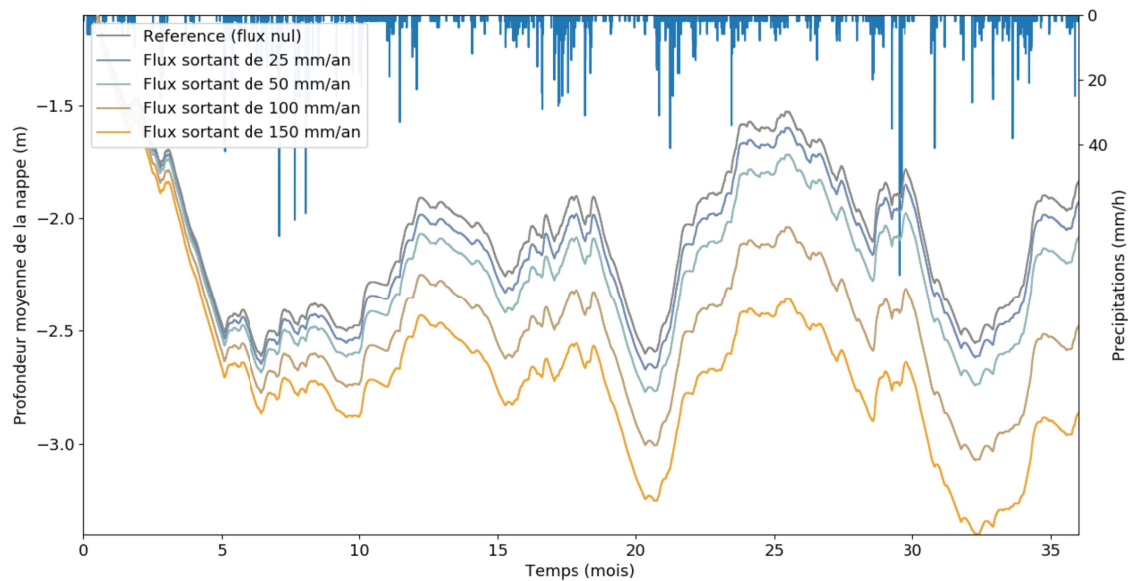


Figure 66 - Niveaux de nappe simulés pour différentes valeurs de flux appliqués en périphérie du domaine d'étude

Si l'introduction du flux Q_{OUT} semble n'induire que des variations modérées du niveau moyen de la nappe lorsque les valeurs de 25 et 50 mm/an sont utilisées, la modification des conditions d'écoulement dans la zone saturée en limite du domaine de modélisation reste susceptible de modifier de façon plus localisée les niveaux de nappe simulés.

L'incidence d'une modification des conditions aux limites sur la distribution des niveaux de nappes simulés sur les différentes parcelles du bassin versant est présentée figure 67 (pour la configuration $Q_{OUT} = 25$ mm/an). Les écarts parfois importants (de plusieurs dizaines de centimètres) entre les niveaux de nappes simulés pour la configuration choisie et le scénario de référence (condition de flux nul) mettent clairement en évidence l'influence du flux Q_{OUT} sur le comportement des parcelles situées en périphérie de la ZAC.

Un tel résultat conforte l'hypothèse selon laquelle une description inappropriée des conditions aux limites dans la zone saturée pourrait compromettre la capacité du modèle à reproduire les niveaux de nappes observés sur certains piézomètres et invite donc à conforter cet aspect de la modélisation pour les applications ultérieures de URBS.

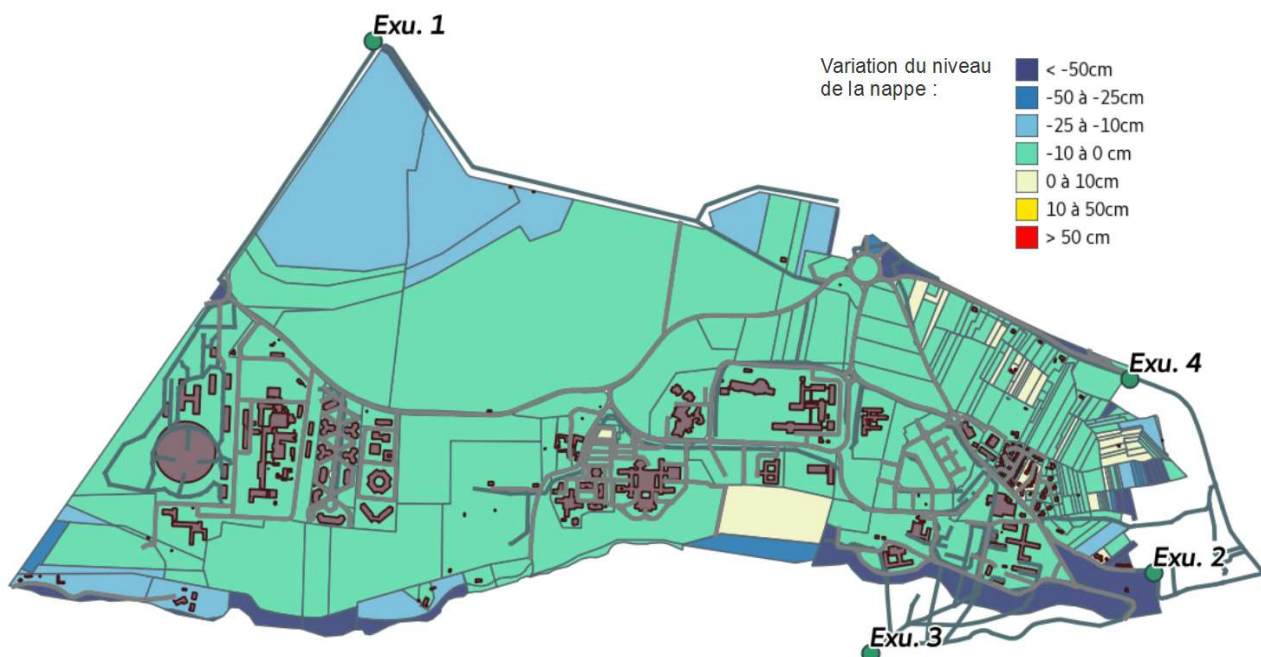


Figure 67 - Distribution des écarts au niveau de nappe simulé pour le scénario de référence pour la condition au limite en flux $Q_{OUT} = 25 \text{ mm/an}$ (résultats de simulation au 01/01/2013)

c . Hypothèse d'une condition en niveau de nappes

Dans l'application précédente, la définition de conditions aux limites « en flux » reste délicate en raison de la difficulté à quantifier la valeur du flux Q_{OUT} et spécifier la façon dont ce dernier s'applique en limite du domaine de modélisation. L'introduction de conditions sur la profondeur de la nappe autour de la zone d'étude permet d'une certaine manière de contourner la question de la valeur de Q_{OUT} . Cette solution permet également d'apprécier le réalisme des configurations testées pour la condition aux limites en flux sur la base des valeurs de Q_{OUT} simulées pour les différents scénarios retenus sur la profondeur de la nappe autour du domaine de modélisation.

Le recours à des conditions aux limites sur la profondeur de la nappe suppose de conditionner le flux Q_{OUT} s'appliquant aux parcelles situés en limite du domaine de modélisation au gradient hydraulique de la nappe superficielle entre ces parcelles et un point situé à l'extérieur de la zone d'étude. Le flux Q_{OUT} peut alors être calculé en étendant le module WTI (qui permet de décrire les écoulements dans la zone saturée) aux interfaces des parcelles délimitant les limites du domaine d'étude :

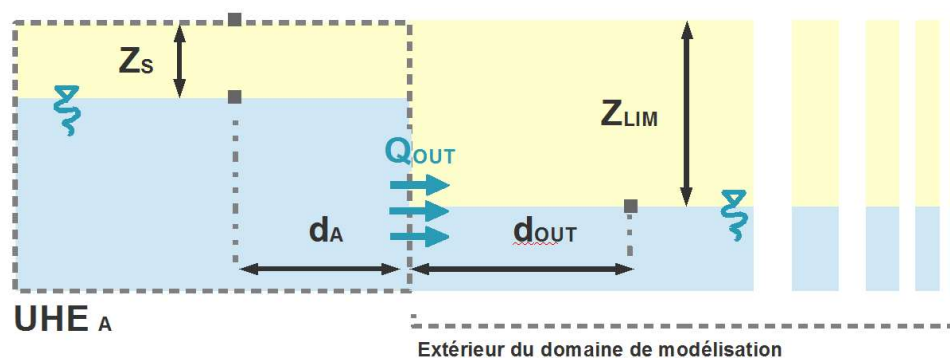


Figure 68 - Calcul du flux s'appliquant en limite du domaine d'étude pour l'hypothèse de conditions aux limites en profondeur de nappe

$$Q_{OUT} = \int_{z_s}^{\infty} K_s \cdot \exp(-z) \cdot dz \times \left(\frac{z_s - z_{out}}{d_A - d_{out}} \right) \quad (4:2)$$

Avec : z_s la profondeur de la nappe dans la zone saturée, z_{OUT} la profondeur de la nappe en dehors du domaine de modélisation, d_A la distance du centre de gravité de la parcelle A à l'interface vers l'extérieur du domaine de modélisation, d_{OUT} une distance à un point fictif vers lequel est calculé le flux Q_{OUT} . (d_{OUT} peut être envisagé comme un paramètre de condition aux limites du modèle).

Les résultats obtenus à l'état initial pour différentes valeurs de profondeur de la nappe en limite du domaine de modélisation sont présentées dans le tableau 12 :

Scénario	P	ET	Q _{NAT}	Q _{VOI}	Q _{BAT}	I _{RES}	Q _{INF}	Q _{OUT}	Δ _{STOCK}
Référence	100	68.1	2.9	2.7	5.0	32.2	0.0	0	-10.7
Z _{OUT} = -0,2m (d=10 m)	100	68.4	3.0	2.7	5.0	33.6	0.0	-2.0	-10.5
Z _{OUT} = -1m (d=10 m)	100	68.1	2.5	2.6	5.0	32.8	0.0	0.3	-10.6
Z _{OUT} = -2m (d=10 m)	100	67.9	2.1	2.6	5.0	32.1	0.0	1.3	-10.8
Z _{OUT} = -1m (d=1 m)	100	68.2	2.1	2.6	5.0	33.1	0.0	0.4	-10.7

Tableau 12 - Bilan hydrologique (en % des précipitations) associé aux différents hypothèses sur les conditions aux limites (ET : évapotranspiration, Q_{NAT,VOI,BAT} : ruissellement sur les différentes surfaces, I_{RES} : infiltration vers le réseau, Q_{OUT} : flux sortant du domaine de modélisation, Δ_{STOCK} : variation du stock d'eau dans le sol)

Pour l'ensemble des configurations retenues, l'impact de la modification des conditions aux limites apparaît ici faible voire négligeable. Le poids du terme Q_{OUT} dans le bilan hydrologique du bassin versant reste de manière générale très limité. Ainsi, la valeur du flux Q_{OUT} simulée pour l'hypothèse assez extrême d'une nappe affleurante en périphérie (Z_{OUT}= -0,2m) du domaine de modélisation n'excède pas 2 % du bilan hydrique. Pour l'hypothèse Z_{OUT}= -1m, le passage à une valeur réduite de d_{OUT}, bien inférieure aux distances parcelles-interfaces utilisées dans WTI, ne semble par ailleurs pas donner lieu à une augmentation de ce flux.

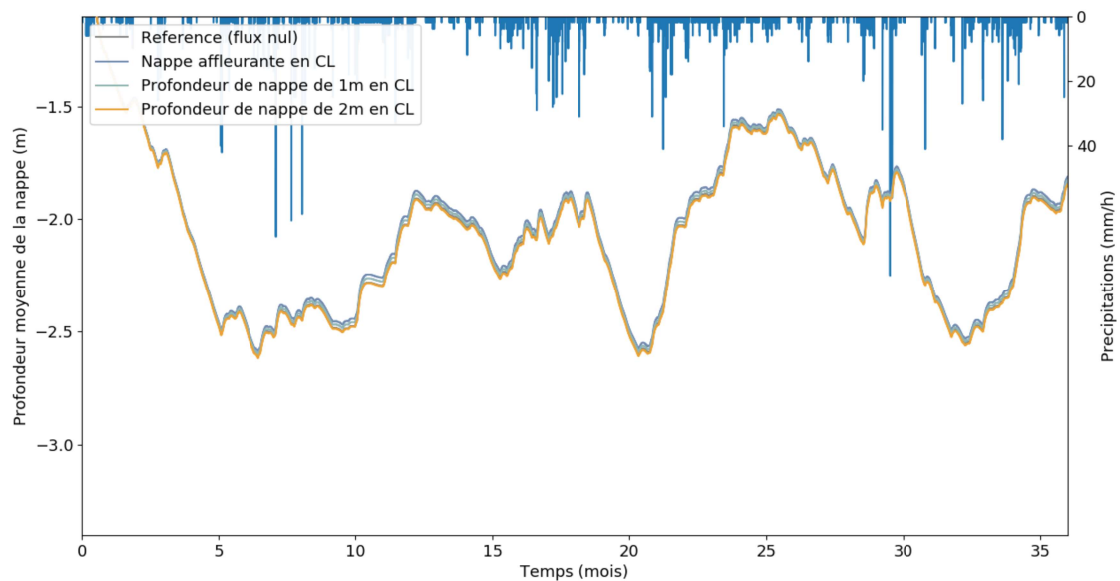


Figure 69 - Niveaux de nappe simulés pour différentes valeurs de profondeur de nappe appliquées en périphérie du domaine d'étude (le cas « nappe affleurante » correspond à $Z_{OUT} = -0,2m$ en raison de l'extension de la frange capillaire au dessus de $-0,2m$)

Si les niveaux moyens de nappe simulés semblent, comme le bilan hydrologique, peu sensibles à l'introduction de condition aux limites sur la profondeur de la nappe (cf. figure 69), des différences localisées du niveau de la nappe peuvent néanmoins être constatées d'un scénario à l'autre comme l'illustre la figure 70. Comme dans le cas précédent (introduction de condition aux limites en flux), ces résultats confirment que la difficulté à reproduire la variabilité des niveaux de nappes mesurés sur les différents piézomètres pourrait en partie être expliquée par la difficulté à spécifier les conditions aux limites dans la zone saturée.

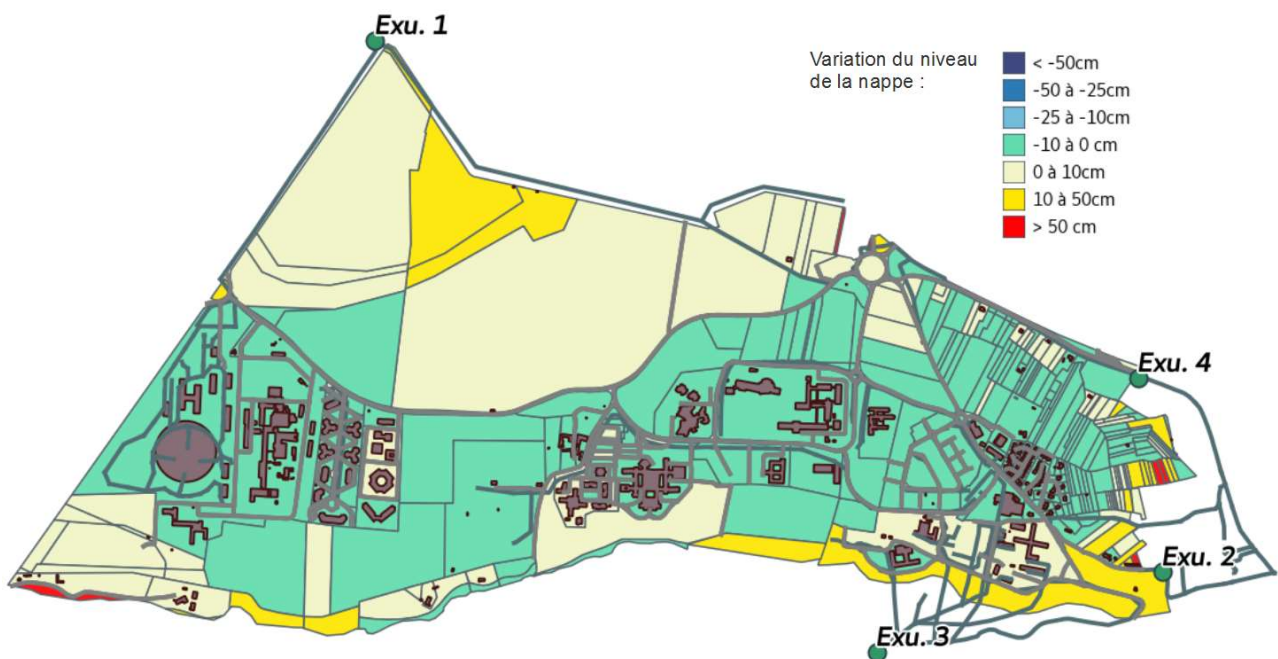


Figure 70 - Distribution des écarts au niveau de nappe simulé pour le scénario de référence pour la condition au limite supposant une profondeur de nappe à $0,2m$ (résultats de simulation au 01/01/2013)

d . Conclusions

Pour l'hypothèse de condition aux limites « en flux », avec un flux Q_{OUT} constant s'appliquant en périphérie du domaine d'étude, les niveaux de nappe moyens et les bilans hydrologiques simulés apparaissent très dépendants de la valeur de Q_{OUT} retenue. Les valeurs de Q_{OUT} simulées lorsque les conditions aux limites sont spécifiées sous la forme de profondeurs de nappe, indiquent que les valeurs de Q_{OUT} sélectionnées pour l'hypothèse « d'une condition en flux » sont excessivement élevées, ou du moins incompatibles avec la description du sol fournie par URBS et le module WTI.

L'incidence réduite de la modification des conditions aux limites pour les configurations « en profondeur de nappe » ou « en flux » pour $Q_{OUT} = 25$ mm/an suggère donc que l'absence de description précise des conditions d'écoulement dans la zone saturée, aux frontières du domaine d'étude, n'est pas de nature à modifier significativement les résultats obtenus dans l'application initiale du modèle URBS à la ZAC de Moulon. Pour l'une et l'autre des hypothèses, les écarts aux niveaux de nappes simulés pour le scénario de référence sur certaines parcelles de la ZAC s'avèrent en revanche plus important.

L'analyse des conséquences de la modification des conditions aux limites sur les résultats du calage du modèle permettrait probablement d'apporter des éléments complémentaires sur la robustesse des résultats initialement obtenus. Un tel travail s'avérerait alors délicat en raison des multiples questions que soulève le calage d'un modèle tel que URBS et des interrogations quant au fonctionnement hydrologique de la nappe superficielle.

4.2.1.3 Hypothèse d'une interaction avec la nappe des sables

Le modèle URBS offre une représentation relativement simple du sous-sol avec une description de la zone saturée comme un unique aquifère d'extension infinie, dans laquelle la conductivité hydraulique du sol diminuerait de façon exponentielle avec la profondeur. L'hydrogéologie du plateau ne peut donc être prise en compte que de façon très partielle dans la version actuelle de URBS qui ne permet en particulier pas de modéliser le système « nappe superficielle + nappe des sables de Fontainebleau ». La modélisation se concentre donc sur la nappe superficielle à laquelle la zone saturée est assimilée, en supposant cette dernière indépendante de la nappe des sables.

Si l'hypothèse d'une séparation totale des deux systèmes d'aquifères peut sembler raisonnable en première approche, il semble nécessaire d'évaluer l'effet d'une telle hypothèse sur les résultats obtenus. Cette évaluation apparaît d'autant plus nécessaire que plusieurs travaux menés autour du plateau de Saclay (Avignon, 2015) indiquent l'existence d'un flux, avec des valeurs assez variables d'une référence à l'autre. À l'échelle du plateau, la recharge de la nappe des sables pourrait ainsi être comprise entre 0 et 200 mm/an. Il reste toutefois difficile d'étendre ce résultat à la ZAC de Moulon en raison de l'hétérogénéité des formations baignant la nappe superficielle. L'épaisseur de ces dernières, plus importante au niveau de la zone d'étude (Renard et Tognelli, 2016), pourrait en effet donner lieu à une recharge localement plus faible qu'à l'échelle du plateau.

Dans la suite, une modification du modèle URBS est apportée avec l'introduction d'un terme de vidange Q_{SF} s'appliquant à la zone saturée sur chaque unité hydrologique et permettant de simuler une infiltration de la nappe superficielle vers la nappe des sables de Fontainebleau (le flux Q_{SF} est ici supposé constant). Différentes simulations sont alors réalisées pour tester l'incidence de ce flux sur les résultats du modèle à l'état initial, en retenant des valeurs de Q_{SF} comprises entre 0 et 200 mm/an.

Les bilans hydrologiques associés aux valeurs de Q_{SF} sont présentés ci-dessous :

Scénario	P	ET	Q _{NAT}	Q _{VOI}	Q _{BAT}	I _{RES}	Q _{SF}	Δ _{STOCK}
Référence	100	68.1	2.9	2.7	5.0	32.2	0	-10.7
Q _{SF} = 50 mm/an	100	66.7	2.3	2.6	5.0	27.6	7.7	-12.0
Q _{SF} = 100 mm/an	100	65.2	1.8	2.6	5.0	23.4	15.3	-13.4
Q _{SF} = 150 mm/an	100	63.4	1.6	2.5	5.0	20.1	22.9	-15.3
Q _{SF} = 200 mm/an	100	61.7	1.5	2.5	5.0	16.9	30.6	-17.9

Tableau 13 - Bilan hydrologique (en % des précipitations) simulé à l'état initial pour différentes valeurs du flux d'infiltration de vers la nappe des sables de fontainebleau Q_{SF} (ET : évapotranspiration, Q_{NAT,VOI,BAT} : ruissellement sur les surfaces naturelles, les voiries et le bâti, I_{RES} : infiltration vers le réseau, Δ_{STOCK} : variation du stock d'eau dans le sol)

Les valeurs de Q_{SF} sélectionnées sont ici loin d'être négligeables devant les précipitations. De façon prévisible, la modélisation d'une infiltration de la zone saturée vers la nappe des sables de Fontainebleau se traduit, sous de telles conditions sur Q_{SF}, par une modification importante du bilan hydrologique à l'échelle de la ZAC. Les écarts à la configuration de référence deviennent particulièrement importants dès lors que Q_{SF} dépasse 50 mm/an. Le terme du bilan le plus fortement affecté par l'introduction de ce flux est l'infiltration de la nappe vers le réseau I_{RES}, qui diminue fortement sous l'effet de l'abaissement du niveau moyen de la nappe. À valeur de flux équivalente, ces résultats se révèlent assez proches de ceux obtenus avec l'introduction de conditions aux limites latérales en flux (configurations Q_{OUT} = 25 mm/an et 100 mm/an).

Les niveaux moyens de nappes associés aux différents scénarios testés sont présentés figure 71. Ces derniers mettent également en évidence l'impact significatif du flux Q_{SF} sur le fonctionnement de la nappe superficielle, en particulier pour les valeurs supérieures à 100 mm/an.

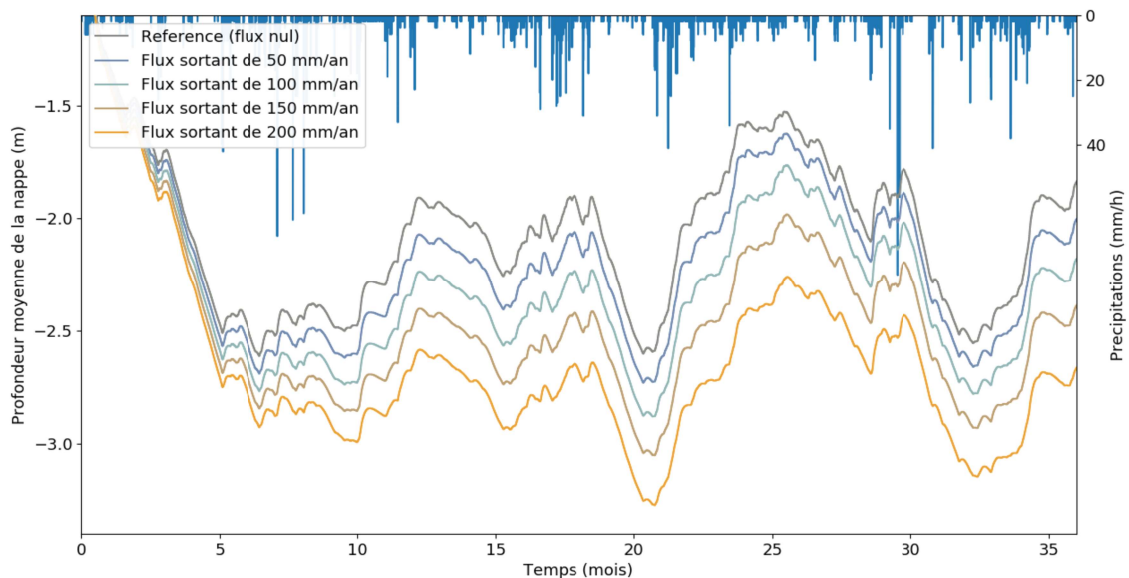


Figure 71 - Niveaux moyens de nappe simulés pour différents scénarios de recharge de la nappe des sables de Fontainebleau (sur une durée de 3 ans, à l'état initial)

Si la configuration Q_{SF} = 200 mm/an s'avère probablement peu réaliste, il reste assez difficile d'écarter les autres valeurs testées. L'influence manifeste du terme Q_{SF} sur les sorties du modèle URBS nécessiterait donc, pour ce cas d'étude, de porter une plus grande attention aux éventuelles interactions entre la nappe superficielle et la nappe des

sables de Fontainebleau.

Une analyse de la sensibilité des résultats au flux Q_{SF} a ici été conduite avec la paramétrisation initiale du modèle, issue d'un calage sur les observations piézométriques collectées en différents points du bassin versant, en supposant Q_{SF} nul. La diminution du niveau moyen de la nappe pour $Q_{SF} > 0$, traduisant une altération des résultats par rapport au scénario de référence, est par conséquent tout à fait prévisible.

Une prise en compte dès la phase de calage du modèle du flux Q_{SF} pourrait donc être nécessaire pour évaluer de façon plus complète l'incidence des interactions entre la nappe superficielle et la nappe des sables sur les performances du modèle.

4.2.2 Fonctionnement du réseau hydrographique

4.2.2.1 Diagnostic du fonctionnement du réseau

a . Étude des dysfonctionnements du module de transfert en réseau

Le schéma numérique utilisé pour décrire les écoulements dans le réseau est basé sur la formule de Muskingum (4:3). Ce modèle relativement simple donne lieu à des temps de calculs très modestes et présente donc des avantages certains pour les applications telles que celles initialement visées pour le modèle URBS : périodes longues de modélisation, bassins versants de taille potentiellement importante...

Les débits dans les différents tronçons du réseau sont calculés de l'amont vers l'aval en appliquant la formule suivante :

$$Q^{j+1}(t+dt) = C_0 Q^j(t+dt) + C_1 Q^j(t) + C_2 Q^{j+1}(t) \quad (4:3)$$

Où $Q^j(t+dt)$ désigne le débit dans le tronçon j à la date $t+dt$ et C_0 , C_1 et C_2 des coefficients calculés à partir des caractéristiques géométriques du tronçon (les indices j et $j+1$ correspondent à une indexation de l'amont vers l'aval des tronçons).

Une telle approche ne permet cependant pas de rendre compte des phénomènes associés à la mise en charge de certaines portions du réseau. Le modèle est alors susceptible de produire des vitesses ou des débits d'écoulement incompatibles avec les caractéristiques géométriques du réseau d'assainissement. L'analyse des débits simulés par le modèle peut apporter une information sur le niveau de sollicitation des différents tronçons et mettre en évidence un risque de dysfonctionnement du réseau. Dans la suite, différents tests sont donc effectués, sur la ZAC de Moulon, pour analyser les débits simulés à partir de la formule de Muskingum.

4 types d'erreurs sont en particulier recherchés :

- *Erreur n°1* : La capacité du tronçon en volume est dépassée
- *Erreur n°2* : Le débit capable de la canalisation est dépassé
- *Erreur n°3* : Le débit simulé dans le tronçon courant est négatif
- *Erreur n°4* : Le volume calculé en continu dans le tronçon courant à partir des débits simulés par la fonction de Muskingum est négatif

(N.B : La formule de Muskingum, telle qu'implémentée dans URBS, est susceptible de produire de façon ponctuelle des erreurs numériques de type 3 et 4 sans nécessairement compromettre le caractère conservatif du modèle aux exutoires du réseau. L'introduction

d'un module dédié à la représentation des noues en interface avec le modèle de Muskingum impose en revanche de quantifier ces erreurs).

Les résultats du diagnostic à l'état initial et à l'état aménagé sont présentés dans le tableau 14 :

	Erreur 1		Erreur 2		Erreur 3		Erreur 4	
	n_1	n_2	n_1	n_2	n_1	n_2	n_1	n_2
État initial	19 %	0.15	26 %	8.2	< 0.1 %	0.01	8.0 %	4.7
État aménagé	15 %	0.62	19 %	15.2	2.2 %	0.04	6.6 %	5.2

Tableau 14 - Diagnostic du fonctionnement du module de transfert en réseau de URBS - n_1 : pourcentage de tronçon affecté par les différents types d'erreur (pour un nombre total de tronçon de 548 et 454 à l'état initial et aménagé), n_2 : nombre d'erreurs par pas de temps sur l'ensemble du réseau

La fréquence des erreurs correspondant à une surcharge du réseau d'assainissement (erreurs « de type 1 et 2 ») est assez similaire entre les scénarios « état initial » et « état aménagé ». Leur distribution spatiale, présentée figure 72 pour l'état aménagé, ne permet pas réellement d'appréhender l'origine des dysfonctionnements du modèle (lesquels pourraient correspondre à des dysfonctionnements du réseau). Les résultats obtenus ici sont vraisemblablement tributaires du prétraitement géographique qui associe les parcelles aux différentes sections du réseau (et conditionne donc la cohérence du schéma de drainage). Plusieurs autres facteurs tels que le niveau de discrétisation du réseau, la qualité des données SIG ou le pas de temps de calcul utilisé sont également susceptibles d'affecter le fonctionnement du module de transfert.

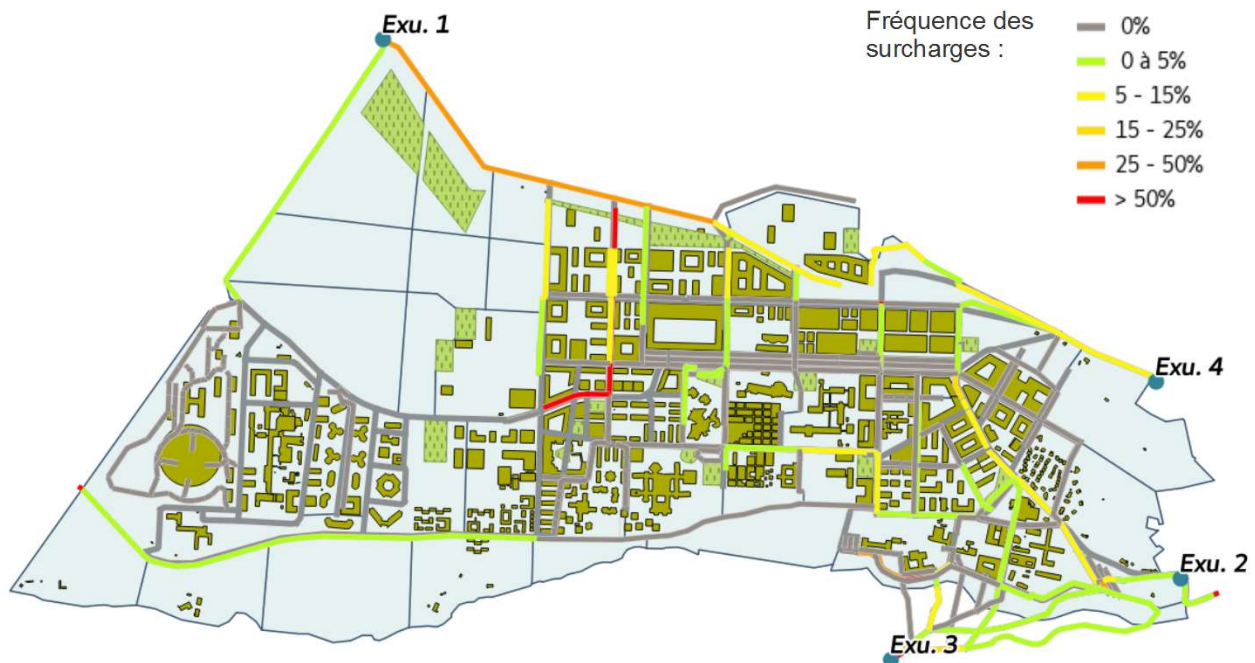


Figure 72 - Distribution sur les différents tronçons du réseau des erreurs de type 2 (surcharge en débit) à l'état aménagé

Si l'interprétation des surcharges du réseau s'avère difficile, les résultats précédents invitent clairement à s'interroger sur la pertinence du modèle pour des applications telles que l'étude de la réponse d'un bassin versant à des pluies de projet. De manière générale, les débits simulés pour des niveaux de précipitation importants devront véritablement être considérés comme très incertains. La démarche de vérification du

fonctionnement du réseau présentée pourrait par ailleurs être conduite de façon plus systématique lors de l'application du modèle.

Une illustration des erreurs de type 3, correspondant à l'apparition de débits négatifs, est fournie ci-dessous :

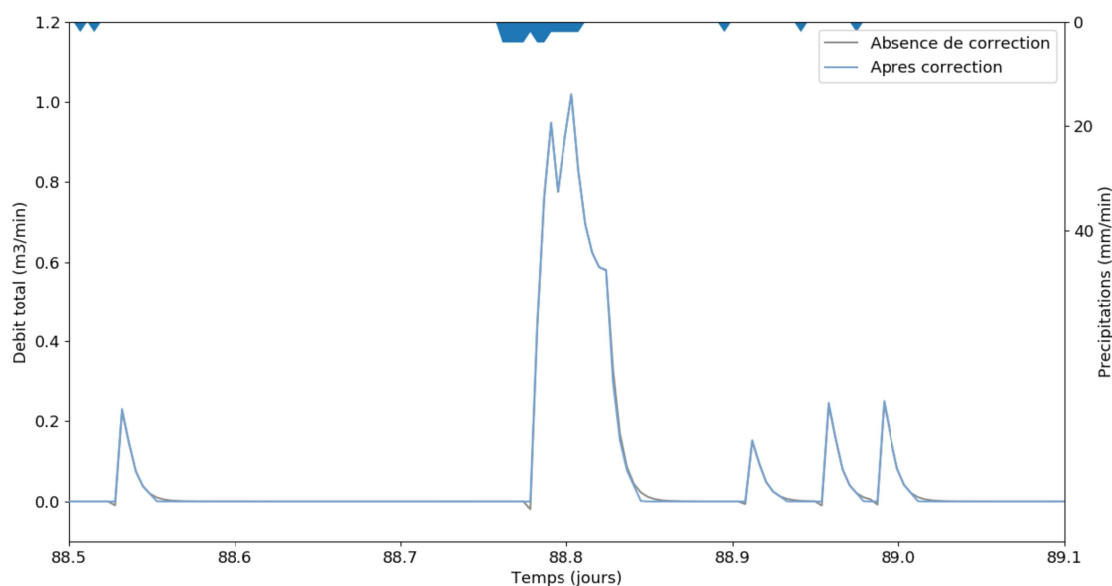


Figure 73 - Illustration des erreurs de type 3 (débits négatifs) sur l'un des tronçons (EP39_BIS) de la ZAC à l'état aménagé

Les erreurs de type 3 n'affectent qu'un nombre très limité de tronçons à l'échelle de la ZAC et demeurent rares sur la durée de la simulation (cf. tableau 14). Ces erreurs numériques, inhérentes à la méthode de Muskingum, sont bien documentées dans la littérature scientifique (Perumal, 1992) et concernent essentiellement les très faibles valeurs de débits en début ou en fin d'hydrogramme » (cf. figure 73). Leur incidence sur les débits simulés à l'exutoire du bassin versant demeure donc en principe minimale.

Les erreurs de type 4 sont à rapprocher des erreurs de type 3 ; les approximations numériques introduites via le schéma de Muskingum donnent lieu à des incohérences entre les débits entrant et sortants lors de la phase d'atténuation des hydrogrammes. Quoique plus fréquentes que les erreurs de type 3, ces erreurs ne représentent en valeur absolue qu'une fraction très réduite des précipitations et peuvent donc raisonnablement être négligées.

Dans la suite, les erreurs numériques « de type 3 et 4 » sont corrigées en ramenant les débits négatifs simulés dans certains tronçons à une valeur nulle (pour les erreurs « de type 3 ») et en conditionnant le débit sortant du tronçon au volume effectivement présent dans ce-dernier (pour les erreurs de « type 4 »). L'incidence de ces corrections apparaît assez limitée : à l'état aménagé la différence dans le cumul des débits simulés aux exutoires du bassin versant ne dépasse ainsi pas 4 mm/an, suggérant que les erreurs observées restent finalement acceptables.

Il convient enfin de souligner qu'en dépit de possibles imprécisions sur les débits simulés aux exutoires du bassin versant, le modèle URBS demeure un outil robuste pour les applications présentées dans le cadre de ce travail. Le transfert dans le réseau d'assainissement ne constitue en effet qu'un aspect du fonctionnement hydrologique du bassin versant et les erreurs observées ne remettent nullement en cause les bilans hydriques ou les niveaux de nappes simulés par le modèle.

b . Confrontation aux mesures effectuées au niveau de la rigole de Corbeville

Bien que produisant vraisemblablement des résultats peu réalistes sur la ZAC de Moulon pour les événements pluvieux importants, le module de transfert de URBS reste un outil pertinent pour décrire le drainage des parcelles urbaines lors des événements fréquents, comme en attestent les applications antérieures du modèle (Rodriguez et al, 2008). La ZAC de Moulon présente néanmoins, à l'état initial, la particularité de comporter un nombre important de parcelles agricoles drainées que le modèle, dédié au milieu urbain, n'avait pas initialement vocation à représenter.

Les débits simulés par le modèle au niveau de la rigole de Corbeville sont donc comparés à des mesures effectuées entre janvier et juin 2015 à l'entrée du site du CEA, à l'intersection de la rigole et de la D306 :

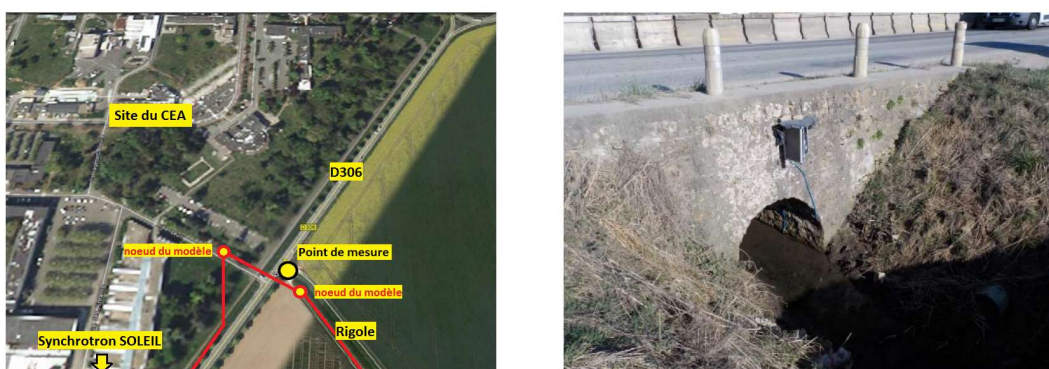


Figure 74 - Point de mesure du débit de la rigole de Corbeville à l'entrée du site du CEA (source: Hydratec)

Les parcelles situées au nord de la ZAC, en dehors de la zone d'étude et donc du domaine de modélisation, sont drainées par la rigole de Corbeville. Les débits mesurés à l'entrée du CEA, en partie issus du drainage de ces parcelles, ne sont donc pas directement assimilables aux débits simulés par le modèle qui ne rend compte que des apports des parcelles situées au sud de la rigole. Seule une comparaison, relativement simple, de l'ordre de grandeur des débits simulés et observés apparaît donc pertinente.

Dans la suite, la distribution des débits mesurés de janvier à juin 2015 est comparée à celle des débits simulés sur 3 ans en deux points de la rigole de Corbeville : le premier au niveau de l'exutoire nord de la ZAC, après la jonction de la rigole et d'une canalisation issue du Synchrotron longeant la D306, et le second, plus en amont à l'emplacement supposé du point de mesure. Les fréquences de non-dépassement (fréquences d'observation pour lesquelles le débit est inférieur à une valeur donnée) sont présentées dans la figure 75 :

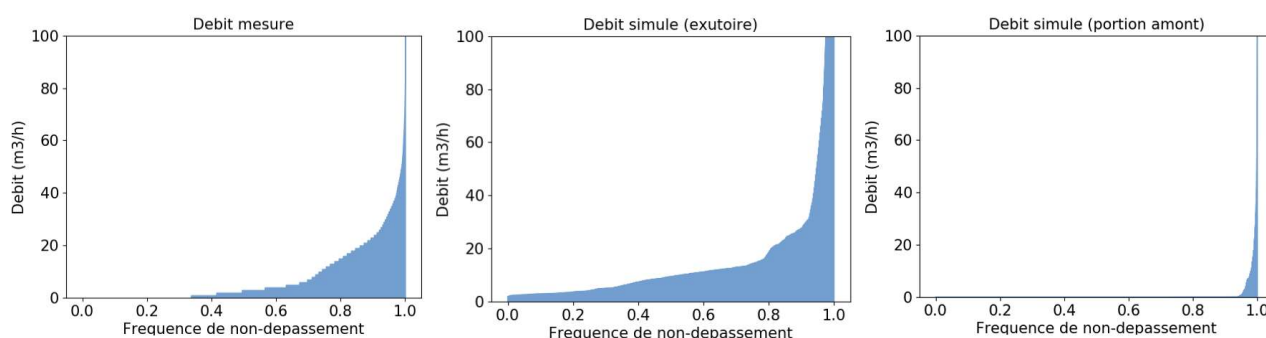


Figure 75 - Fréquence de non-dépassement des débits mesurés au niveau de la D306 et simulés en deux points de la rigole

La distribution des débits mesurés apparaît de manière générale plus proche de celle simulée à l'exutoire nord de la ZAC qu'au niveau de la D306, plus en amont de la rigole. Des valeurs de débits quasi-nulles sont ainsi produites pour 95 % du temps de simulation au nœud amont de la rigole tandis que des débits de plusieurs m³/h sont observés au point de mesure. Cet écart entre les observations et les sorties du modèle semble ici difficilement explicable par la seule absence de prise en compte des parcelles situées en partie nord de la ZAC : les différences d'ordre de grandeur entre les valeurs simulées et observées invitent donc à s'interroger sur la façon dont le drainage des parcelles agricoles est représenté dans URBS.

Pour les observations les plus fréquentes (valeurs de débits relativement faibles, non-dépassée pour 90 % des observations), la comparaison aux débits simulés en aval du point de mesure semble plus concluante. Les valeurs plus « extrêmes », correspondant vraisemblablement à des périodes pluvieuses, s'avèrent en revanche très éloignées entre l'une et l'autre des distributions, de l'ordre de plusieurs milliers de m³/h pour les débits simulés contre quelques centaines pour les observations. Si la comparaison des débits associés aux observations les plus fréquentes pourrait laisser supposer que le point de mesure se situe en aval du raccordement entre la rigole et le tronçon de réseau arrivant du sud de la ZAC (cf. figure 74), les écarts observés pour les pics de débits rendent donc assez peu probable cette hypothèse.

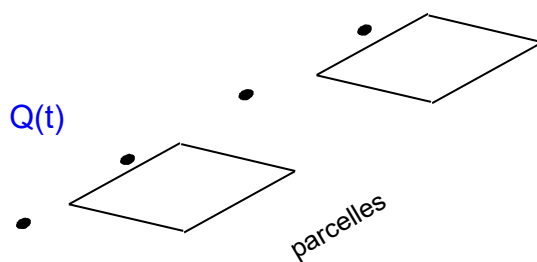
La confrontation du modèle aux mesures effectuées sur la rigole de Corbeville apparaît de manière générale peu probante et suggère que le réalisme des débits de base simulés à proximité des parcelles agricoles doit encore être conforté, en approfondissant par exemple la description mathématique des processus de drainage dans URBS. Il semble toutefois important de souligner qu'une telle comparaison reste difficile en absence d'information précise sur le bassin versant effectivement drainé par la rigole de Corbeville. Par ailleurs, la précision des mesures effectuées à l'entrée du CEA, en particulier pour les faibles débits, mériterait vraisemblablement d'être questionnée.

4.2.2.2 Amélioration de la représentation des noues

a . Représentation des noues dans le modèle

La représentation des noues dans le modèle URBS est assurée d'une part en surface par la transformation d'une partie de la surface de voirie en surface naturelle, en fonction de la largeur de la noue et d'autre part dans le réseau souterrain, où la représentation du transfert de l'eau est affectée par une fonction d'infiltration dans le sol.

Ainsi, le transfert dans le réseau hydrographique, simulé avec la méthode de Muskingum (cf. Équation 4:3) est modifié en introduisant une fonction d'infiltration dans le sol naturel sous-jacent. Cette fonction d'infiltration est calquée sur la fonction utilisée pour l'infiltration de l'eau de surface dans la zone non saturée, et contrôlée par la conductivité hydraulique à saturation K_s . La quantité d'eau qui s'infiltré dans le sol (I_{inf}) est répartie dans la zone non saturée des parcelles adjacentes à la noue considérée et modifie donc l'état hydrique du sol de ces parcelles.



$I_{inf}(t,p)$
 Figure 76 - Représentation des noues dans URBS

Ce « module noue » (Version 1) a été évalué à plus petite échelle, sur un bassin versant de référence à Nantes suivi par l'Ifsttar, l'écoquartier Bottière-Chénaie. Ce bassin possède un réseau d'eau pluviale principalement composé de noues (**annexe x**). La modélisation de ce bassin versant a été réalisée sur l'année 2014 au pas de temps de 5 minutes, et les résultats du bilan hydrologique simulé (cf. tableau 15) présentent la part des différents flux d'eau, exprimée en % de la pluie.

Dans cette première version, une saturation importante des surfaces naturelles sur les parcelles adjacentes aux noues est constatée, créant un fort débit de ruissellement sur ces parcelles (Q_{NAT}) et un débit à l'exutoire du bassin considérable. Ce dysfonctionnement est lié au fait suivant : lorsque l'eau s'infiltré dans la noue, l'infiltration est contrôlée par la conductivité à saturation du sol en surface, mais pas par la capacité de stockage de la zone non saturée, ce qui engendre une saturation rapide du sol lors des événements pluvieux. Le « module noue » a donc été amélioré pour résoudre ce problème.

b . Prise en compte des stocks d'eau dans les sols dans le « module noue » (Version 2)

La répartition des infiltrations des noues vers les sols nécessite un contrôle au préalable des stocks d'eau dans la zone non saturée afin de limiter ces infiltrations à la capacité de stockage des sols. Lors du calcul des infiltrations dans les noues, la capacité de la zone non saturée de chaque parcelle entourant la noue est désormais contrôlée, en comparant le volume d'eau à infiltrer au volume disponible dans la zone non saturée. Lorsque les sols ne sont plus capables d'infiltrer, l'eau reste dans la noue et devient disponible pour le transfert vers le tronçon aval.

c . Application au bassin versant de référence de l'Ifsttar

L'application des deux versions du module noue montre que la prise en compte des stocks d'eau dans les sols lors de l'infiltration de l'eau dans les noues (Version 2) améliore le fonctionnement du modèle, car la saturation excessive du sol de surface ne se produit plus. Le débit sur les surfaces naturelles est négligeable, celui à l'exutoire est abaissé à 32 % au lieu de 90 % avec la version 1.

Scénario	P	ET	Q _{NAT}	Q _{VOI}	Q _{BAT}	I _{RES,EP}	I _{RES,EU}	Q _{OUT}	Δ _{STOCK}
Module noue version 1	100	34	56.9	2.7	27	65	132	90	-241
Module noue version 2	100	32	0.1	2.6	27	20	42	32	-17

Tableau 15 - Bilan hydrologique sur l'écoquartier Bottière-Chénaie sur l'année 2014 en % des précipitations, (ET : évapotranspiration, Q_{NAT,VOI,BAT} : ruissellement sur les surfaces naturelles, les voiries et le bâti, I_{RES,EP} : infiltrations dans les noues, I_{RES,EU} : infiltration dans le réseau d'eaux usées Δ_{STOCK} : variation du stock d'eau dans le sol)

Les sols étant moins saturés, la nappe superficielle simulée sur l'année 2014, moyennée sur le bassin versant, est abaissée avec la prise en compte des stocks d'eau dans les sols tout en restant tout de même assez élevée (Version 2) (Figure 77).

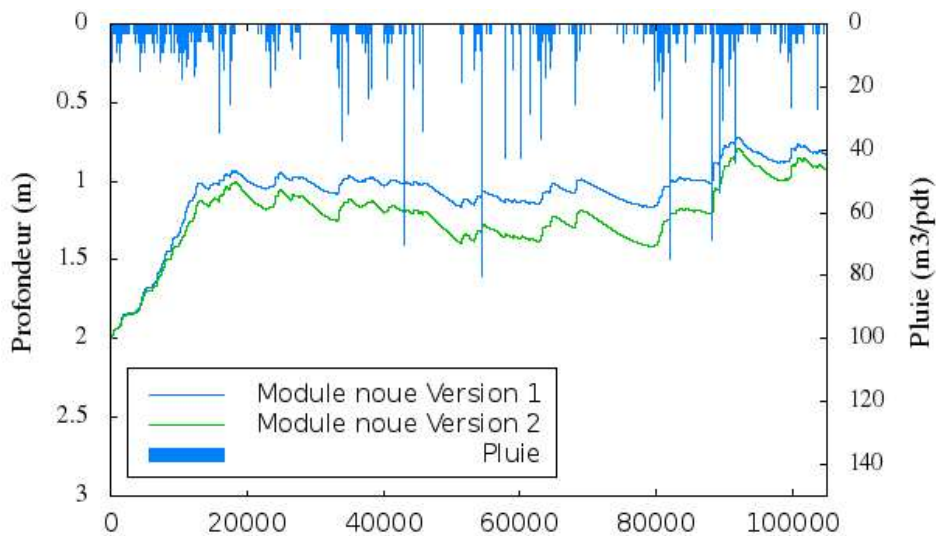


Figure 77 - Profondeur moyenne de la nappe superficielle simulée sur l'année 2014 sur le bassin versant de l'écoquartier Bottière-Chénaie

La première comparaison des simulations aux observations sur ce bassin versant de référence a montré que les volumes ruisselés par événement pluvieux étaient corrects (Figure 78), mais que les débits instantanés étaient souvent surestimés. Une analyse de sensibilité a été menée sur les paramètres de la fonction de transfert pour essayer d'améliorer ce phénomène. L'expression des coefficients de l'équation tirée du schéma de Muskingum (formule 4:3) est donnée par :

$$C_0 = \frac{-k\alpha + 0.5\Delta t}{(k-1)\alpha + 0.5\Delta t}, \quad C_1 = \frac{k\alpha + 0.5\Delta t}{(k-1)\alpha + 0.5\Delta t} \quad \text{et} \quad C_2 = \frac{(k-1)\alpha - 0.5\Delta t}{(k-1)\alpha + 0.5\Delta t} \quad (4:4)$$

Avec :

$$Q^{j+1}(t+dt) = C_0 Q^j(t+dt) + C_1 Q^j(t) + C_2 Q^{j+1}(t) \quad (4:5)$$

Le coefficient k est estimé pour chaque tronçon à partir de la formule suivante :

$$k = \frac{Long}{V}, \quad \text{où : } V = Rugo \cdot R_h^{2/3} \cdot Pente^{0.5} \quad \text{et} \quad R_h = \frac{Diam}{4} \cdot (1 + \sin(\theta)) \cdot \frac{\cos(\theta)}{(\pi - \theta)} \quad (4:6)$$

Avec V la vitesse en m/s, Long la longueur du tronçon (m), R_h le rayon hydraulique (m), Pente la pente du tronçon (m/m) et Diam son diamètre (m). Les 3 paramètres de la fonction Muskingum ajustés dans l'analyse de sensibilité sont : Rugo représentant la rugosité de la noue, α l'atténuation et θ le taux de remplissage de la noue.

L'ajustement de ces paramètres montre que l'on peut améliorer la simulation des débits instantanés mais que la surestimation persiste (Figure 79).

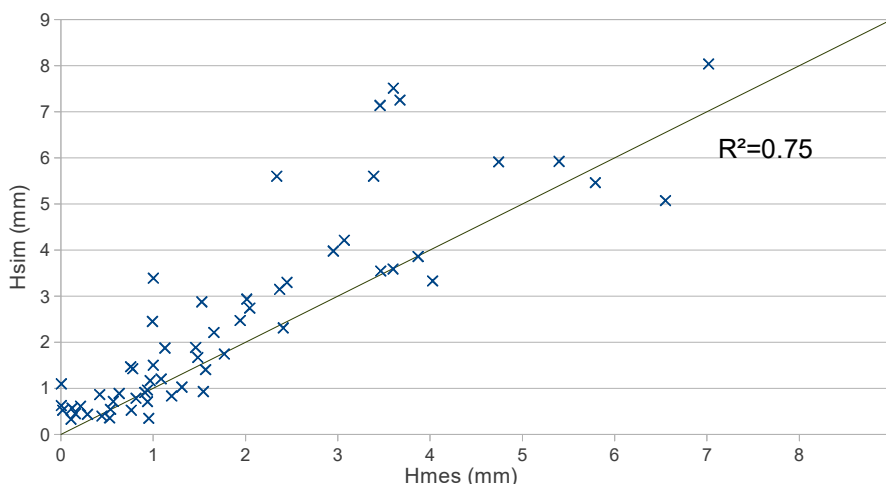


Figure 78 - Comparaison par événement pluvieux du volume ruisselé mesuré et simulé à l'exutoire de l'écoquartier Bottière-Chénaie sur l'année 2014 (113 événements pluvieux)

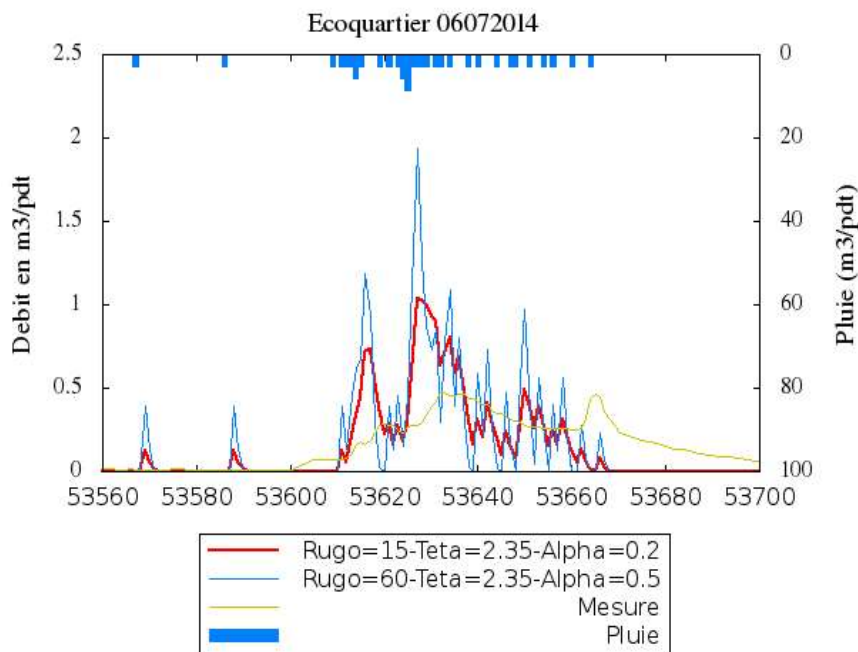


Figure 79 - Débit mesuré et simulé à l'exutoire de l'écoquartier Bottière-Chénaie selon 2 configurations de paramètres de la fonction de transfert, événement du 06/07/2014

Les infiltrations de l'eau du sol vers les deux réseaux d'eau pluviale et d'eau usée s'opèrent dans le modèle URBS en supposant les deux réseaux à la même profondeur. Dans le cas de tronçon de noues (assimilés à des tronçons du réseau d'eau pluviale), une telle hypothèse n'est plus valide, le réseau d'eau usée se trouvant à une profondeur nettement supérieure au radier de la noue. Le modèle est donc modifié afin de représenter de façon explicite le réseau d'eau usée, qui est dans le cas de ce bassin versant, plus profond que les tronçons de noues (qu'il longe à une profondeur de 2m en moyenne)

Les résultats montrent, après modification du modèle, un net changement : la nappe superficielle ne remonte plus au cours de l'année 2014 et semble proche des mesures piézométriques les plus proches de ce secteur, même si la dynamique reste moins marquée (figure 80).

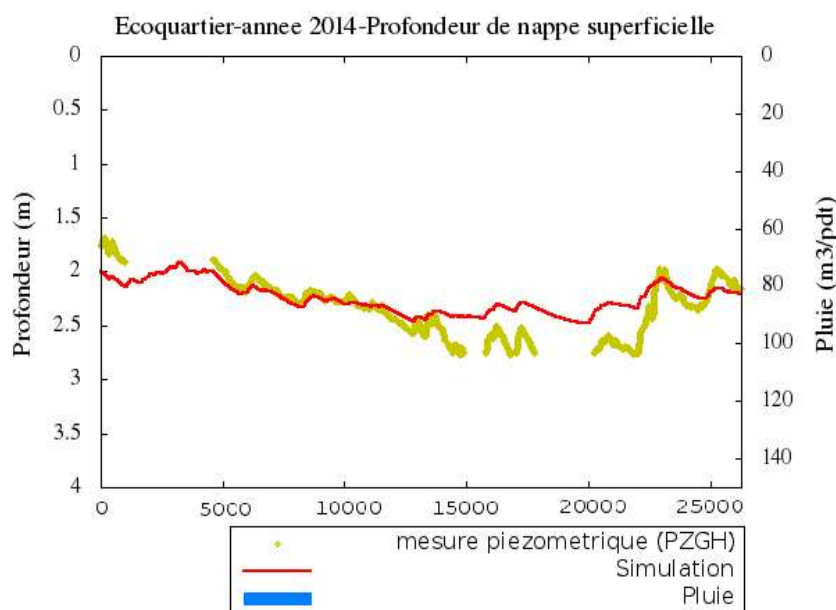


Figure 80 - Comparaison entre la simulation en noir et les mesures piézométriques sur l'année 2014 sur le bassin versant de l'écoquartier

d . Bilan des modifications et des tests effectués

L'évaluation à une échelle plus fine du « module noue », sur un petit bassin versant nantais, a permis d'identifier certaines limites du modèle mais aussi de consolider la représentation de ces ouvrages dans URBS.

La principale modification apportée au modèle porte sur la prise en compte du niveau de saturation du sol pour le calcul de l'infiltration dans les noues. À l'échelle du bassin versant étudié, celle-ci permet de simuler des volumes de ruissellement ainsi que des niveaux de saturations plus proches des observations. Les différents tests de sensibilité effectués indiquent néanmoins que les débits d'écoulement simulés par la fonction de Muskingum dans les noues restent assez peu réalistes, car excessivement élevés.

Dans la suite, l'introduction d'une fonction de régulation, limitant les débits produits par le modèle de transfert, permettrait vraisemblablement de s'affranchir en partie de ce problème. Les résultats obtenus sur le bassin versant de Bottière-Chénaie, illustrent enfin l'importance d'une prise en compte explicite du réseau d'eaux usées pour certaines configurations. Les conclusions de l'application de URBS à la ZAC de Moulon devront donc tenir compte de l'influence que pourrait avoir le remplacement dans les données d'entrée de tronçons de réseau classiques par des portions de noues, de profondeur nettement plus faible.

4.2.2.3 Introduction d'une fonction de régulation des débits sur les noues

a . Description des modifications apportées

Le recours à la régulation des débits est une pratique fréquente qui permet de favoriser la rétention ainsi que les pertes par infiltration dans les ouvrages tout en différant le transfert

des volumes ruisselés vers l'aval. Ce mode de gestion est ainsi envisagé sur la ZAC de Moulon pour limiter les impacts de l'aménagement en aval. La représentation des noues telle que décrite en 4.2.2.2, quoique consolidée, ne permet pas de modéliser la présence d'un organe de régulation des débits au niveau de l'exutoire des ouvrages. Une modification complémentaire du modèle est donc apportée de manière à simuler une régulation des débits au niveau des tronçons de noues.

L'implémentation de la fonction de régulation des débits dans le module de transfert de URBS suppose de conditionner le débit sortant d'un tronçon de noue donné à la hauteur d'eau présente dans ce dernier. La relation utilisée pour décrire l'évolution du débit rejeté en fonction du volume stocké correspond à l'hypothèse d'une noue de section rectangulaire régulée via un simple orifice :

$$Q^j(t) = Q_{max}^j \times \min \left[\left(\frac{V^j(t)}{V_{max}^j} \right)^{0,5}, 1 \right] \quad (4:7)$$

Avec : $Q^j(t)$ désigne le débit rejeté à l'exutoire de la noue, $V^j(t)$ le volume stocké dans la noue (actualisé à chaque pas de temps dans le modèle), V_{max}^j le volume « maximal » de la noue et Q_{max}^j le débit maximal associé au tronçon j , calculé en fonction de la surface active drainée par la noue sur la base d'un débit de consigne Q_{MAX} exprimé en l/s/ha. Le volume V_{max}^j est ici calculé à partir de la longueur du tronçon en supposant la largeur de la noue L_{NOUE} égale à 1 m et sa profondeur de 50 cm. Les résultats présentés en 4.2.2.1 illustrent clairement le risque de voir la capacité totale de la noue dépassée au cours d'une simulation. Le modèle de Muskingum ne permettant pas de rendre compte de l'incidence d'une mise en charge des noues ou d'une surverse, ces erreurs seront, comme pour les tronçons de réseau classiques, simplement ignorées dans la suite.

Un seul et même ouvrage est dans le modèle URBS susceptible d'être représenté comme une succession de tronçons de type « noue ». Dans une telle situation, la régulation des débits ne s'applique alors qu'au tronçon correspondant à l'exutoire de la noue (cf. figure 81). La formule de Muskingum ne permettant pas de modéliser l'influence de la régulation sur les tronçons de noue situés en amont du régulateur, une homogénéisation du niveau d'eau dans la noue est par ailleurs effectuée à chaque pas de temps afin d'éviter que les volumes ne s'accumulent de façon irréaliste dans le tronçon régulé :

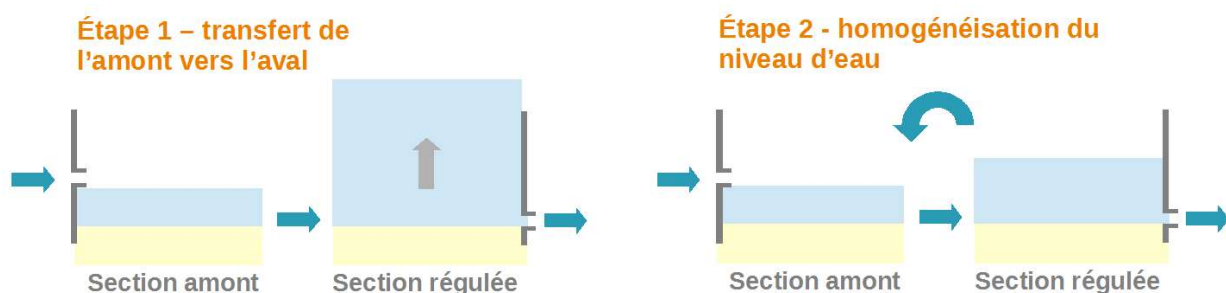


Figure 81 - Représentation schématique du module de régulation des débits

Deux variantes de la configuration décrite ci-dessus sont également introduites afin de confronter différents scénarios de conception des noues :

- 1) *L'introduction d'un volume mort* de profondeur H_{VM} sous le niveau de dispositif de régulation des débits. Le rejet vers l'aval ne s'effectue alors que lorsque le volume stocké dans la noue devient supérieur au volume mort.
- 2) *L'attribution d'une largeur de noue en fonction de la surface active connectée en amont*. Cette modification est principalement motivée par le fait que la largeur de

1 m initialement retenue pour les tronçons de noues ne permet pas toujours d'atteindre des volumes de stockage réalistes. La largeur des noues (dont la profondeur reste fixée à 50 cm) est ici ajustée de manière à assurer la rétention de 25 mm de précipitations (« $L_{\text{NOUE}} \leftrightarrow 25 \text{ mm}$ de rétention »)

b . Incidence de la régulation des débits

Plusieurs scénarios de gestion des eaux pluviales sont par la suite élaborés, en s'appuyant d'une part sur la configuration proposée ainsi que ses deux variantes, mais également en retenant plusieurs valeurs du débit de consigne Q_{MAX} . Les différents cas de figure testés dans la suite sont listés ci-dessous :

- Cas 1 : Absence de régulation des débits
- Cas 2 : Régulation des débits avec $L_{\text{NOUE}} = 1 \text{ m}$ et $H_{\text{VM}} = 0$ (pas de volume mort)
- Cas 3 : Régulation des débits avec $L_{\text{NOUE}} = 1 \text{ m}$ et $H_{\text{VM}} = 10 \text{ cm}$
- Cas 4 : Régulation des débits avec $L_{\text{NOUE}} \leftrightarrow 25 \text{ mm}$ de rétention et $H_{\text{VM}} = 0$
- Cas 5 : Régulation des débits avec $L_{\text{NOUE}} \leftrightarrow 25 \text{ mm}$ de rétention et $H_{\text{VM}} = 10 \text{ cm}$

Les bilans hydrologiques simulés sur trois ans pour ces différents scénarios sont présentés dans le tableau 16. Les résultats obtenus pour les configurations 1 et 2, indiquent en premier lieu que les volumes infiltrés, avec ou sans régulation des débits, restent le plus souvent assez modestes à l'échelle du bassin versant. À moins que des valeurs excessivement réduites de Q_{MAX} ne soit considérées (le scénario à 0.1 l/s/ha, clairement peu réaliste est surtout destiné à tester le comportement du modèle sur une large gamme de Q_{MAX}), la part des volumes infiltrés dans le bilan hydrologique total ne dépasse ainsi pas 3 % des précipitations.

Scénario	P	ET	Q_{NAT}	Q_{VOI}	Q_{BAT}	I_{RES}	Q_{INF}
Référence (pas de noues)*	100	53.3	3.6	5.7	13.4	33.0	0.0
Cas 1 – Absence de régulation*	100	53.4	4.3	5.8	13.4	34.1	1.4
Cas 2 – 0.1 l/s/ha	100	48.2	11.7	6.4	13.4	35.9	6.1
Cas 2 – 1 l/s/ha*	100	53.5	4.9	5.8	13.4	34.2	2.3
Cas 2 – 10 l/s/ha	100	53.6	3.8	5.8	13.4	33.3	0.3
Cas 3 – 1 l/s/ha + volume mort*	100	52.7	6.3	5.9	13.4	35.1	3.8
Cas 4 – 1 l/s/ha*	100	53.7	5.3	5.8	13.4	36.7	5.4
Cas 5 – 1 l/s/ha + volume mort	100	53.5	6.0	5.9	13.4	37.8	7.2

Tableau 16 - Bilan hydrologique (en % des précipitations) simulé à l'état aménagé pour différents scénarios de gestion des eaux pluviales (ET : évapotranspiration, $Q_{\text{NAT,VOI,BAT}}$: ruissellement sur les surfaces naturelles, les voiries et le bâti, I_{RES} : infiltration vers le réseau, Q_{INF} : le volume infiltré via les noues. Les configurations marquées d'un astérisque correspondent à celles présentées figure 82)

La comparaison des volumes infiltrés pour le scénario « Absence de régulation » à ceux simulés pour le « Cas 2 – 1 l/s/ha » permet en revanche bien de conclure à un effet « positif » de la régulation des débits. La présence d'un volume mort, tout comme la diminution du débit de fuite, permet d'accroître le temps de séjour de l'eau dans les noues et se traduit donc par une augmentation significative de la valeur du volume infiltré Q_{INF} . Enfin, l'ajustement de la largeur des noues de manière à permettre la rétention d'un volume équivalent à 25 mm de précipitation sur les surfaces d'apports, qui conduit les plus souvent à retenir une valeur de L_{NOUE} supérieure à la valeur initiale de 1 m, donne également lieu à un accroissement des volumes infiltrés (pour ce dernier cas de figure, il

convient de préciser que l'objectif de rétention de 25 mm de précipitations conduit sur certains tronçons à retenir des valeurs de L_{NOUE} supérieures à 10 m, ce qui interroge à la fois la pertinence de cette approche mais surtout celle du schéma de connexion parcelles-noues généré à l'issu du prétraitement des données SIG).

L'analyse des différents termes des bilans hydrologiques associés aux scénarios testés indique de manière générale que l'infiltration d'une partie des volumes de ruissellement via les noues a pour conséquence une augmentation de l'infiltration vers les réseaux et du ruissellement au niveau des surfaces naturelles. Ce phénomène, vraisemblablement lié à une élévation du niveau de la nappe à proximité des noues, pourrait amener à s'interroger sur la pertinence de l'infiltration des eaux pluviales dans un contexte hydrogéologique tel que celui de la ZAC de Moulon. Pour l'essentiel des configurations testées, l'augmentation des volumes rejetés via les réseaux (du fait de l'accroissement de Q_{NAT} et I_{RES}) dépasse en effet le volume infiltré Q_{INF} .

Les niveaux moyens de nappes simulés à l'échelle du bassin versant pour quelques un des scénarios testés sont présentés figure 82. L'impact de la prise en compte des noues et de la régulation des débits apparaît globalement assez limité, même si une légère élévation du niveau de la nappe peut bien être observée avec l'augmentation de Q_{INF} .

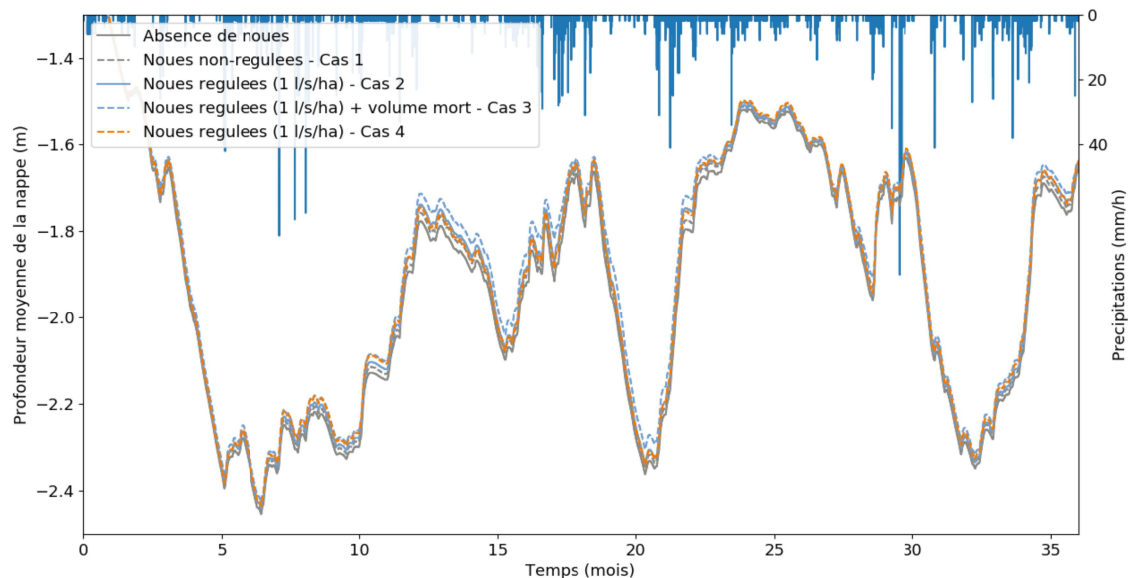


Figure 82 - Comparaison de l'incidence sur le niveau moyen de la nappe des différents scénarios de gestion des eaux pluviales via les noues

Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer cette faible incidence de l'infiltration des eaux pluviales sur le fonctionnement global de la nappe superficielle. Le niveau de la nappe étant déjà relativement élevé en absence de noues, l'apport de volumes supplémentaires vers le sous-sol pourrait assez rapidement être compensée par l'infiltration dans le réseau d'assainissement (ce flux d'infiltration étant d'autant plus important que la nappe est haute). Par ailleurs, toutes les parcelles du bassin n'étant pas raccordées à une noue, l'infiltration des eaux pluviales ne concerne finalement qu'une fraction du bassin versant. Celle-ci ne donnerait donc lieu qu'à une élévation très localisée du niveau de la nappe, dont l'effet resterait marginal à l'échelle de la ZAC.

Si l'effet de la régulation des débits sur le niveau moyen de la nappe reste très limité, son incidence peut en revanche clairement être observée sur les débits simulés aux exutoires du réseau d'assainissement (cf. figure 83). La régulation des débits produit ici des résultats conformes à ce qui peut en être attendu, avec un « étalement » des

hydrogrammes caractérisé par une atténuation des débits de pointes et une prolongation de l'écoulement à la fin de l'évènement. Les différences entre les deux scénarios de régulation, avec une plus forte atténuation des débits pour le « cas 4 », s'expliquent par le fait que l'attribution d'une largeur de noue supérieur à 1 m favorise les pertes par infiltration et influence également le volume V_{MAX} dans la formule (4:7), le débit de consigne Q_{MAX} étant moins facilement atteint. Enfin, la figure 83 fait clairement apparaître pour la configuration « non-réglée » l'une des limites du modèle mises en évidence en 4.2.2.2 : en absence de régulation, les noues ne semblent en effet produire qu'une très faible atténuation des débits ce qui amène à s'interroger sur la paramétrisation du transfert hydraulique au sein de ces dernières.

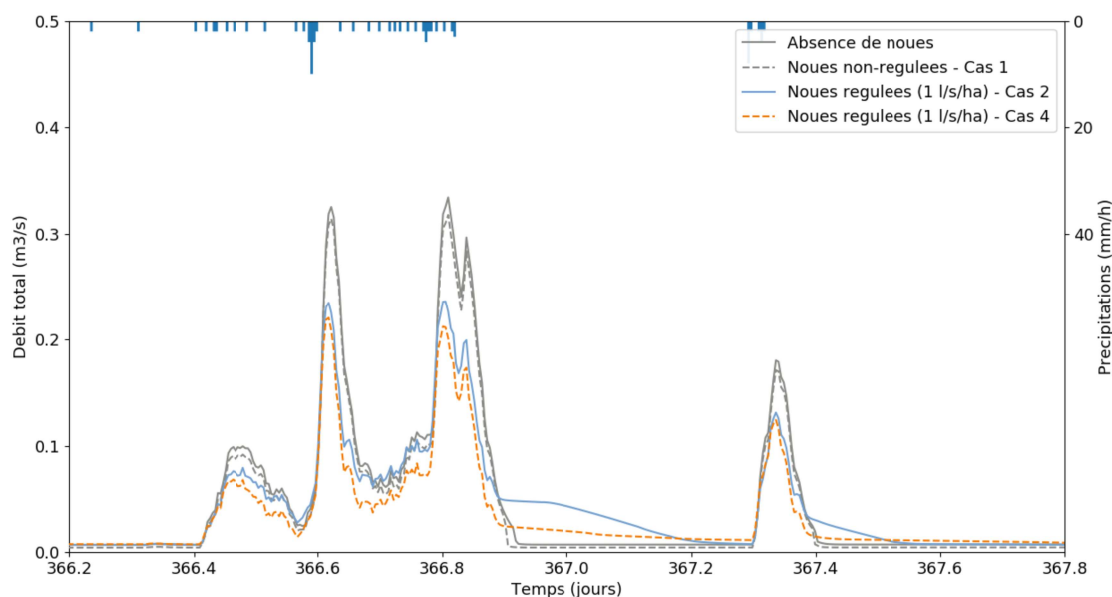


Figure 83 - Effet de la régulation des débits sur les débits totaux simulés aux exutoires du bassin versant (Cas 1: absence de régulation, cas 2: régulation à 1 l/s/ha avec $L_{NOUE} = 1m$, cas 4 : régulation des débits à 1 l/s/ha avec $L_{NOUE} \leftrightarrow 25$ mm de rétention)

c . Conclusion

Les différents tests réalisés ne permettent pas de conclure à une forte incidence de la régulation des débits sur le bilan hydrologique de la ZAC de Moulon. Si l'intégration dans le modèle de noues équipées de dispositifs de régulation semble bien affecter les hydrogrammes simulés à l'exutoire du bassin versant, son effet sur les niveaux de nappes et les bilans hydriques reste nettement plus modéré. La description des noues adoptée ici produit donc un effet essentiellement hydraulique mais ne donne en revanche pas lieu à une infiltration suffisante pour réellement modifier le bilan hydrologique du bassin versant.

La faiblesse du flux d'infiltration Q_{INF} simulé dans les noues peut être expliquée par différents facteurs. L'analyse des données géographiques utilisées en entrée du modèle URBS indique en premier lieu que, pour les simulations réalisées, une proportion non-négligeable de noues ne reçoivent pas de ruissellement. À l'issue du prétraitement géographique permettant d'établir les connexions des parcelles au réseau, certaines portions du réseau ne sont en effet raccordées à aucune parcelle et ne sont donc pas « alimentées » par le ruissellement produit en amont. La difficulté à simuler des flux d'infiltration Q_{INF} conséquents pourrait donc être en partie liée au prétraitement des données SIG effectué en amont de la modélisation. Différents tests (ne figurant pas dans le rapport) ont pu être réalisés en modifiant les données géographiques en entrée de

URBS, de manière à forcer le raccordement des parcelles aux noues situées en leur périphérie. Les résultats obtenus indiquent alors que si la connexion d'un plus grand nombre de parcelle aux tronçons de noue se traduit par une augmentation de Q_{INF} , celle-ci reste relativement limitée (de l'ordre de 20 % par rapport aux valeurs présentées dans le tableau 16). Le prétraitement des données géographiques ne suffit donc pas à lui seul à expliquer la faible sensibilité des sorties du modèle à la régulation des débits.

L'augmentation des valeurs de Q_{INF} simulée pour les variantes de conception intégrant un volume mort ou une largeur de noue L_{NOUE} supérieure à 1 m suggère que le faible effet de la régulation des débits pourrait être en grande partie lié aux hypothèses utilisées pour décrire le fonctionnement hydrologique des ouvrages. Le recours à une valeur de 1 m pour L_{NOUE} apparaît par exemple discutable, puisque conduisant sur certains tronçons à des volumes de stockage dérisoires au regard des surfaces d'apport. Si la sollicitation excessive de certains tronçons de noues peut amener à s'interroger sur la cohérence du plan de drainage parcelle-réseau spécifié en entrée du modèle, il semble important de souligner qu'une rétention à la parcelle de volumes importants est en pratique exigée sur la ZAC pour les nouvelles réalisations. Approfondir la modélisation de la gestion des eaux pluviales sur la zone d'étude nécessitera donc de mieux décrire le fonctionnement hydrologique des noues mais aussi de rendre compte de cette rétention à la parcelle.

Il semble enfin important de souligner que l'emprise au sol des noues se trouve à la fois comptabilisée dans le module de transfert (via L_{NOUE} lors du calcul de Q_{INF}) et au niveau des unités hydrologiques (la surface occupée par les noues étant attribuée aux parcelles adjacentes comme une surface naturelle). Les volumes infiltrés sur les unités hydrologiques lors de la production du ruissellement demeurant faibles devant Q_{INF} , une telle approche n'introduit vraisemblablement pas de biais significatif dans l'estimation des volumes infiltrés. Cette dualité de l'objet noue, à la fois élément du réseau et portion de l'unité hydrologique, n'offre cependant qu'une description partiellement satisfaisante de son fonctionnement hydrologique, et pourrait donc à terme être discutée.

4.2.2.4 Application du modèle à des pluies de projet

Le diagnostic du modèle de transfert présenté en 4.2.2.1 indique que les débits simulés par URBS dans le réseau d'assainissement ne peuvent le plus souvent pas être considérés comme fiables, ce qui rend inenvisageable toute étude de la réponse hydraulique du réseau à une pluie de projet.

Bien que le modèle URBS n'ait pas été développé pour de telles applications, et qu'il ne constitue par conséquent pas la solution la plus adaptée, une étude du fonctionnement hydrologique du bassin versant sur la base des différents termes du bilan hydrique reste en revanche possible (à condition que les résultats soient interprétés avec une certaine prudence). Une telle démarche, peut par ailleurs être complétée par une analyse des dysfonctionnements du modèle de transfert analogue à celle présentée en 4.2.2.1 afin d'identifier les tronçons sur lesquels une surcharge est susceptible de se produire lors d'un évènement pluvieux important.

Dans la suite, une analyse du comportement du modèle sous trois pluies de projet est donc réalisée en retenant pour chacune d'entre elles deux hypothèses contrastées sur le niveau moyen de la nappe en début de simulation.

Les pluies de projets sélectionnées sont présentées dans le tableau 17 :

	Lame d'eau	Durée
Pluie de projet de « 1 ^{er} niveau »	37 mm	2 h

Pluie de projet de « 2 ^{ème} niveau »	60 mm	2 h
Pluie de projet de « 3 ^{ème} niveau »	93 mm	12 h

Tableau 17 - Caractéristiques des pluies de projets telles que définies dans le dossier d'autorisation au titre de la loi sur l'eau du projet urbain du Moulon

Une durée de modélisation de 24 h est ici adoptée pour générer les bilans hydrologiques et identifier les dysfonctionnements correspondant au dépassement du débit capable des différents tronçons du réseau. Les niveaux de nappe utilisés comme conditions initiales des différentes simulations correspondent à ceux simulés au 15/09/2012 (niveau bas) et 15/02/2013 (niveau haut) à partir des simulations de référence (sur une durée de 3 ans, de début 2011 à fin 2013).

a . Résultats pour l'évènement de niveau 1

Le bilan hydrologique associé à la première pluie de projet est présenté dans le tableau 18. La figure 84 fait apparaître la distribution et la fréquence des dysfonctionnements du modèle de transfert pour ce même évènement.

Scénario	P	ET	Q _{NAT}	Q _{VOI}	Q _{BAT}	I _{RES}	Q _{INF}	Δ _{STOCK}	Z _{INI}	Z _{FIN}
Etat initial, nappe haute ¹	100	0.3	28.0	7.1	5.7	1.2	0.0	57.7	-2.21	-2.05
Etat initial, nappe basse ²	100	0.3	28.0	7.1	5.7	1.2	0.0	57.7	-2.51	-2.35
Etat futur, nappe haute ¹	100	0.2	23.0	15.1	15.4	1.6	0.5	44.4	-1.78	-1.64
Etat futur, nappe basse ²	100	0.2	21.9	15.1	15.4	0.6	0.5	47.7	-2.29	-2.13

Tableau 18 - Bilan hydrologique associé à la pluie de projet « de niveau 2 » (¹niveau simulé au 15/02/2013, ²niveau simulé au 15/09/2012)

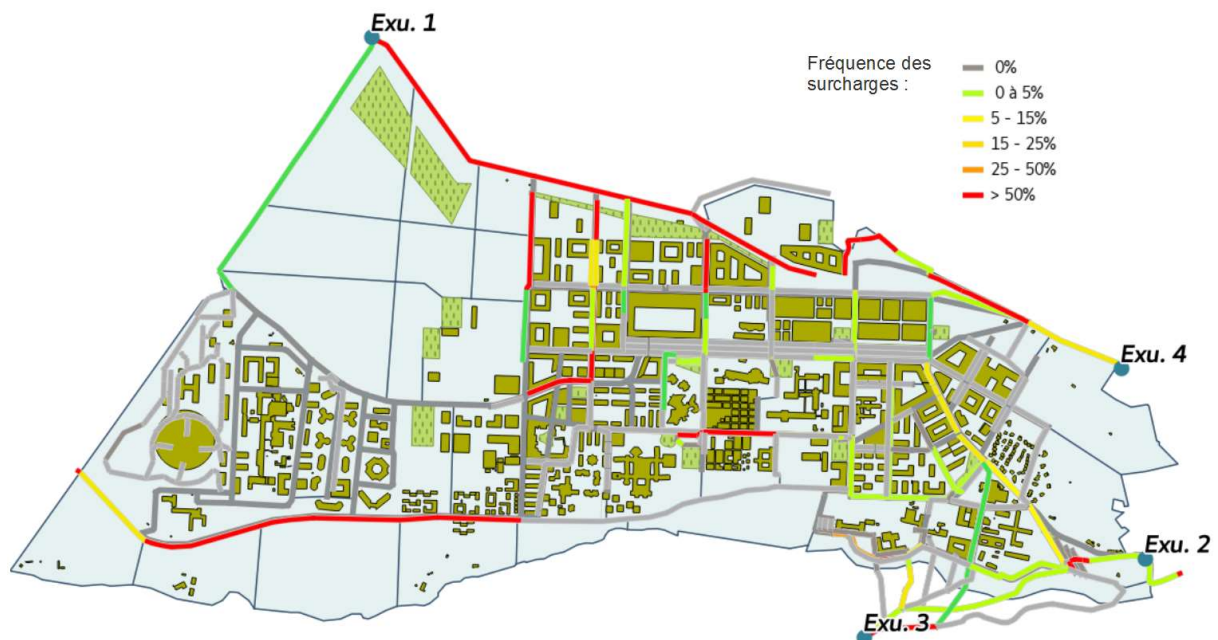


Figure 84 - Distribution des dysfonctionnements correspondant à une surcharge en débit du réseau pour la pluie de projet de niveau 1 à l'état aménagé

Le bilan hydrologique permet en premier lieu de remarquer que l'évènement pluvieux se traduit pour l'ensemble des scénarios considérés par une variation importante du stock d'eau dans le sol Δ_{STOCK} sol. Ce résultat traduit le fait, qu'en dépit d'une intensité assez

élevée, une part non-négligeable des volumes précipité peut ici être infiltrée dans le sous-sol. Le ruissellement issu des différents types de surfaces urbaines reste donc relativement limité, n'excèdent pas 40 % à l'état initial et 50 % à l'état futur. Les différences observées d'un scénario à l'autre semblent essentiellement expliquée par l'évolution de l'occupation des sols entre l'état initial et l'état futur (les conditions initiales n'ont qu'une incidence limitée sur les termes du bilan). Pour l'ensemble des scénarios, l'élévation du niveau de la nappe à l'issu des simulations demeure enfin assez limitée ; les volumes précipités ne sont ici clairement pas suffisants (en particulier sur de ci-courtes périodes) pour occasionner des fluctuations importantes dans la zone saturée.

La distribution des erreurs détectées sur les différents tronçons du réseau indique quant à elle que, même lorsque des événements relativement modérés (tels que la pluie de niveau) sont considérés, les débits simulés par le modèle de Muskingum ne peuvent pas être considérés comme réalistes pour ce cas d'étude.

b . Résultats pour l'événement de niveau 2

Les résultats associés à la seconde pluie de projet (60mm sur 2h) sont présentés dans le tableau 19 et la figure 85 :

Scénario	P	ET	Q _{NAT}	Q _{VOI}	Q _{BAT}	I _{RES}	Q _{INF}	Δ _{STOCK}	Z _{INI}	Z _{FIN}
Etat initial, nappe haute ¹	100	0.2	47.5	7.5	5.7	0.7	0.0	38.4	-2.21	-2.05
Etat initial, nappe basse ²	100	0.2	47.5	7.5	5.7	0.7	0.0	38.5	-2.51	-2.35
Etat futur, nappe haute ¹	100	0.1	38.2	15.8	15.4	1.0	0.5	29.2	-1.78	-1.64
Etat futur, nappe basse ²	100	0.1	37.2	15.8	15.4	0.2	0.5	31.6	-2.29	-2.13

Tableau 19 - Bilan hydrologique associé à la pluie de projet « de niveau 2 » (¹niveau simulé au 15/02/2013, ²niveau simulé au 15/09/2012)

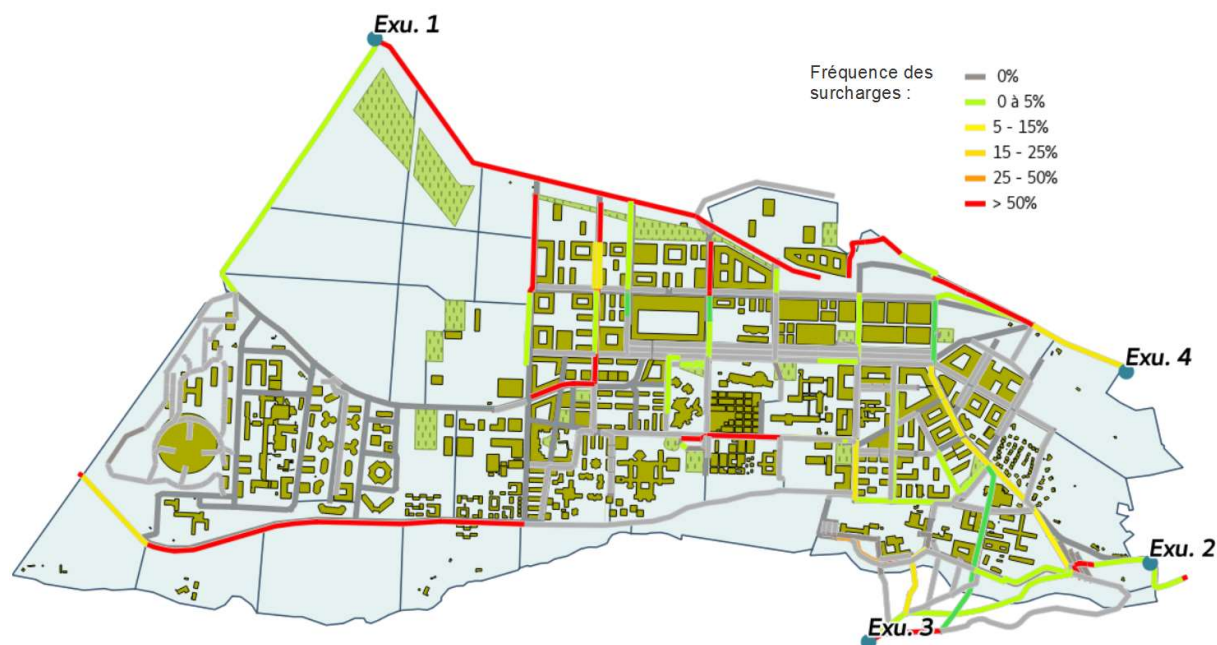


Figure 85 - Distribution des dysfonctionnements correspondant à une surcharge en débit du réseau pour la pluie de projet de niveau 2 à l'état aménagé

La part du ruissellement total dans le bilan hydrologique apparaît ici nettement plus élevée que pour la première pluie de projet (de l'ordre de 60 à 70 % des précipitations contre 40 à 50 % pour l'évènement de niveau 1). La variation du stock d'eau dans le sol Δ_{STOCK},

traduisant la capacité du bassin versant à « retenir » une partie des précipitations, est ainsi nettement réduite sous l'effet de l'augmentation des volumes et de l'intensité des précipitations. Une fois encore, les conditions initiales dans la zone saturée ne semblent pas avoir de réelle incidence sur les différents termes du bilan hydrique. La formation du ruissellement est donc ici principalement expliquée par le dépassement de la capacité d'infiltration du sol.

Les résultats du diagnostic sur le fonctionnement du réseau (figure 85) demeurent quant à eux assez similaires à ces obtenus pour la première pluie de projet : si le comportement du modèle de transfert semble satisfaisant pour certains tronçons, des débits excessivement élevés et incompatibles avec les caractéristiques géométriques du réseau sont néanmoins simulés sur un bon nombre d'entre eux.

c . Résultats pour l'événement de niveau 3

Les résultats associés à la dernière pluie de projet (93mm sur 12h) sont présentés dans le tableau 20 et la figure 86 :

Scénario	P	ET	Q _{NAT}	Q _{VOI}	Q _{BAT}	I _{RES}	Q _{INF}	Δ _{STOCK}	Z _{INI}	Z _{FIN}
Etat initial, nappe haute ¹	100	0.1	13.7	7.4	5.8	0.5	0.0	71.3	-2.21	-2.02
Etat initial, nappe basse ²	100	0.1	2.8	7.4	5.8	0.5	0.0	82.6	-2.51	-2.31
Etat futur, nappe haute ¹	100	0.1	18.5	14.6	14.4	0.6	0.5	48.7	-1.78	-1.64
Etat futur, nappe basse ²	100	0.1	7.2	14.6	14.4	0.2	0.5	56.4	-2.29	-2.10

Tableau 20 - Bilan hydrologique associé à la pluie de projet « de niveau 3 » (¹niveau simulé au 15/02/2013, ²niveau simulé au 15/09/2012)

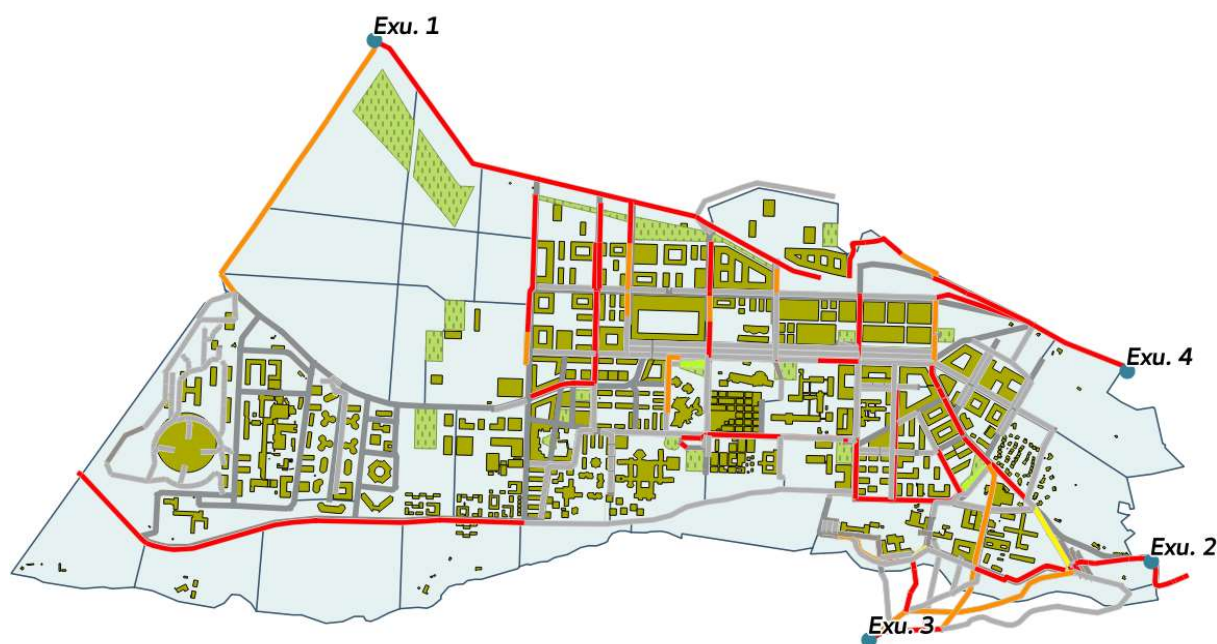


Figure 86 - Distribution des dysfonctionnements correspondant à une surcharge en débit du réseau pour la pluie de projet de niveau 2 à l'état aménagé

Le tableau 20 fait apparaître des différences notables avec les bilans hydrologiques simulés pour les pluies de projet de niveau 1 et 2, en particulier à l'état initial. En dépit de volume de précipitations plus importants, le passage à une pluie de 12 h se traduit en effet par une diminution considérable des volumes ruisselés qu'illustrent les valeurs de Δ_{STOCK}. La proportion importante de surfaces naturelles à l'état initial permet ici d'infiltrer

une grande partie des volumes précipités. À l'inverse des résultats précédents, la modification du niveau de la nappe en début de simulation donne par ailleurs lieu à des variations assez marquées du volume de ruissellement Q_{NAT} : les intensités étant assez réduites la formation du ruissellement sur les surfaces naturelle correspondent ici plus à une saturation localisée du sol la nappe qu'à un dépassement de la perméabilité du sol (ruissellement hortonien).

Enfin, la figure 86 montre quant à elle que la diminution de l'intensité des précipitations ne se traduit pas par une amélioration du fonctionnement du module de transfert hydraulique, mais par une augmentation de la fréquence des dysfonctionnements. Un tel résultat pourrait en partie être expliqué par l'augmentation de la durée des précipitations, la fréquence des dysfonctionnements étant calculée sur la durée totale des précipitations.

4.2.3 Incidence du prétraitement géographique

4.2.3.1 Éléments préliminaires

La question de l'influence du prétraitement des données géographiques, jusqu'alors peu abordée dans les applications du modèle URBS, tient une place importante dans les travaux menés entre 2015 et 2017. Avant de détailler de façon plus approfondie les différentes simulations mises en œuvre pour tester cet aspect de la modélisation, il semble important d'indiquer que l'élaboration des différents tests a permis (de façon inopinée) de repérer une erreur dans la façon dont le modèle mobilisait jusqu'alors les informations liées à la profondeur des différents tronçons du réseau sur la ZAC de Moulon.

La connaissance de la profondeur des différents tronçons du réseau s'avère déterminante pour le calcul du flux d'infiltration vers le réseau I_{RES} . Ce terme d'infiltration est calculé au niveau de chaque unité hydrologique à partir de la formule suivante :

$$I_{drain}^u(t) = K_s e^{-\frac{z_s}{M}} \frac{\lambda}{d_f^{u2}} \times (z_{sol} - z_{res} - \bar{z}_s)^u \quad (4:8)$$

Où : I_{drain}^u désigne le flux d'infiltration sur l'unité u , K_s la conductivité hydraulique du sol en surface (en $m.s^{-1}$), z_s la profondeur de la nappe (en m), z_{sol} l'altitude du sol (en mNGF), z_{res} l'altitude du réseau (en mNGF), λ et μ deux paramètres du modèle et d_f^u la distance du réseau au point le plus éloigné de l'unité hydrologique (on utilisera aussi le terme « parcelle »).

La valeur du flux I_{RES} est susceptible d'avoir un rôle important dans le fonctionnement hydrologique de la zone d'étude du fait de la présence d'une nappe superficielle. L'anomalie identifiée, corrigée pour l'ensemble des simulations présentées dans ce rapport, a pour conséquence d'attribuer une profondeur incorrecte à certaines portions du réseau d'assainissement. Sans remettre en cause l'ensemble des conclusions formulées jusqu'alors quant au fonctionnement hydrologique du bassin versant, la correction de cette erreur donne néanmoins lieu à des différences par rapport à certains résultats acquis à l'issue de la première application du modèle à la ZAC de Moulon.

Les modifications du bilan hydrologique à l'état initial et à l'état aménagé sont présentées dans le tableau 21. L'impact de la correction effectuée sur l'attribution de la profondeur des différents tronçons de réseau Z_{RES} apparaît relativement limité à l'état initial et ne se traduit que par une légère augmentation de la valeur de I_{RES} . Pour l'état aménagé, les modifications du bilan hydrologique se révèlent en revanche nettement plus significatives.

La forte diminution de I_{RES} par rapport à l'état initial, pour laquelle l'hypothèse d'un effet de la discrétisation avait pu être avancée, n'est ici plus observée. Cette augmentation importante (de près de 50 %) du flux d'infiltration vers le réseau se traduit par une modification des autres termes du bilan et notamment de l'évapotranspiration et du ruissellement au niveau des surfaces naturelles, sous l'effet d'un abaissement significatif du stock d'eau dans le sol.

Scénario	P	ET	Q_{NAT}	Q_{VOI}	Q_{BAT}	I_{RES}	Δ_{STOCK}
Etat initial avant correction	100	69.6	3.1	2.7	5.0	28.9	-9.2
Etat initial après correction	100	68.1	2.9	2.7	5.0	32.2	-10.7
Etat futur avant correction	100	59.2	5.3	6.1	13.3	18.9	-3.6
Etat futur après correction	100	53.3	3.6	5.7	13.3	33.0	-9.7

Tableau 21 - Incidence de la correction de l'erreur sur l'attribution de la profondeur des tronçons de réseau sur le bilan hydrologique (en % des précipitations) simulé à l'état initial et à l'état futur (P : précipitations, ET : évapotranspiration, $Q_{NAT,VOI,BAT}$: ruissellement sur les différentes surfaces, I_{RES} : infiltration vers le réseau, Δ_{STOCK} : variation du stock d'eau dans le sol)(remarque : les noues ne sont pas modélisées)

Ces modifications du bilan hydrologique ont des conséquences immédiates sur le niveau moyen de la nappe simulé à l'échelle du bassin versant. Comme l'illustre la figure 87, alors que le niveau de la nappe superficielle n'est que modérément affecté par l'erreur dans l'attribution de Z_{RES} à l'état initial, la correction de cette anomalie donne lieu à une diminution considérable des niveaux piézométriques simulés à l'état futur. Si les résultats obtenus permettent toujours de conclure à une élévation du niveau de la nappe suite à l'aménagement, ses proportions apparaissent ici bien plus limitées qu'à l'issu de simulations initiales (de l'ordre 25 cm de contre près de 1 m pour les premiers résultats).

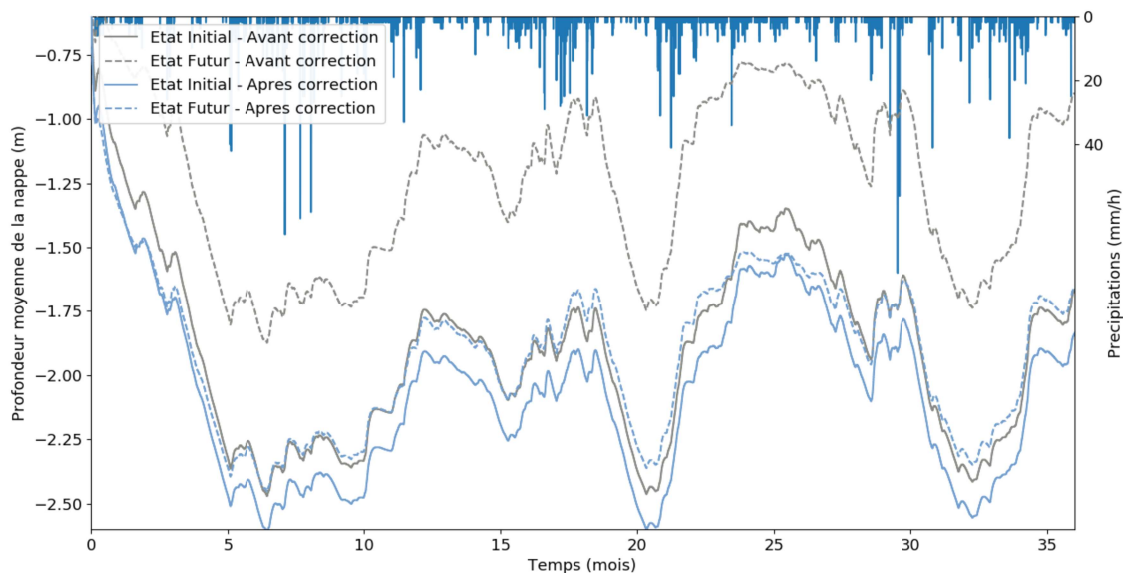


Figure 87 - Illustration de l'incidence de la correction de l'erreur identifiée dans l'utilisation de l'information relative à la profondeur du réseau à l'état initial et à l'état aménagé

Les écarts entre les niveaux de nappe simulés avant et après correction de l'anomalie dans l'attribution de Z_{RES} demeurent relativement faibles à l'état initial (de l'ordre d'une quinzaine de centimètres). Il semble donc possible de considérer que le calage initial du modèle, effectué à partir des observations piézométriques avant correction de l'erreur, demeure acceptable. Compte tenu des écarts observés, il paraît toutefois clair que la paramétrisation initialement retenue ne permet désormais plus de reproduire de façon

aussi satisfaisante les niveaux de nappes mesurés. La consolidation des résultats précédents supposera donc, à terme, de renouveler la procédure de calage, visant à ajuster les différents paramètres du modèle, de manière à minimiser les écarts entre les niveaux de nappes simulés et les observations.

Au-delà de ses conséquences immédiates sur les bilans hydrologiques et les niveaux de nappe présentés précédemment, l'impact du mode d'attribution de Z_{RES} au niveau de chaque unité hydrologique invite enfin à prêter une attention particulière au prétraitement des données géographiques et notamment à l'élaboration des connexions parcelles-réseau qui conditionnent le choix de Z_{RES} . Différents scénarios de prétraitement géographique seront donc introduits dans la suite de manière à tester l'influence des connexions parcelles-réseau et d'informations inhérentes aux données géographiques telles que l'occupation des sol.

4.2.3.2 Méthodologie

Les données géographiques utilisées en entrée du modèle URBS permettent de renseigner des informations sur le réseau de drainage et les parcelles constitutives du bassin versant. L'occupation des sols est spécifiée via des entrées relatives aux parcelles qui conditionnent par ailleurs la discrétisation spatiale de la zone d'étude (sur la base du découpage cadastral). L'incidence relative de ces « informations » spécifiées en entrée de modèle demeurant mal connue, différentes configurations correspondant à différents jeux de données géographiques, sont ici sélectionnées afin de tester l'influence de la discrétisation spatiale, de l'occupation des sol et des données relatives au réseau :

	Discrétisation	Réseau	Occupation du sol
État initial (référence)	Initiale	Initial	Initiale
État futur (référence)	Future	Futur	Future
État initial, discrétisation future	Future	Initial	Initiale
État futur, discrétisation initiale	Initiale	Futur	Future
État initial, occupation future	Initiale	Initial	Future
État futur, occupation initiale	Future	Futur	Initiale
État initial, réseau futur	Initiale	Futur	Initiale
État futur, réseau initial	Future	Initial	Future

Tableau 22 - Liste des scénarios utilisés pour tester l'influence de la discrétisation spatiale, de l'occupation des sols et des données relatives aux réseaux sur les sorties du modèle. L'effet de la discrétisation, de l'occupation du sol et du réseau est évalué en comparant les 6 derniers scénarios aux deux scénarios « de référence ».

La production des données d'entrée correspondant à certains des scénarios présentés dans le tableau 22 suppose d'établir des connexions parcelles-réseau jusqu'alors non-décrites par les données utilisées à l'état initial et à l'état futur, avec des relations « réseau initial – parcelles futures » et « réseau initial – parcelles futures ».

Les outils de prétraitement initialement appliqué à la ZAC de Moulon n'ayant pu être réutilisés pour générer ces nouvelles connexions, une nouvelle procédure de prétraitement, reprenant les principes décrits dans la thèse d'Yinghao Li (2015), a ici dû être développée pour générer les jeux de données correspondant à l'ensemble des scénarios décrits dans le tableau 22.

Bien que reposant sur une approche similaire à celle adoptée pour l'application initiale de URBS à la ZAC de Moulon, la procédure développée dans le cadre de ce travail ne

permet de reproduire (pour les scénarios de référence) des connexions parcelles-réseau strictement identiques à celles utilisées jusqu'alors. Ces différences, sont ici essentiellement expliquées par 1) une attribution erronée du centre de gravité de certaines parcelles dans le prétraitement original et 2) l'introduction dans le nouveau prétraitement d'une condition imposant que le point de connexion au réseau se situe à une altitude inférieure à celle de la parcelle. Ces modifications des relations parcelles-réseau, quoique relativement limitées, ont une incidence sur les résultats de modélisation, tant au niveau des bilans hydrologiques que des niveaux de nappe simulés (cf. tableau 23 et figure 88). Un tel résultat permet donc de confirmer le poids du traitement effectué à partir des données SIG pour relier les parcelles au réseau et invite à mener une réflexion pour adapter au mieux ce traitement à la ZAC de Moulon.

Scénario	P	ET	Q _{NAT}	Q _{VOI}	Q _{BAT}	I _{RES}	Δ _{STOCK}
Etat initial (prétraitement initial)	100	68.1	2.9	2.7	5.0	32.2	-10.7
Etat initial (nouveau traitement)	100	63.6	2.2	2.6	5.0	40.5	-13.9
Etat futur (prétraitement initial)	100	53.3	3.6	5.7	13.4	33.0	-9.7
Etat futur (nouveau traitement)	100	52.1	2.4	5.7	13.4	36.9	-10.5

Tableau 23 - Modifications du bilan hydrologique associées à l'utilisation d'une nouvelle procédure de prétraitement des données géographiques

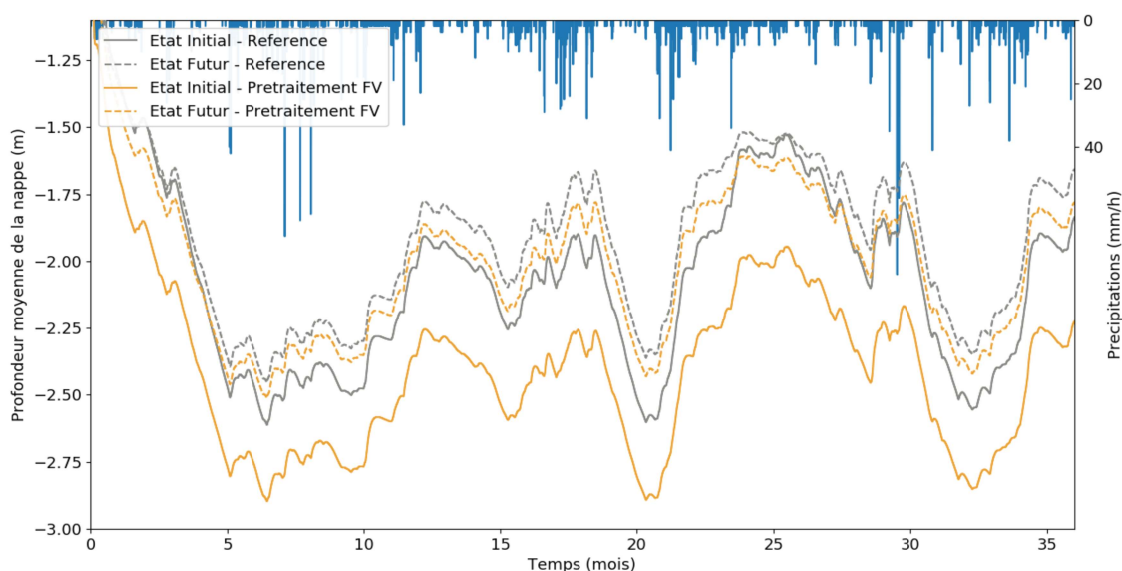


Figure 88 - Influence du changement de procédure de prétraitement sur les niveaux moyens de nappes simulés sur le bassin d'étude (le nouveau prétraitement est ici désigné comme « prétraitement FV »)

Bien que donnant lieu à des résultats sensiblement différents de ceux obtenus via le prétraitement géographique « initial », la « nouvelle » procédure de traitement des données SIG est ici conservée pour analyser successivement l'effet de la discrétisation, de l'occupation des sols et du réseau.

4.2.3.3 Résultats des différents tests

a . Effet de la discrétisation

L'application du modèle URBS à la ZAC de Moulon s'appuie sur des niveaux de

discrétisation spatiale assez différents entre l'état initial et l'état aménagé, avec un découpage parcellaire relativement fin dans le premier cas et une discrétisation plus grossière mais plus régulière dans le second. Le nombre de parcelles (et donc d'unité hydrologiques) passe ainsi de 378 à 87 entre l'état initial et l'état aménagé. Une telle différence dans la discrétisation du bassin versant est susceptible d'influencer certaines composantes du modèle URBS et les termes du bilan hydrologique associés. L'hypothèse d'une influence de la discrétisation a ainsi été émise à l'issu des travaux menés entre 2011 et 2015 pour tenter d'expliquer la diminution de l'infiltration dans le réseau I_{RES} . Même si les résultats actualisés (cf. tableaux 21 et 23) ne permettent plus vraiment d'observer une telle tendance, il reste ici pertinent de s'assurer que cette différence de discrétisation n'introduit pas de biais significatif pour l'analyse de l'impact du projet d'aménagement.

Les résultats obtenus en croisant les scénarios de discrétisation entre l'état initial et l'état futur sont présentés dans le tableau 24 :

Scénario	P	ET	Q_{NAT}	Q_{VOI}	Q_{BAT}	I_{RES}	Δ_{STOCK}
Etat initial (référence)	100	63.6	2.2	2.6	5.0	40.5	-13.9
Etat initial, discrétisation future	100	63.0	1.5	2.8	5.0	40.5	-12.8
Etat futur (référence)	100	52.1	2.4	5.7	13.4	36.9	-10.5
Etat futur, discrétisation initiale	100	51.7	3.9	5.9	13.4	36.8	-11.3

Tableau 24 - Effet d'un changement de discrétisation à l'état initial et à l'état futur (l'ensemble des simulations sont réalisées pour les données générées à partir du « nouveau prétraitement géographique »)

Les bilans hydrologiques ne semblent de manière générale que très modérément influencés par le changement de discrétisation. Le terme I_{RES} , désignant l'infiltration de la zone saturée vers le réseau, apparaît en particulier comme le moins affecté par la modification des données d'entrée, ce qui tend à infirmer l'hypothèse initiale d'une augmentation de ce flux avec le niveau de discrétisation. Les termes de ruissellement Q_{NAT} et Q_{VOI} , bien que demeurant faibles, connaissent en revanche des variations assez marquées d'un scénario de discrétisation à l'autre. Le passage à une discrétisation plus fine pourrait ainsi entraîner une élévation localisée de la nappe superficielle se traduisant par une augmentation du ruissellement.

Comme l'illustre la figure 89, les niveaux de nappes moyens simulés à l'échelle du bassin versant sont en revanche peu sensibles au niveau de discrétisation :

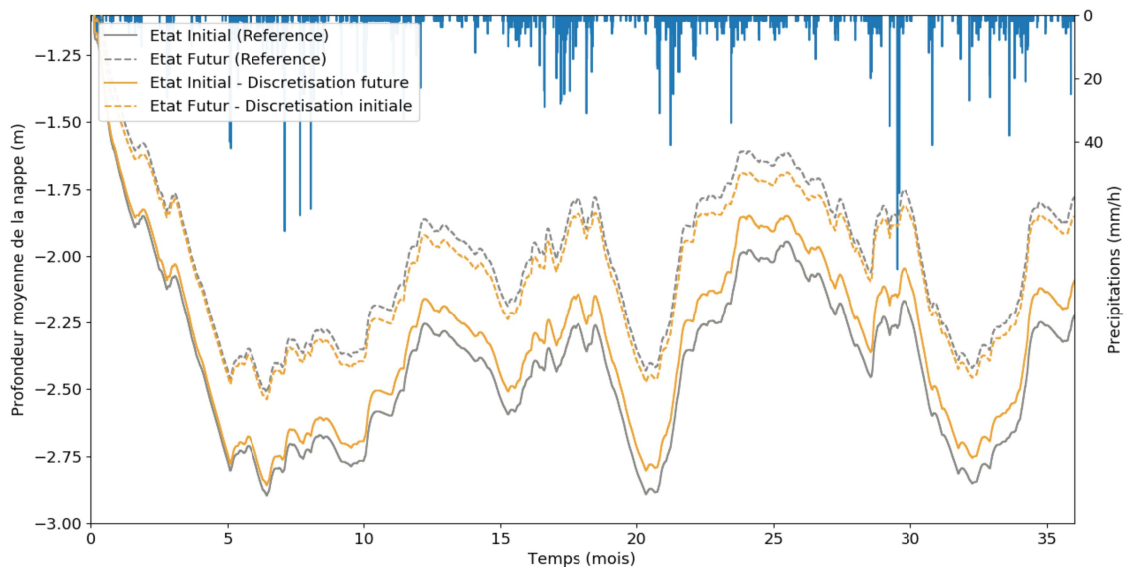


Figure 89 - Incidence d'une modification de la discrétisation du bassin versant sur les niveaux de nappe simulés (pour le scénario de prétraitement de référence)

Les résultats précédents suggèrent que la discrétisation spatiale n'aurait finalement qu'une incidence limitée sur les niveaux de nappes et les bilans hydriques simulés par le modèle. L'interprétation de ces résultats demeure cependant assez délicate, les connexions parcelles-réseau pouvant être assez largement modifiées par le changement de discrétisation (cf. figure 90). Pour le passage de la discrétisation initiale à la discrétisation future, une zone composée de multiples à parcelles peut par exemple se trouver décrite comme une unique unité hydrologique ne possédant qu'une seule connexion au réseau d'assainissement : lorsque la profondeur des tronçons de réseau est variable, la transformation de multiples points de connexion au réseau en une unique jonction parcelles-réseau peut alors avoir une forte incidence sur le calcul de I_{RES} (en affectant la valeur de Z_{RES} dans la formule 4:8).

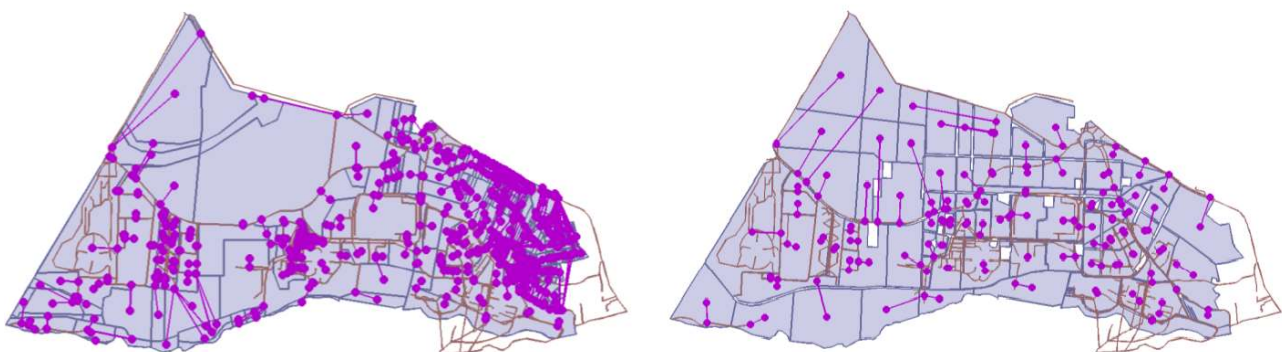


Figure 90 - Connexions-parcelles réseau générées à l'état initial pour la discrétisation « initiale » (à droite) et la discrétisation « future » (à gauche)

b . Effet de l'occupation des sols

Les tests effectués dans la suite ne visent pas directement à répondre à des questions formulées au cours des travaux antérieurs mais plutôt à préciser l'influence de l'information liée à l'occupation des sols sur les résultats de modélisation obtenus jusqu'alors sur la ZAC de Moulon. L'étude de la réponse des niveaux de nappes simulés à

une modification de la seule occupation des sols (sans changement de la discrétisation ou des données relatives au réseau) permet en particulier de déterminer si le comportement de la zone saturée est influencé par les processus de surface ou si celui-ci est à l'inverse pour l'essentiel contrôlé par les connexions parcelles-réseau.

Les résultats associés aux modifications de l'occupation des sols dans les configurations de référence à l'état initial et à l'état aménagé sont présentés dans le tableau 25 :

Scénario	P	ET	Q _{NAT}	Q _{VOI}	Q _{BAT}	I _{RES}	Δ _{STOCK}
Etat initial (référence)	100	63.6	2.2	2.6	5.0	40.5	-13.9
Etat initial, occupation future	100	48.8	2.5	5.6	13.4	41.9	-14.4
Etat futur (référence)	100	52.1	2.4	5.7	13.4	36.9	-10.5
Etat futur, occupation initiale	100	66.0	2.3	2.8	5.0	34.7	-10.8

Tableau 25 - Effet d'un changement de discrétisation à l'état initial et à l'état futur (l'ensemble des simulations sont réalisées pour les données générées à partir du « nouveau prétraitement géographique »)

De façon prévisible, le flux d'évapotranspiration ET se trouve fortement affecté par la modification de l'occupation des sols. L'augmentation de la part des surfaces revêtues à l'état futur se traduit ainsi par une baisse significative du terme ET. Le comportement des surfaces naturelles est également influencé par le changement d'occupation des sols : son poids dans le bilan hydrologique total demeure ainsi similaire d'un scénario à l'autre bien que la part des surfaces naturelles diffère fortement entre l'état initial et l'état final. Rapporté à la surface « naturelle », le flux Q_{NAT} passe ainsi de 2.6 % de la pluie à l'état initial à 3.8 % après modification de l'occupation des sols. Le flux I_{RES} ne varie à l'inverse qu'assez peu d'un scénario d'occupation du sol à l'autre. Ce terme semble donc principalement contrôlé par les connexions parcelles-réseau (elles-mêmes dictées par le prétraitement géographique, la discrétisation spatiale et le réseau).

Le niveau de la nappe apparaît également peu sensible au mode d'occupation du sol (cf. figure 91) : l'amplitude des battements de la nappe diminue légèrement lorsque la part des surfaces revêtues augmente (avec des écarts plus marqués en été du fait de l'évapotranspiration) mais les profondeurs moyennes simulées restent globalement identiques pour chaque couple de scénarios.

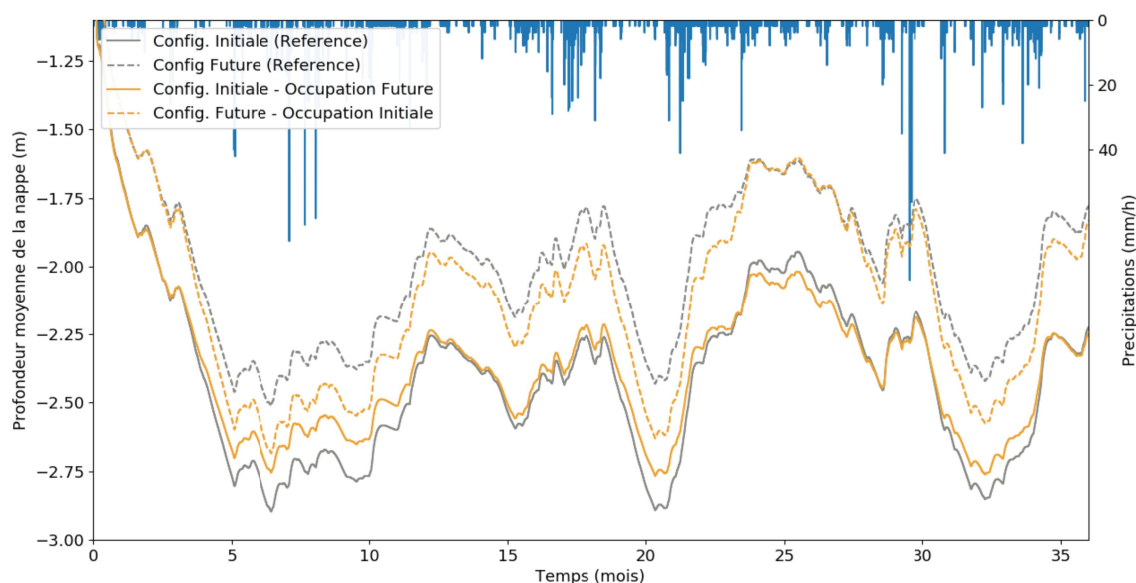


Figure 91 - Incidence d'une modification de l'occupation des sols sur les niveaux de nappe simulés (pour le scénario de prétraitement de référence)

c . Effet du réseau

Tester de façon individuelle l'influence du réseau d'assainissement sur les bilans hydrologiques et les niveaux de nappe simulés s'avère, comme pour la discrétisation spatiale, assez difficile puisque les résultats de modélisation sont surtout conditionnés par les relations parcelles-réseau qui résultent à la fois de la discrétisation et des données réseau. L'effet de la modification du réseau à l'état initial et à l'état futur est néanmoins analysé en reprenant la démarche adoptée précédemment pour l'occupation du sol et la discrétisation. Les bilans hydriques correspondant sont présentés dans le tableau 26 :

Scénario	P	ET	Q _{NAT}	Q _{VOI}	Q _{BAT}	I _{RES}	Δ _{STOCK}
Etat initial (référence)	100	63.6	2.2	2.6	5.0	40.5	-13.9
Etat initial, réseau futur	100	66.3	3.7	2.6	5.0	33.2	-12.8
Etat futur (référence)	100	52.1	2.4	5.7	13.4	36.9	-10.5
Etat futur, réseau initial	100	49.5	2.1	5.6	13.4	41.2	-12.6

Tableau 26 - Effet d'un changement d'une modification des données liées au réseau (l'ensemble des simulations sont réalisées pour les données générées à partir du « nouveau prétraitement géographique »)

L'interversion des données liées au réseau à l'état initial et à l'état futur affecte essentiellement le terme d'infiltration I_{RES}, dont les valeurs se révèlent plus importantes pour le réseau initial. Ces dernières demeurent par ailleurs comparables entre deux configurations avec le même réseau (cf. simulations avec le réseau initial).

Comme l'indique la figure 92, la modification de I_{RES} a une influence directe sur les niveaux de nappe, qui diminuent avec le passage du « réseau futur » au « réseau initial » (et augmente réciproquement avec le passage du « réseau initial » au « réseau futur »). L'interversion des données liées au réseau ne permet cependant pas à elle seule de retrouver les niveaux de nappe correspondant aux configurations de référence.

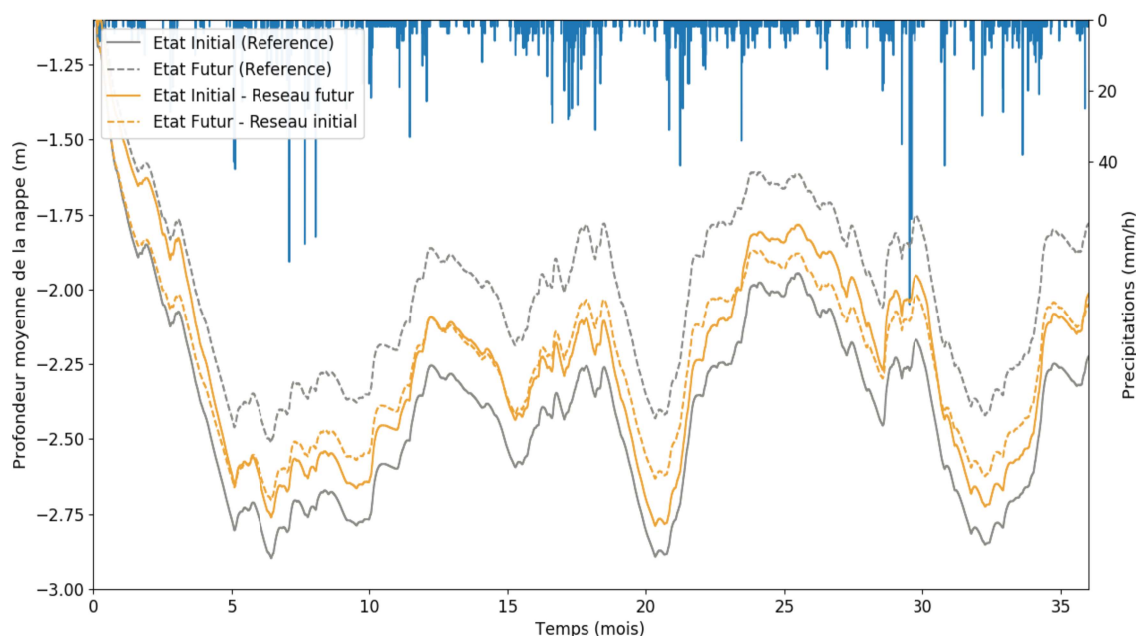


Figure 92 - Incidence d'une modification du réseau sur les niveaux de nappe simulés (pour le scénario de prétraitement de référence)

L'élévation du niveau de la nappe associée à l'intégration du réseau futur dans la configuration de référence à l'état initial peut amener à établir un parallèle avec les résultats obtenus sur l'écoquartier de la Bottière-Chénaie (cf. 4.2.2.2 c). Comme sur le

bassin versant expérimental de l'IFSTTAR, la présence de noues pourrait en effet donner lieu à une élévation (pas nécessairement réaliste) des points de connexion au réseau, réduisant significativement la valeur du flux I_{RES} simulée. Si le passage au réseau initial se traduit bien, sur la configuration de référence à l'état futur, par une augmentation de la valeur moyenne de Z_{RES} dans la formule (4:8) (de 3.5m à 3.7m), l'élévation du niveau de la nappe associée à l'utilisation du réseau futur sur la configuration « état initial » ne peut en par contre être expliquée par une diminution moyenne de Z_{RES} (qui passe de 3.4m à 4.2m). (La valeur moyenne de Z_{RES} ne permet cependant d'apprécier que de façon très simplifiée l'effet du prétraitement géographique puisque donnant un poids équivalent à l'ensemble des connexions parcelles-réseau, sans rendre compte de la surface de drainage associée aux différents points de connexion).

4.2.3.4 Discussion

Bien que leur interprétation s'avère souvent difficile, les tests réalisés par croisement des composantes « discrétisation », « réseau » et « occupation des sols » des données géographiques permettent de mieux comprendre l'influence du prétraitement des données SIG sur les résultats du modèle URBS.

L'effet de la modification des seules informations liées à l'occupation des sols produit des effets prévisibles et conformes aux résultats obtenus au cours de travaux antérieurs. Cette modification affecte essentiellement les processus de surface tels que l'évapotranspiration et le ruissellement et son influence sur les niveaux de nappes simulés à l'échelle de la ZAC apparaît relativement limitée.

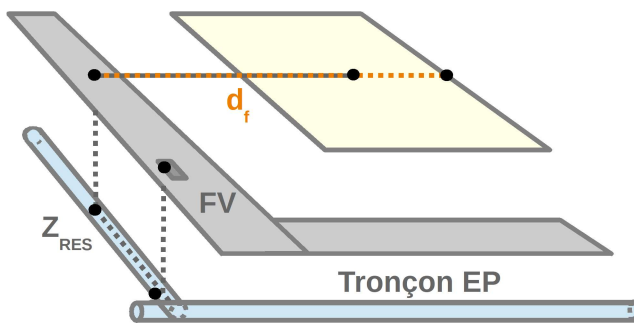
L'effet de la discrétisation et du réseau est, de manière générale, plus difficile à appréhender puisque l'une et l'autre de ces composantes des données d'entrée affectent les relations parcelles-réseau. Les tests présentés sur le cas d'étude du Moulon, tendent à indiquer que la discrétisation spatiale du bassin versant n'a qu'une incidence limitée sur les niveaux de nappes et les bilans hydrologiques simulés par le modèle. Les données liées au réseau semblent quant à elles conditionner assez fortement la valeur du flux I_{RES} et les niveaux de nappes simulés, ce qui confirme d'une certaine manière la prépondérance du processus d'infiltration vers le réseau sur les fluctuations du niveau de nappe simulé dans l'application du modèle URBS à la ZAC de Moulon (Li et al, 2015).

Quoique pertinente, la démarche retenue pour tester l'influence de la discrétisation, du réseau et de l'occupation des sols présente un certain nombre de limites. Les tests sont en premier lieu réalisés pour un scénario de prétraitement et une paramétrisation du modèle donnant lieu, à l'état initial, à des niveaux de nappes assez éloignés des observations (cf. 4.2.3.1 et 4.2.3.2). Le poids relatif des processus de surface et des processus souterrains étant vraisemblablement déterminé par le niveau moyen de la nappe sur le bassin versant, certains des résultats précédents pourraient être sensiblement modifiés avec une paramétrisation permettant de retrouver des résultats plus conformes aux niveaux piézométriques simulés. Le recours à une telle paramétrisation supposerait néanmoins de reconduire la procédure particulièrement lourde de calage du modèle. La question du prétraitement apparaît également déterminante; compte tenu de l'importance des connexions parcelles-réseau, les résultats précédents doivent probablement être considérés comme dépendant de la procédure retenue pour le traitement des données géographiques (plusieurs tests effectués pour des options de prétraitement des données SIG ne figurant pas dans ce rapport confirment cette hypothèse).

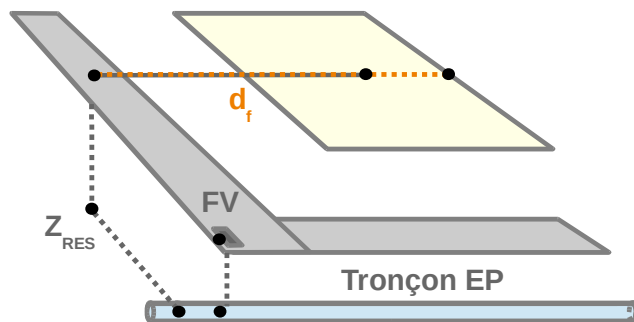
Les tests précédents illustrent enfin l'importance du prétraitement des données géographiques, qui conditionne fortement les résultats de modélisation à travers la

construction des relations parcelles-réseau. Le fait que deux solutions de traitement, en principe analogues, conduisent ici à des bilans hydrologiques et des niveaux de nappes différents (cf. 4.2.3.2) invite à s'interroger sur la pertinence de certains choix dans l'établissement des connexions entre les parcelles et le réseau. L'étude détaillée des connexions produites par les différentes solutions de prétraitement montre en particulier que la connexion systématique des parcelles à un filaire de voirie ne permet pas toujours d'attribuer une profondeur Z_{RES} cohérente pour le calcul de I_{RES} . La valeur de Z_{RES} et le réalisme de la connexion souterraine générée via le prétraitement s'avèrent donc assez variables suivant le filaire de voirie choisie pour établir la relation parcelle-réseau.

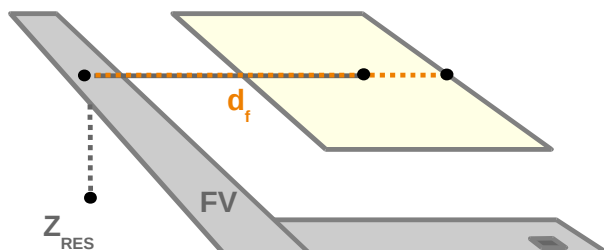
Comme l'indique la figure 93, le recours à une unique relation parcelle-réseau pour décrire les connexions de surface (correspondant au transfert du ruissellement de la parcelle vers les avaloirs situés sur la voirie adjacente) et les connexions souterraines (correspondant à l'infiltration de la nappe superficielle vers le réseau) peut être source d'incohérences pour le calcul du flux I_{RES} . Bien que pertinente dans le cas d'un bassin versant urbain classique, fortement structuré par le réseau viaire, cette approche peut en effet conduire à retenir des valeurs de Z_{RES} et de d_f (distance utilisée dans le calcul de I_{RES}) inadaptées dès lors que les filaires de voirie ne sont plus doublés par le réseau d'eaux pluviales, ce qui correspond à une situation fréquente sur la ZAC de Moulon.



Configuration correspondant aux applications antérieures du modèle : La parcelle est connectée à un filaire de voirie (FV) doublé par tronçon de type « eaux pluviales » (ou EP) situé à la profondeur Z_{RES} . Tout se passe comme si l'infiltration se produisait de la parcelle vers le tronçon EP situé sous le filaire de voirie.



Configuration fréquente dans le cas de la ZAC de Moulon : La parcelle est connectée à un filaire de voirie rejoignant en aval un tronçon EP situé à la profondeur Z_{RES} . Tout se passe comme si l'infiltration se produisait de la parcelle vers un tronçon EP « fictif », situé sous le filaire de voirie.



Configuration possible dans le cas de la ZAC de Moulon : La parcelle est connectée à un filaire de voirie rejoignant en aval un second filaire de voirie. Une valeur par défaut de Z_{RES} est alors utilisée pour le calcul de I_{RES} . Tout se passe comme dans le cas précédent.

Figure 93 - Incohérences identifiées dans la description du flux d'infiltration vers le réseau résultant de la connexion systématique des parcelles à des filaires de voirie.

Aux configurations présentées ci-dessus s'ajoute le cas de parcelles ne se situant pas au

voisinage direct d'éléments du réseau et pour lesquelles le mode de traitement des données d'entrée conduit à appliquer un flux d'infiltration I_{drain} dont la pertinence apparaît discutable, notamment parce que se superposant aux flux latéraux simulés par le module WTI (cf. figure 94).

Les éléments précédents, directement liés au prétraitement géographique, suggèrent donc qu'une adaptation de la gestion des connexions parcelles-réseau dans URBS aux spécificités de la ZAC de Moulon devrait à terme être envisagée pour décrire de façon plus satisfaisante l'infiltration de la nappe superficielle vers le réseau d'assainissement.

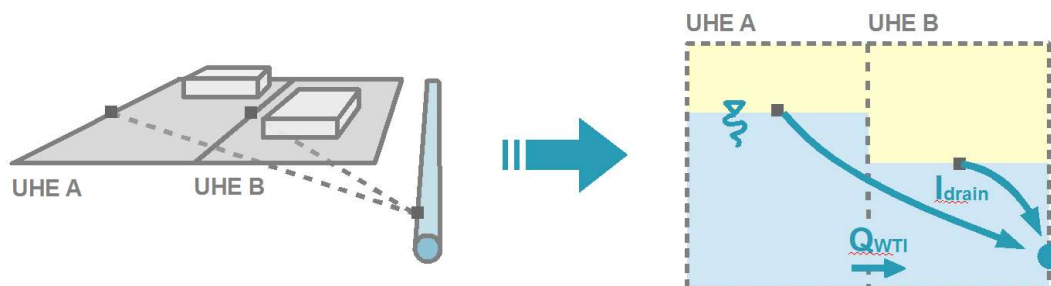


Figure 94 - Superposition du flux I_{DRAIN} aux flux latéraux simulés via le module WTI

4.3 Vers une représentation consolidée

4.3.1 Introduction

Les travaux menés autour de la représentation des flux souterrains, du fonctionnement du réseau hydrographique et de l'influence du prétraitement des données géographiques, (présentés en 4.2) ont permis d'améliorer sensiblement la connaissance du modèle, de contribuer au développement de nouvelles fonctionnalités (régulation des débits, eaux d'exhaure), d'évaluer l'incidence de certains choix ou hypothèses de modélisation et d'identifier certains « points d'attention » dans les applications menées jusqu'alors sur la ZAC de Moulon. Une actualisation des résultats obtenus à l'issue des premières applications du modèle à la zone d'étude apparaît donc non-seulement possible mais également utile pour tenter de conforter certaines des conclusions formulées quant à l'impact hydrologique du projet d'aménagement.

4.3.1.1 Bilan des différents tests effectués

Les principaux enseignements pouvant être tirés de ces travaux, en vue d'une consolidation de la représentation et de l'étude du fonctionnement hydrologique de la ZAC de Moulon, sont présentés ci-dessous :

- *Concernant les processus souterrains* : parmi les hypothèses testées en 4.2.1 seule l'éventualité d'une interaction de la nappe superficielle avec la nappe des sables semble de nature à affecter les résultats de modélisation. Les autres tests de sensibilité suggèrent que l'absence de prise en compte des débits d'exhaure et le recours à une condition de flux nul en périphérie du domaine d'étude n'a qu'une incidence limitée sur les sorties du modèle. Pour les eaux d'exhaure, les volumes mesurés sur l'un des bâtiments de la ZAC apparaissent trop faibles pour réellement influencer le fonctionnement hydrologique du bassin versant (ce résultat devra

néanmoins être confirmé à travers le suivi d'autres bâtiments). Pour les conditions aux limites, les seuls scénarios susceptibles d'induire des modifications significatives des niveaux de nappe simulés apparaissent peu compatibles avec la description des écoulements souterrain adoptée dans URBS.

- *Concernant le fonctionnement du réseau hydrographique* : les différents diagnostics réalisés à partir de pluies de projets ou de longues périodes de modélisation conduisent à douter du réalisme (ou du moins de l'adéquation avec les caractéristiques géométriques du réseau) des débits simulés par le modèle. Les développements menés autour de la description des noues permettent d'en améliorer le réalisme et de simuler un mode de fonctionnement (avec régulation des débits) plus proche de celui envisagé au niveau de la ZAC. L'effet hydrologique de ces techniques reste cependant assez marginal au regard des modifications apportées par l'aménagement. En outre, l'effet de ces ouvrages de gestion des eaux pluviales ne peut vraisemblablement être évalué que de façon partielle en absence d'information plus détaillées sur leur géométrie et sans prise en compte des dispositifs de rétention à la parcelle qu'ils ont vocation à compléter.
- *Concernant le prétraitement géographique* : La discrétisation spatiale découlant du découpage parcellaire du bassin versant, initialement suspectée d'influencer le flux d'infiltration de la nappe vers le réseau, ne semble pas finalement affecter de manière significative les résultats de modélisation. Le prétraitement des données géographiques a en revanche, à travers l'établissement des connexions parcelles-réseau, une incidence certaine sur les sorties du modèle. Les tests présentés en 4.2.3 indiquent en particulier que de légères différences dans les procédures de prétraitement peuvent donner lieu à des écarts importants sur les niveaux de nappes ou les bilans hydriques simulés. Plusieurs éléments suggèrent par ailleurs que les modalités de prétraitement des données géographiques, pertinentes pour les applications antérieures du modèle sur des bassins versants structurés par le réseau viaire, ne sont plus véritablement adaptées au cas de la ZAC de Moulon. Enfin, les travaux menés autour du prétraitement géographique ont permis d'identifier une anomalie dans l'attribution de la profondeur du réseau, affectant les résultats de modélisation et invitant à réexaminer l'impact de l'aménagement sur le niveau de la nappe superficielle.

La méthodologie retenue pour évaluer l'incidence des choix de modélisation identifiés dans le cadre de ce travail repose le plus souvent sur une confrontation des résultats d'une simulation « de référence » à ceux obtenus pour des variantes en termes de descriptions des processus, de prise en compte des données d'entrée ou de conditions aux limites. Pour la plupart des configurations testées (à l'exception notable de celles pour lesquelles une interaction avec la nappe des sables est représentée), l'influence de ces choix sur les niveaux de nappe ou les bilans hydrologiques simulés apparaît relativement limitée. Les écarts observés par rapport à la simulation de référence restent cependant difficile à apprécier s'ils ne sont pas mis en regard des incertitudes affectant par ailleurs les résultats (que traduit l'incapacité du modèle à reproduire parfaitement les observations). Une estimation, même sommaire, des incertitudes sur les niveaux de nappes et les bilans hydrologiques simulés par le modèle semble donc nécessaire pour compléter l'interprétation de certains des tests de sensibilité présentés en 4.2.

L'évaluation des incertitudes associées aux sorties du modèle URBS présente un intérêt certain, non-seulement parce que permettant de conforter l'analyse menées jusqu'alors autour des impacts hydrologiques de l'aménagement de la ZAC de Moulon, mais aussi parce qu'apportant un éclairage sur le fonctionnement de l'outil URBS et sa pertinence dans un contexte opérationnel. Une telle évaluation suppose de reprendre et de modifier

la démarche initialement adoptée pour le calage des paramètres du modèle à partir des niveaux de nappe mesurés sur la zone d'étude. Bien que délicat, ce réexamen de la phase de calage du modèle apparaît ici indispensable compte tenu de l'incidence des anomalies identifiées dans la gestion des données liées au réseau (cf. 4.2.3.1).

4.3.1.2 Objectifs en vue d'une consolidation des résultats

Dans la suite, une actualisation de l'application initiale du modèle URBS à la ZAC de Moulon est proposée de manière à rendre compte des incertitudes de modélisation tout en intégrant les résultats des tests de sensibilité présentés précédemment.

Cette nouvelle application s'appuiera en particulier sur:

- Une procédure de prétraitement des données géographiques plus adaptée au cas de la ZAC de Moulon, offrant une représentation plus satisfaisante des flux d'infiltration vers le réseau simulé au niveau de chaque parcelle
- Une méthode de calage permettant d'estimer de façon relativement simple les incertitudes sur les niveaux de nappes et les bilans hydriques simulés, et pour laquelle l'éventualité d'une interaction de la nappe superficielle avec la nappe des sables sera prise en compte.

4.3.2 Méthodologie

4.3.2.1 Prétraitement des données

L'établissement, via les outils de prétraitement géographique, des connexions « parcelle-réseau » utilisées en entrée du modèle URBS apparaît comme une question centrale dans le cadre de l'application du modèle à la ZAC de Moulon.

La sensibilité des niveaux de nappes et des flux hydriques simulés par le modèle à cette composante du pré-traitement s'explique vraisemblablement par les spécificités du réseau hydrographique. Dans le modèle, la description du transfert hydraulique en surface et de l'infiltration vers le réseau s'appuie sur une unique relation parcelle-réseau, découlant d'une connexion systématique des parcelles à un filaire de voirie lors du prétraitement. Sur le bassin versant étudié, l'hypothèse d'une coïncidence approximative du réseau d'assainissement et du réseau viaire, à la base de ce choix d'un raccordement des parcelles aux filaires de voirie, ne peut plus être considérée comme valide. Le manque de cohérence entre le réseau viaire et le réseau d'assainissement (auquel s'ajoute également l'existence de parcelles isolées, pour la plupart agricoles, ne comptant aucune portion du réseau hydrographique en leur voisinage) est alors susceptible de donner lieu à des connexions peu réalistes, en particulier pour la description de l'infiltration vers le réseau.

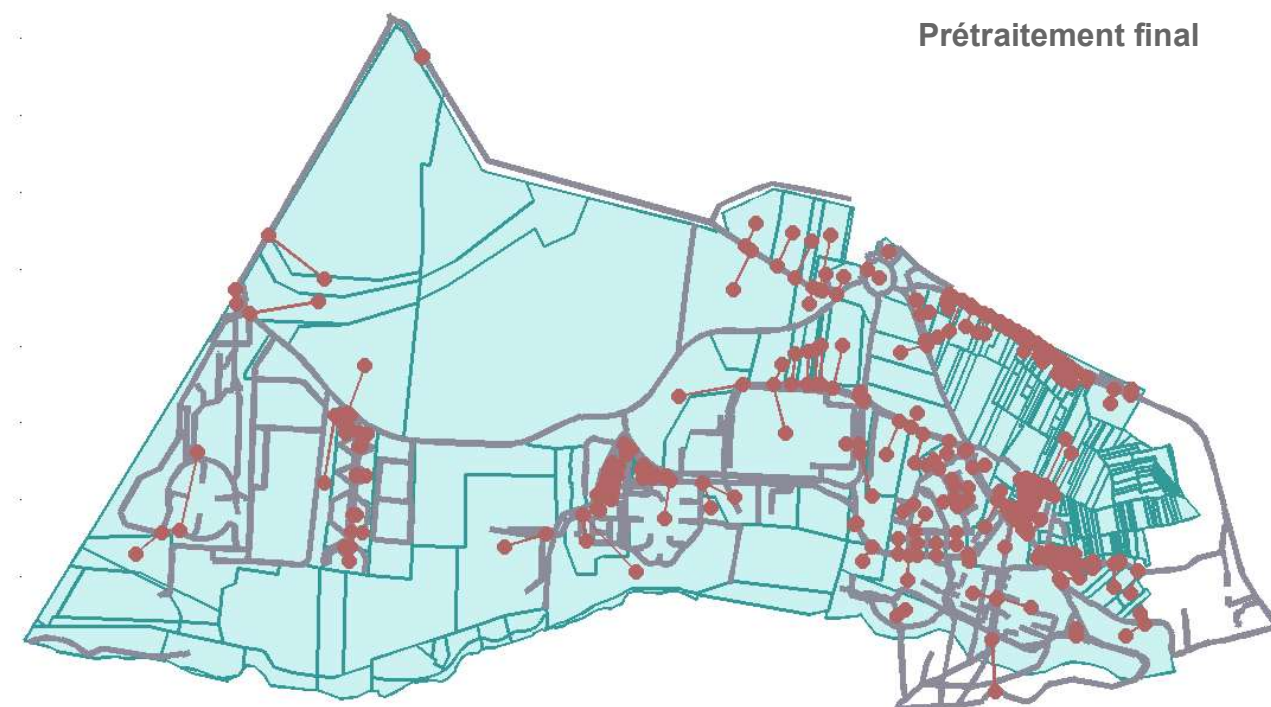
Face aux difficultés à concilier à partir de cette unique relation parcelles-réseau, la description de l'infiltration de la nappe vers le réseau et celle du transfert hydraulique en surface, une procédure alternative de prétraitement géographique est ici adoptée.

Si l'introduction dans le modèle d'une distinction explicite des relations parcelle-réseau associées à l'un et l'autre de ces processus pourrait à terme être envisagée, une

approche nettement plus simple a dans un premier temps été retenue sur la base des résultats obtenus à l'issue de l'étude du fonctionnement du module hydraulique de URBS. Ces derniers permettent en effet de douter du réalisme des débits simulés dans le réseau. Compte tenu de ces résultats et du poids de l'infiltration vers le réseau dans le fonctionnement hydrologique du bassin versant étudié, il apparaît en première approche raisonnable de « sacrifier » le réalisme du transfert hydraulique en amont du réseau au profit de celui du drainage de la nappe par le réseau d'assainissement (d'autant plus que le bilan hydrique de la ZAC et les fluctuations de la nappe superficielle se révèlent finalement assez indépendant des débits simulés par le module de transfert).

L'approche retenue pour établir les relations parcelles-réseau consiste à n'autoriser que les connexions vers des tronçons de réseau situés en périphérie de la parcelle considérée. Le transfert de la voirie adjacente jusqu'à un avaloir est par conséquent ignoré et les volumes issus de la parcelle sont alors tout simplement acheminés vers le tronçon de réseau associé à la parcelle. Pour les parcelles ne se situant à proximité immédiate d'aucun tronçon de réseau, cette méthode de pré-traitement conduit à considérer que le flux d'infiltration I_{drain} (cf. 4.2.3.1) ne s'applique pas directement à la parcelle (comme l'illustre la figure 94, les transferts horizontaux simulés par le module WTI permettent néanmoins de rendre compte de l'influence du réseau). Pour cette situation, ne concernant que quelques parcelles agricoles à l'état initial, une connexion fictive est établie jusqu'à un exutoire du réseau pour assurer le transfert des volumes ruisselés. Pour toutes les autres parcelles, l'infiltration s'effectue vers le tronçon adjacent partageant la longueur la plus importante avec les limites de la parcelle.

La procédure permet alors d'établir un schéma de connexion parcelle-réseau assez différent de celui utilisé dans les applications antérieures du modèle à la ZAC :



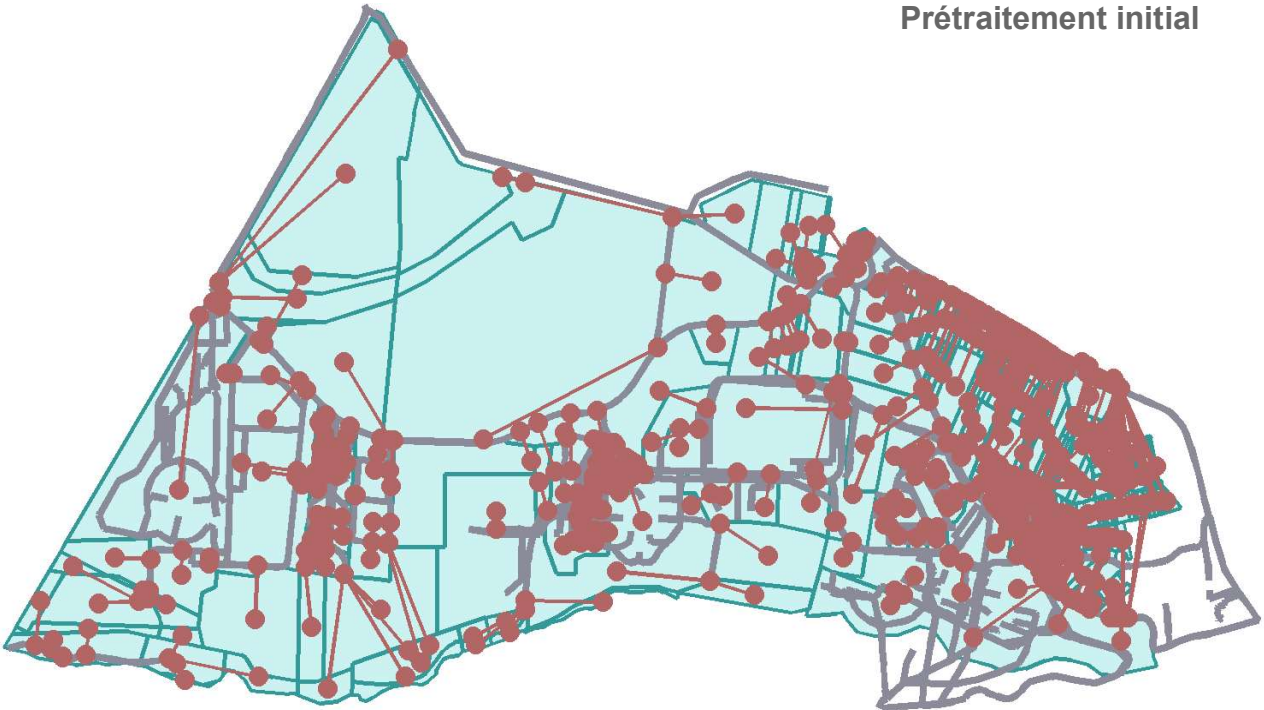


Figure 95 - Comparaison des connexions parcelles-réseau générées à partir de la nouvelle méthode de prétraitement géographique à celles utilisées pour les premières applications de URBS à la ZAC de Moulon

4.3.2.2 Calage du modèle

Le calage (ou calibration) d'un modèle désigne la phase d'ajustement de ses paramètres numériques dans le but de reproduire au mieux une réponse observée (ici, des niveaux de nappes mesurés en différents points du bassin versant, sur des périodes longues). Le calage du modèle URBS à partir des chroniques piézométriques disponibles sur la ZAC de Moulon a déjà fait l'objet d'un travail approfondi dans le cadre de la thèse d'Yinghao Li entre 2011 et 2015. Cette démarche a conduit à retenir un jeu de paramètres permettant de reproduire de façon satisfaisante les observations et, par la suite, de l'utiliser pour évaluer l'impact de l'aménagement.

Le calage de modèles hydrologiques distribués tels que URBS constitue de manière générale un problème mathématique complexe, auquel un champ important de la recherche en hydrologie est aujourd'hui consacré (Clark et al., 2017). La principale difficulté à laquelle l'utilisateur d'un modèle se trouve généralement confronté réside dans le phénomène d'équifinalité traduisant le fait que plusieurs jeux de paramètres sont susceptibles de fournir des résultats « acceptables » et que l'identification d'un jeu de paramètre optimum n'est ni forcément possible ni toujours pertinente (Beven et al. 2006). Méconnaître le problème d'équifinalité revient en effet à ignorer le fait que les paramètres du modèle ne peuvent pas être fixés de façon certaine, et conduit par conséquent à occulter une forme d'incertitude sur les sorties du modèle.

La mesure de « l'acceptabilité » d'un jeu de paramètre et de la réponse à laquelle il donne lieu est une question sous-jacente à celle de l'équifinalité. Celle-ci suppose le plus souvent d'introduire une ou plusieurs « fonctions objectifs » permettant d'apprécier l'adéquation des sorties du modèle aux observations. Le choix d'une telle fonction n'est

généralement pas immédiat et comporte toujours une part de subjectivité. Dans la suite, l'un des trois critères initialement utilisés dans l'application du modèle à la ZAC de Moulon, le coefficient de Nash-Sutcliffe est adopté pour l'actualisation de la procédure de calibration :

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{obs} - Y_{sim})^2}{\sum_{i=1}^N (Y_{obs} - \overline{Y_{obs}})^2} \quad (4:9)$$

Avec : Y_{obs} , la valeur observée en sortie de modèle (ici un niveau de nappe) ; Y_{sim} la valeur simulée et Y_{moy} . Le coefficient E permet alors de rapporter les erreurs observées à la variance des observations. Sa valeur est comprise entre 1 et $-\infty$: une valeur égale à 1 correspond à une adéquation parfaite entre Y_{sim} et Y_{obs} tandis qu'une valeur inférieure à 0 indique que le modèle est un moins bon prédicteur que la moyenne des observations. Entre 0 et 1, l'interprétation de la valeur du coefficient dépend largement de la nature et des propriétés statistiques des données que l'on cherche à reproduire. Néanmoins, des valeurs comprises entre 0.7 et 1 peuvent généralement être interprétées comme une bonne adéquation entre les observations et les résultats de modélisation.

Une valeur du coefficient de Nash-Sutcliffe peut être calculée pour chacun des sept piézomètres installés sur le bassin versant, en comparant les niveaux de nappes observés à ceux simulés sur des parcelles situées à proximité des points de mesure (Li, 2015). La définition d'un jeu de paramètre « acceptable », rarement immédiate, est ici compliquée par le caractère multidimensionnel de la fonction objectif que constituent ces sept coefficients de Nash-Sutcliffe. L'utilisation de différentes sources d'informations (ici, plusieurs chroniques piézométriques) suppose en effet de procéder à une forme d'agrégation, nécessairement subjective, des critères mesurant l'écart entre observations et sorties du modèle. La définition d'un seuil permettant de déterminer si un jeu de paramètre peut ou non être considéré comme « acceptable » est également subjective et découle généralement des performances pouvant effectivement être attendues du modèle. Sur la base des résultats antérieurs, sont dans la suite considérés comme « acceptables » les jeux de paramètres remplissant les conditions suivantes :

- $E \geq 0.40$ pour au minimum quatre des sept piézomètres
- $E \geq 0.50$ pour au minimum trois des sept piézomètres
- $E \geq 0.60$ pour au minimum deux des sept piézomètres
- $E \geq 0.75$ pour au minimum un des sept piézomètres

(En comparaison d'un raisonnement basé par exemple sur la valeur moyenne des coefficients E associés aux différents piézomètres, cette approche revient à attribuer un poids équivalent aux piézomètres ne remplissant pas l'une des conditions précédentes. Le choix de ne pas pénaliser d'avantage les valeurs fortement négatives de E que celles proches de 0 est principalement motivé par le comportement atypique et difficilement reproductible des niveaux de nappes mesurés sur trois des sept piézomètres (cf. figure 96) : pour ces derniers les écarts aux observations, considérés comme prévisibles, sont ainsi ignorés de manière à minimiser les erreurs sur les quatre autres piézomètres.)

Comme dans les travaux antérieurs, le calage du modèle se limite ici à des paramètres renvoyant à la description du sous-sol et de l'infiltration vers le réseau. L'éventualité d'une interaction avec la nappe des sables est prise en compte en distinguant deux configurations : une première reprenant l'hypothèse initiale de flux nul avec la nappe superficielle et une seconde intégrant le flux Q_{SF} aux paramètres du modèle à ajuster. La

profondeur de la nappe en début de simulation, initialement supposée uniforme et traitée comme un paramètre du modèle, est ici déduite des interpolations réalisées à partir des relevés piézométriques. La profondeur initiale de la nappe, variable d'une parcelle à l'autre, correspond ici à la moyenne des profondeurs observées pour les relevés piézométriques de mars et de novembre 2016. (Ce choix apparaît plus réaliste que celui d'une profondeur uniforme. L'initialisation du modèle sur une période de un an avant la comparaison aux observations est par ailleurs supposée limiter l'incidence de ce choix).

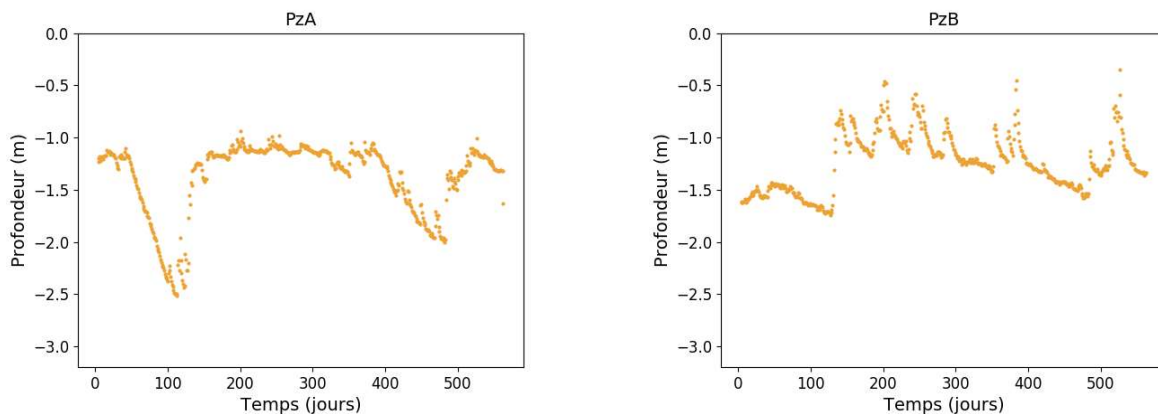
Les paramètres utilisés pour le calage et les gammes de valeurs correspondantes sont présentées dans le tableau 27 :

Paramètre	Description	Gamme testée
K_S (m.s ⁻¹)	Conductivité hydraulique à saturation du sol en surface	10 ⁻⁷ à 10 ⁻⁴
M	Paramètre de décroissance avec la profondeur de K_S	0.3 à 5
λ	Paramètre de la loi d'infiltration vers le réseau (4:8)	1 à 60
μ	Paramètre de la loi d'infiltration vers le réseau (4:8)	2 à 6
K_{lat}/K_S	Ratio conductivité latérale sur conductivité verticale	1 à 100
Q_{SF} (mm.an ⁻¹)	Flux vers la nappe des sables de Fontainebleau	1 à 150

Tableau 27 - Paramètres et gammes de valeurs retenus pour le calage du modèle et l'estimation des incertitudes

Dans la suite, un tirage aléatoire des paramètres est mis en œuvre de manière à générer un échantillon de 150 simulations « acceptables », répondant aux critères énoncés précédemment sur la valeur des coefficients de Nash-Sutcliffe. Afin de faciliter la comparaison avec les résultats antérieurs, un jeu de paramètre « optimum » est également identifié en maximisant la valeur moyenne du coefficient de Nash sur les 4 piézomètres pour lesquels les valeurs les plus élevées de ce critère sont obtenues.

L'ensemble des simulations sont réalisées pour une période de 3 ans entre le 01/01/2011 et le 31/12/2013 tandis que le calage s'appuie sur les observations disponibles entre le 06/06/2012 et le 31/12/2013.



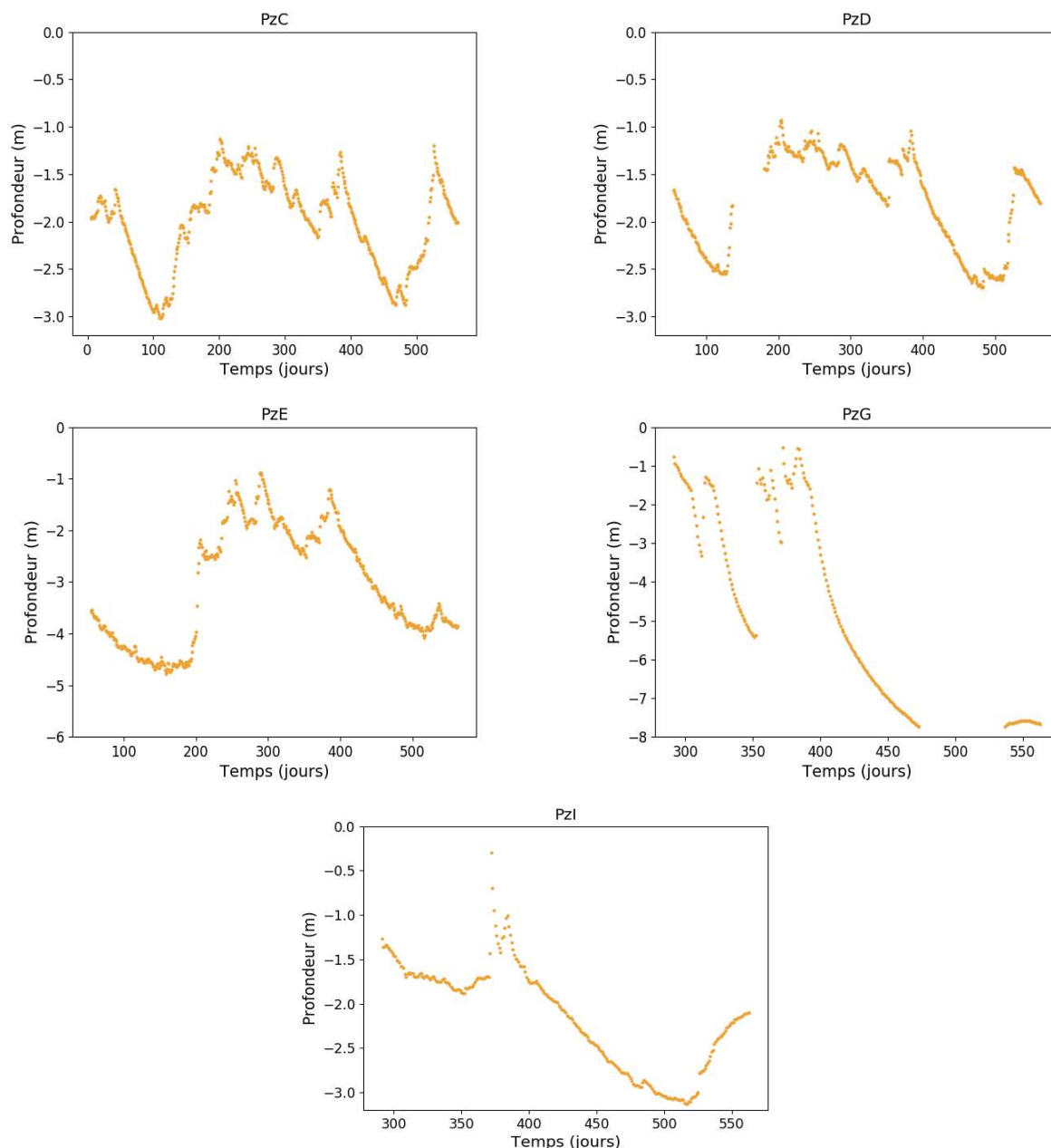


Figure 96 - Niveaux de nappe mesurés aux différents piézomètres utilisés pour le calage du modèle

4.3.2.3 Représentation des incertitudes

L'existence d'une multitude de jeux de paramètres, conduisant à des résultats « acceptables » sans pour autant être totalement identiques permet d'introduire une première forme d'incertitude qualifiée de « paramétrique ».

Le fait de ne plus identifier un unique jeu de paramètres à l'issue du calage, mais de retenir un ensemble de configurations pouvant être considérées comme « acceptables », conduit à envisager chaque sortie du modèle sous la forme d'une gamme plausible de valeurs plutôt que comme un résultat bien déterminé, associé à un jeu de paramètre « optimum ». Dans la suite, les simulations correspondant aux 150 jeux de paramètres « acceptables » préalablement identifiés sont utilisées pour générer les bilans hydrologiques et les niveaux de nappe moyens sur le bassin versant. La dispersion des résultats associés à ces 150 simulations permet alors de rendre compte de l'effet de l'incertitude sur la valeur des

paramètres du modèle. Les valeurs minimales et maximales des sorties du modèle sont en particulier utilisées pour visualiser cette incertitude, sous la forme d'un fuseau pour les niveaux de nappes simulés ou d'un intervalle pour les termes du bilan hydrologique.

L'incertitude paramétrique ne permet pas à elle seule d'expliquer les écarts entre valeurs observées et valeurs simulées du modèle : certaines portions des observations ne peuvent en effet pas être reproduites à partir des jeux de paramètres considérés comme acceptables. Une seconde forme d'incertitude, dite « incertitude totale », reflétant l'incapacité du modèle à simuler de façon totalement satisfaisante le comportement observé peut donc être introduite. À chaque valeur de niveau de nappe simulée par le modèle peut ainsi être associée une erreur potentielle dont les propriétés statistiques sont directement déduites des écarts entre valeurs observées et simulées. Ce terme d'erreur qui s'ajoute à l'incertitude « paramétrique » permet alors de générer un second fuseau correspondant, pour un seuil de risque donné, à l'écart pouvant être attendu entre le niveau de nappe réel et le niveau de nappe simulé.

Dans la suite, l'incertitude totale est estimée en supposant que l'erreur observée sur les piézomètres A, B, C, D, E et I est représentative de l'erreur sur le niveau de nappe moyen à l'échelle du bassin versant. (Le seuil de risque retenu est ici de 95 %; sur les graphiques, l'incertitude totale peut alors être interprétée en considérant que la probabilité que l'observation se trouve dans le fuseau est de 95 % ; la méthodologie adoptée pour générer ces fuseaux d'incertitudes est présentée à l'annexe 6).

4.3.3 Résultats

4.3.3.1 État Initial

a . Incidence de l'hypothèse d'une interaction avec la nappe des sables

Les résultats obtenus à l'issu du calage indiquent en premier lieu que l'hypothèse initiale d'une absence d'interaction entre la nappe superficielle et la nappe des sables de Fontainebleau s'accompagne, pour les différentes hypothèses de modélisation retenues, d'une détérioration significative du réalisme du modèle. Il apparaît ainsi impossible d'identifier des jeux de paramètres satisfaisant les conditions fixées sur la valeur du coefficient de Nash-Sutcliffe ($E \geq 0.75$, $E \geq 0.6$, $E \geq 0.5$ et $E \geq 0.4$ pour respectivement 1, 2, 3 et 4 piézomètres) sous l'hypothèse $Q_{SF} = 0$ mm/an. Cette situation résulte essentiellement de l'augmentation des écarts entre les niveaux de nappes simulés et mesurés sur le piézomètre A et I (cf. tableau 28). Pour les autres piézomètres, l'incidence de l'hypothèse sur le flux Q_{SF} semble en revanche plus limitée, une légère augmentation du coefficient de Nash-Sutcliffe étant même observée sur certains d'entre eux.

Configuration	PZA	PZB	PZC	PZD	PZE	PZG	PZI
Hypothèse $Q_{SF} = 0$ mm/an	-1.6	-7.6	0.70	0.66	0.35	-0.17	-10.8
Hypothèse $Q_{SF} > 0$	0.42	-13.5	0.84	0.77	0.35	-0.15	0.55

Tableau 28 - Résultats associés au jeu de paramètre « optimum » maximisant la valeur moyenne du coefficient de Nash-Sutcliffe sur les piézomètres A, C, D, E et I pour les deux configurations testées

Pour la configuration $Q_{SF} > 0$, le calage du modèle conduit alors à retenir une valeur du flux entre la nappe superficielle et la nappe des sables de Fontainebleau comprise entre 110 et 140 mm/an, ce qui apparaît compatible avec les valeurs proposées au cours de travaux antérieurs à l'échelle du plateau de Saclay (cf. 4.2.1.3).

Bien que l'hypothèse d'absence d'interaction entre les deux aquifères semble devoir être écartée dans le cadre de cette application du modèle, il reste difficile de conclure quant à la valeur de ce flux sur la seule base des résultats de calage. Les valeurs du coefficient de Nash-Sutcliffe calculées pour $Q_{SF} > 0$ apparaissent en effet très similaires à celles obtenues en première application du modèle en faisant l'hypothèse d'une absence d'échange entre la nappe superficielle et la nappe des sables de Fontainebleau (cf. 4.3.3.1 b). Cette différence entre les deux applications du modèle s'explique essentiellement par le mode de gestion des relations parcelles-réseau : le fait de n'autoriser que des connexions vers des tronçons du réseau d'eaux pluviales situés en périphérie de la parcelle considérée conduit en effet à simuler un drainage par le réseau nettement plus hétérogène que dans l'application initiale. La représentation d'un flux vertical vers la nappe des sables de Fontainebleau, s'appliquant à l'ensemble de la ZAC devient alors vraisemblablement nécessaire pour compenser la diminution du nombre de connexions parcelles-réseau.

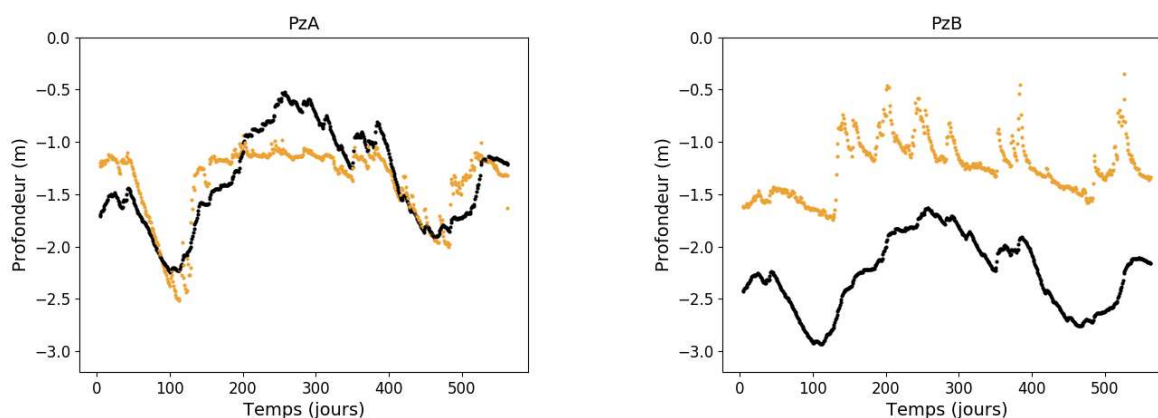
b . Performance du modèle et jeux de paramètres identifiés

Les valeurs minimales, maximales et moyennes de coefficient de Nash calculées pour les 150 configurations identifiées comme « acceptables » à l'issue du calage sont présentées dans le tableau 29 et comparés aux résultats obtenus pour l'application initiale du modèle.

Résultats	PzA	PzB	PzC	PzD	PzE	PzG	PzI
Application initiale - Optimum	0.57	-0.36	0.80	0.83	-0.16	-1.16	0.40
Résultats actualisés – Maximum	0.50	-4.80	0.84	0.79	0.35	-0.03	0.59
Résultats actualisés – Moyenne	0.43	-9.20	0.73	0.77	0.22	-0.14	0.54
Résultats actualisés – Minimum	0.40	-14.0	0.60	0.73	-0.42	-0.23	0.50
Résultats actualisés – « Optimum » ¹	0.42	-13.5	0.84	0.77	0.35	-0.15	0.55

Tableau 29 - Valeur du coefficient de Nash calculé sur les différents piézomètres (¹Jeu de paramètre maximisant la valeur moyenne du coefficient de Nash-Sutcliffe sur les piézomètres A, C, D, E et I)

Les performances du modèle sont de manière générale comparables à celle obtenues lors des premières applications du modèle à la ZAC de Moulon. Si des valeurs du coefficient de Nash légèrement inférieures à celles associées aux simulations initiales sont ici calculées pour les piézomètres A et D, une amélioration assez nette des résultats est en revanche observée pour le piézomètre I. Sur les piézomètres pour lesquels le modèle n'est pas réellement en mesure de reproduire les fluctuations du niveau de nappe, les résultats sont également contrastés : le recours à un mode de gestion alternatif des connexions parcelles-réseau s'accompagne ainsi d'une augmentation sensible de l'erreur sur le piézomètre B et tandis que les écarts tendent à se réduire pour le piézomètre G.



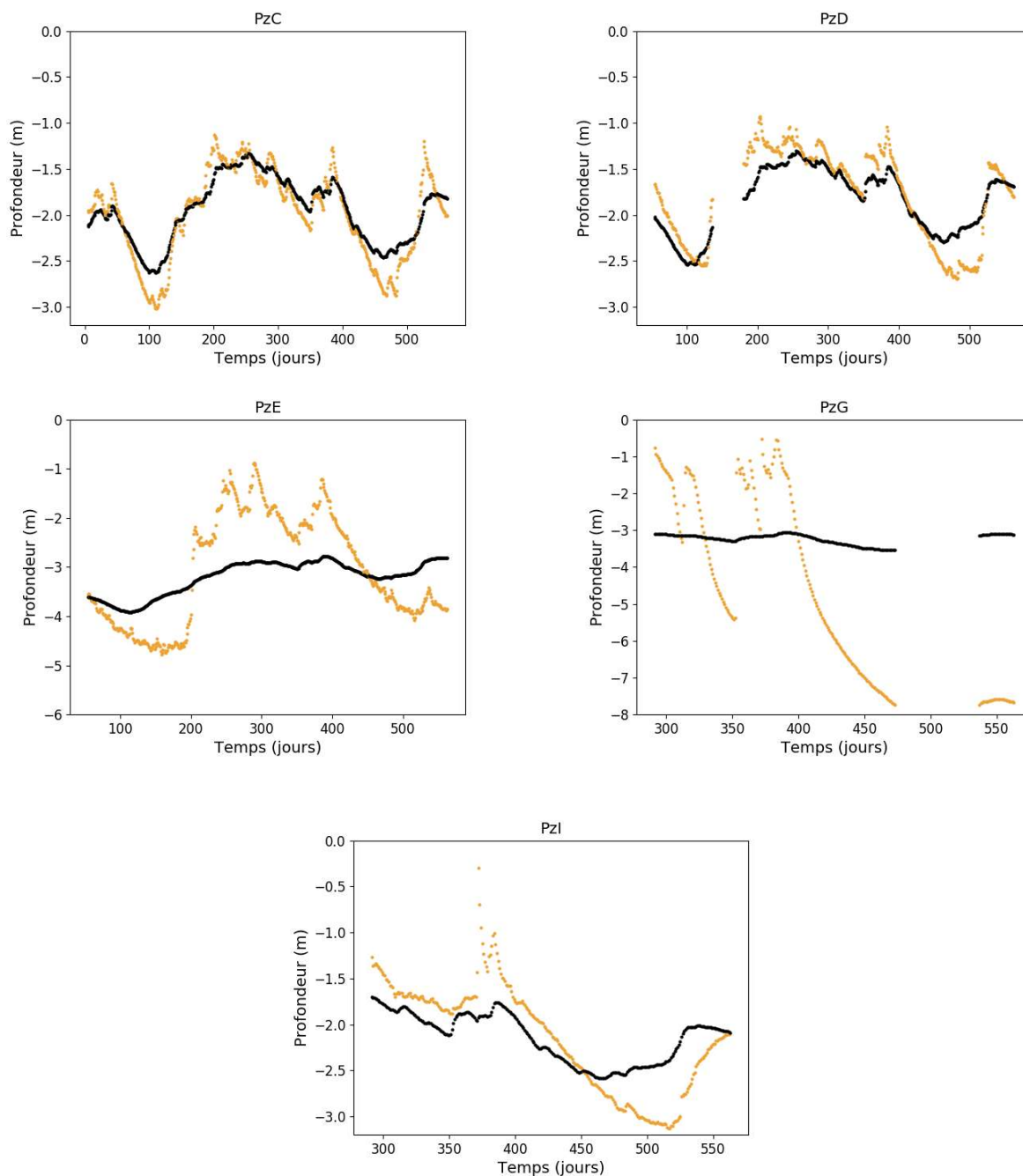


Figure 97 - Comparaison des niveaux de nappe simulés pour la configuration dite « optimale » aux niveaux mesurés sur les différents piézomètres

Il convient ici de relativiser l'augmentation des erreurs observées sur le piézomètre B, en partie expliquées par le niveau de discrétisation excessivement grossier du bassin versant à proximité du point de mesure. Le piézomètre B se situe en effet à l'interface entre deux parcelles agricoles de 7.2 et 38.8 ha. Le niveau de nappe simulé par le modèle pour ce piézomètre, correspond alors à une valeur moyenne des niveaux associés à l'une et l'autre de ces parcelles, susceptible de différer assez fortement de la mesure relativement localisée du niveau de la nappe. Le fait de ne retenir que l'une des deux parcelles pour le calcul du niveau de la nappe au piézomètre B permet de ramener, pour le jeu de paramètre « optimum », le coefficient de Nash-Sutcliffe à une valeur de -0.95 plus comparables aux performances obtenues en première application du modèle (cf. annexe 6). Un tel résultat suggère néanmoins l'existence de fortes discontinuités dans les niveaux de nappes simulés par le modèle au niveau des parcelles présentant les surfaces les plus

importantes. (Dans la suite, la configuration précédente correspondant à $E = -0.95$ sur le piézomètre B est utilisée pour l'estimation de l'incertitude totale sur les niveaux de nappes simulés).

Les valeurs des paramètres correspondant aux 150 configurations sont présentées dans le tableau 30:

Paramètre	Minimum	Maximum	Moyenne	Gamme testée
K_S	$10^{-5.2}$	$10^{-4.0}$	$10^{-4.9}$	10^{-7} à 10^{-4}
M	0.48	1.35	0.77	0.3 à 5
λ	6.3	59.8	33.4	1 à 60
μ	2.0	6.0	4.6	2 à 6
K_{lat}/K_S	1.0	6.6	1.3	1 à 100
Q_{SF}	112	138	126	1 à 150

Tableau 30 - Valeurs minimales, maximales et moyennes des paramètres rattachés au sol et au processus d'infiltration en réseau pour les configurations identifiées à l'issu du calage

Les résultats du calage font apparaître des situations assez contrastées entre les différents paramètres du modèle avec des valeurs plausibles couvrant dans certains cas une bonne part voire l'intégralité de la gamme testée (λ et μ) et d'autres nettement moins dispersées (K_S , M, K_{lat}/K_S et Q_{SF}). L'identification d'un unique jeu de paramètre à partir du critère « d'acceptabilité » sur le coefficient de Nash reste de manière générale difficile. Plusieurs jeux de paramètres assez différents sont ainsi susceptibles de produire des résultats comparables, ce qui suggère que le nombre de paramètres utilisés pour le calage est ici trop important au regard de l'information apportée par les observations sur les différents piézomètres. La forte incertitude quant à la valeur des paramètres associés à l'infiltration dans le réseau (λ et μ) peut par ailleurs conduire à s'interroger sur la capacité du modèle à décrire ce processus à l'échelle de la zone d'étude.

Il semble important de souligner que l'incertitude sur la valeur des paramètres du modèle (telle qu'illustrée dans le tableau 30) découle directement du critère utilisé pour juger du caractère « acceptable » des résultats. Comme l'indique le tableau 29, des valeurs ne satisfaisant aucune des conditions fixées ($E \geq 0.75$, $E \geq 0.6$, $E \geq 0.5$ et $E \geq 0.4$) sont ici obtenues pour certaines des configurations sélectionnées. L'utilisation de critère visant à minimiser les erreurs sur les piézomètres produisant les faibles valeurs du coefficient de Nash pourrait vraisemblablement conduire à préciser la valeur de certains paramètres. De la même manière, l'utilisation d'indicateurs destinés à compléter le coefficient de Nash-Sutcliffe, comme proposé en première approche (Li, 2015) conduirait probablement à modifier et éventuellement affiner le choix des paramètres du modèle.

c . Niveaux de nappes et bilans hydriques simulés

Les niveaux de nappes simulés à partir des configurations identifiées à l'issu du calage sont présentées dans le graphique ci-dessous :

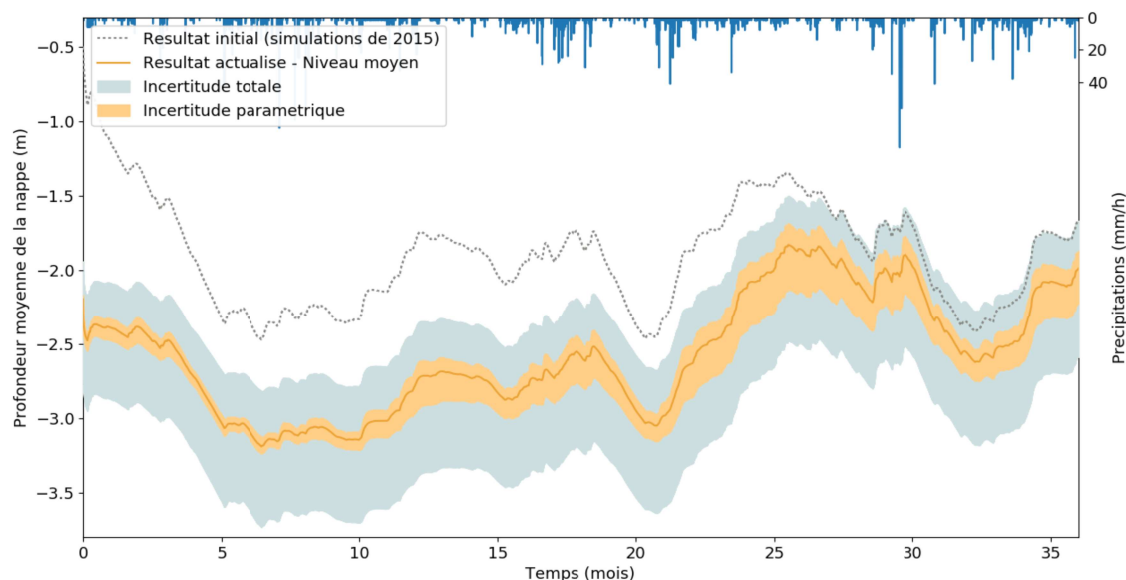


Figure 98 - Niveaux de nappe moyens simulés à l'état initial après actualisation des résultats et comparaison aux résultats initiaux (simulations de 2015)

L'incertitude sur la valeur des paramètres du modèle donne ici lieu à une variabilité assez limitée des niveaux de nappe. En comparaison du fuseau correspondant à l'incertitude « totale » sur les valeurs simulées, le fuseau associé à l'incertitude « paramétrique » est ainsi relativement resserré. Bien que très différents, les jeux de paramètres retenus à l'issue du calage semblent donc produire sur les trois années de simulation des résultats assez comparables.

Comme indiqué précédemment, l'amplitude de l'incertitude totale découle directement des écarts entre les niveaux de nappe observés et simulés sur les piézomètres A, B, C, D, E et I. La largeur du fuseau associé à l'incertitude totale n'est donc pas véritablement surprenante puisque traduisant simplement le fait que des erreurs importantes sont obtenues sur certains des piézomètres utilisés pour estimer cette incertitude (cf. figure 98). L'analyse statistique de ces écarts aux observations permet ici de considérer que l'erreur sur le niveau de nappe moyen ne dépasse le plus souvent pas une cinquantaine de centimètres (en supposant l'erreur observée sur les différents piézomètres représentative de celle commise sur le bassin versant).

Bien que l'incertitude sur les niveaux de nappes simulés ne soit ici évaluée que de façon assez sommaire, sa prise en compte présente un intérêt certain pour l'interprétation des résultats parce que permettant de visualiser assez directement le pouvoir prédictif du modèle. Dans le cadre de ce travail, sa représentation graphique apporte par ailleurs un éclairage sur les résultats des tests de sensibilité conduits en 4.2. L'amplitude assez importante du fuseau associé à ces incertitudes dans la figure 98 permet en particulier de conforter l'hypothèse selon laquelle les variations du niveau moyen de la nappe induite par certains choix de modélisations ne sont finalement qu'assez limitées au regard des erreurs pouvant être attendues sur les niveaux de nappes simulés.

La figure 98 permet aussi de comparer les résultats obtenus après actualisation des résultats (modification des connexions parcelles-réseau et correction d'une erreur dans l'attribution de la profondeur des différents tronçon du réseau pour une description plus réaliste de l'infiltration dans le réseau) à ceux issus des premières simulations effectuées sur la ZAC de Moulon. De façon surprenante, des écarts relativement importants apparaissent entre les deux configurations : bien que donnant lieu à des résultats équivalents au niveau des différents piézomètres, la nouvelle simulation produit en effet

des niveaux moyens de nappe inférieur de plusieurs dizaines de centimètres à ceux associés aux simulations initiales. La comparaison des bilans hydrologiques permet de relier cette diminution du niveau moyen de la nappe à l'augmentation des flux conduisant à une vidange de la zone saturée et en particulier du cumul des termes Q_{SF} et I_{RES} .

Les bilans hydrologiques associés aux différentes configurations retenues après le calage du modèle sont présentés dans le tableau 31. Afin de faciliter la comparaison avec les résultats antérieurs, une simulation correspondant à l'application initiale de URBS à la ZAC de Moulon mais s'appuyant sur des conditions initiales identiques à celles adoptées dans le cadre de ce travail (profondeur de la nappe variable d'une parcelle à l'autre et directement déduite des observations) est ici réalisée.

Scénario	P	ET	Q_{NAT}	Q_{VOI}	Q_{BAT}	I_{RES}	Q_{SF}	Δ_{STOCK}
Application initiale – $z_0 = 0.5m$	100	69.1	2.2	2.6	5.0	30.3	0.0	-9.4
Application initiale – z_0 distribué ¹	100	65.1	2.1	2.5	5.0	18.7	0.0	6.4
Résultats actualisés – Minimum	100	62.9	0.6	2.5	5.0	3.1	17.1	4.0
Résultats actualisés – Moyenne	100	63.6	0.9	2.5	5.0	4.1	19.3	4.8
Résultats actualisés – Maximum	100	64.3	1.4	2.5	5.0	5.8	21.1	5.7

Tableau 31 - Valeurs minimales, maximales et moyennes des différents termes du bilan hydrologique à l'état initial pour les configurations sélectionnées à l'issue du calage. Comparaison aux résultats initiaux sous deux hypothèses du niveau initial de la nappe z_0 (correspond aux conditions initiales sur la profondeur de la nappe utilisée pour les « résultats actualisés »)

La dispersion des différents termes du bilan hydrique est de manière générale assez réduite ; tout comme pour les niveaux de nappe, l'incertitude « paramétrique » semble n'avoir ici qu'une incidence limitée. Les termes du bilan hydrologique les plus largement affectés par cette incertitude sont, outre Q_{SF} , le ruissellement sur les surfaces naturelles Q_{NAT} et l'infiltration dans le réseau I_{RES} (les écarts à la valeur moyenne n'excède cependant pas, en valeur relative, quelques dizaines de %). Ces résultats indiquent donc, qu'en dépit de différences importantes dans la valeur de certains paramètres du modèle, les configurations sélectionnées donnent lieu à des fonctionnements hydrologiques relativement semblables.

De façon prévisible, l'application à la zone saturée d'un terme de vidange Q_{SF} vers la nappe des sables, avec une valeur annuelle importante au regard des précipitations, se traduit par une modification significative du bilan hydrique par rapport à l'application initiale. L'introduction de Q_{SF} est ici compensée par une très nette diminution du flux d'infiltration dans les réseaux. La distribution spatiale de ce flux est vraisemblablement affectée par la modification des connexions parcelles-réseau pour les résultats actualisés. Le drainage des parcelles par le réseau d'assainissement devenant plus hétérogène, la modélisation d'un flux s'appliquant de façon homogène à l'ensemble de la ZAC devient donc probablement nécessaire pour retrouver des fluctuations du niveau de la nappe superficielle équivalentes à celles simulées en première approche.

La réduction du flux d'évapotranspiration est quant à elle en grande partie expliquée par l'abaissement du niveau moyen de la nappe superficielle (cf. figure 98). Enfin, la diminution des termes de ruissellement Q_{NAT} et Q_{VOI} découle essentiellement de l'augmentation de la perméabilité du sol K_S suite au nouveau calage du modèle.

4.3.3.2 État aménagé

Les niveaux de nappes simulés à l'état aménagé après actualisation des résultats sont présentés figure 99.

La comparaison de ces résultats à ceux correspondant à la situation initiale (avant aménagement) permet, comme à l'issue de la thèse d'Yinghao Li (2015), de conclure à une possible élévation du niveau de la nappe suite à l'aménagement. Pour ces nouvelles simulations, l'augmentation du niveau moyen de la nappe apparaît cependant plus limitée que ne le laissent supposer les résultats initiaux ; celle-ci n'atteint ici qu'une cinquantaine de centimètre contre près de 1m pour les simulations antérieures (cf. figure 62).

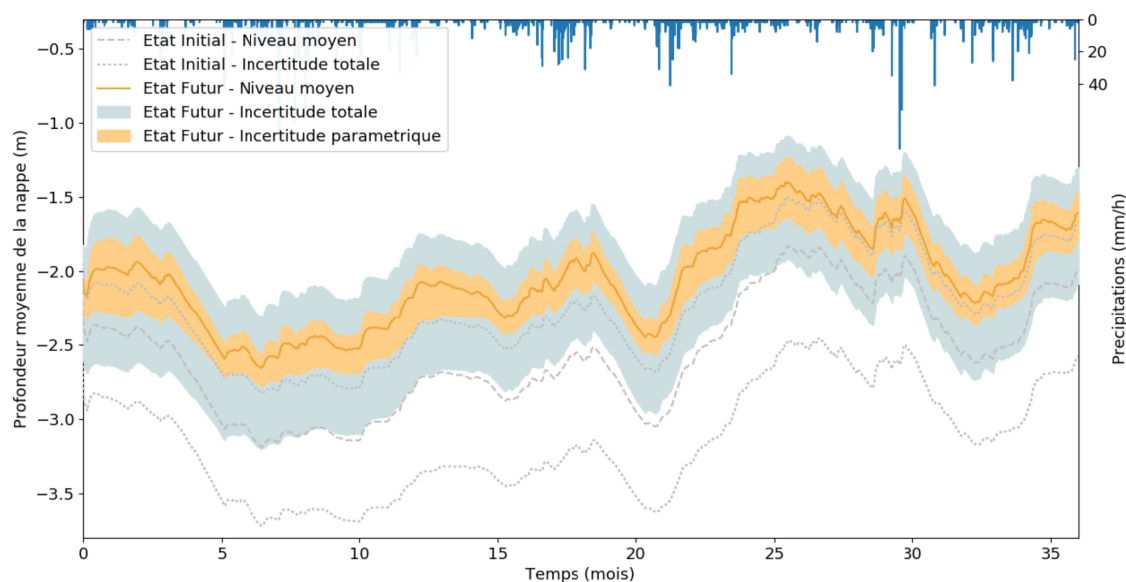


Figure 99 - Niveaux de nappe moyens simulé à l'état aménagé après actualisation des résultats et comparaison aux résultats à l'état initial (après actualisation)

L'élévation du niveau moyen de la nappe, ici d'un ordre de grandeur comparable aux erreurs pouvant être attendues sur les niveaux de nappe simulés, doit vraisemblablement être interprétée avec une certaine prudence. La comparaison des fuseaux d'incertitude entre l'état initial et l'état aménagé suggère néanmoins que cette dernière demeure malgré tout significative. L'incertitude paramétrique apparaît ici légèrement plus importante qu'à l'état initial, en particulier en début de simulation. Le fait que des jeux de paramètres produisant des résultats équivalents lors de la phase de calage ne donne pas nécessairement lieu à des résultats semblables pour d'autres applications du modèle souligne l'intérêt d'une analyse des incertitudes (même simplifiée).

Cette incertitude paramétrique sur les niveaux de nappes simulés à l'état futur peut être directement reliée à la variabilité de certains termes du bilan hydrique pour les jeux de paramètres retenus suite au calage (cf. tableau 32). La somme des flux d'infiltration vers la nappe des sables et vers le réseau $I_{RES} + Q_{SF}$, qui conditionne en grande partie les niveaux de nappe simulés par le modèle, est ainsi comprise entre 28.3 et 33.2 % des précipitations annuelles. Cette incertitude sur la valeur de la composante $I_{RES} + Q_{SF}$ ne se répercute en revanche que dans une moindre mesure sur les autres termes du bilan tels que le ruissellement Q_{NAT} , l'évapotranspiration ET ou la variation du stock d'eau dans le sol sur la durée de la simulation Δ_{STOCK} .

La comparaison des bilans hydrologique pour l'application initiale du modèle et après actualisation des résultats est présentée dans le tableau 32 :

Scénario	ET	Q_{NAT}	Q_{VOI}	Q_{BAT}	I_{RES}	Q_{INF}	Q_{SF}	Δ_{STOCK}
Application initiale – $z_0 = 0.5m$	59.8	7.1	6.3	13.4	18.3	N.A.	0.0	-2.4

Application initiale ¹ – z ₀ distribué ²	55.4	5.8	6.1	13.4	14.2	1.2	0.0	5.2
Résultats actualisés ¹ – Minimum	50.1	0.2	5.3	13.4	8.1	1.9	17.1	0.0
Résultats actualisés ¹ – Moyenne	51.0	0.3	5.3	13.4	11.0	2.1	19.3	1.5
Résultats actualisés ¹ – Maximum	51.8	0.5	5.4	13.4	15.0	2.3	21.1	2.7

Tableau 32 - Valeurs minimales, maximales et moyennes des différents termes du bilan hydrologique à l'état aménagé pour les configurations sélectionnées à l'issu du calage. Comparaison aux résultats initiaux sous deux hypothèses du niveau initial de la nappe z₀ (¹scénarios pour lesquels l'hypothèse d'une régulation des débits à 0.7 l/s/ha utilisée pour la modélisation des noues, ²correspond aux conditions initiales sur la profondeur de la nappe utilisée pour les « résultats actualisés »)

Tout comme à l'état initial, le recours à un mode de gestion alternatif des connexions parcelles-réseau s'accompagne de modifications importantes des différents termes du bilan hydrologique. Si la valeur du flux d'infiltration vers le réseau I_{RES} simulé en première application du modèle semble assez compatible avec les ordres de grandeurs obtenus après actualisation des résultats, l'abaissement du niveau moyen de la nappe et l'augmentation de la perméabilité du sol K_S se traduit ici encore par une diminution marquée des termes de ruissellement et d'évapotranspiration. Le volume infiltré dans les noues Q_{INF} se révèle quant à lui nettement supérieur au volume simulé pour le schéma initial de connexions parcelles-réseau, malgré une diminution du ruissellement et donc des apports vers les noues (entre 19 % contre 25.3 % pour les résultats antérieurs). Alors que l'infiltration dans les noues demeurerait fortement limitée par le niveau de saturation du sol pour l'application initiale du modèle, l'abaissement du niveau de la nappe pour les résultats actualisés permet d'accroître de façon significative la valeur de Q_{INF} (environ 11 % du volume ruisselé contre 4.7% en première approche).

La comparaison des bilans hydrologiques entre l'état initial et l'état aménagé (cf. la synthèse en tableau 33), après actualisation des simulations, conduit à une interprétation de l'impact de l'aménagement assez différente de celle proposée en première application du modèle (Li, 2015). Celle-ci ne permet en effet pas de retrouver la forte diminution du flux d'infiltration I_{RES} mise en évidence dans les travaux précédents pour l'état futur (Li, 2015). Ici, l'aménagement s'accompagne à l'inverse d'une augmentation de l'infiltration vers les réseaux, plus compatible avec l'élévation du niveau moyen de la nappe simulée à l'état aménagé. Comme à l'issu des tests menés autour de l'incidence du prétraitement des données géographiques (cf. 4.2.3), l'hypothèse d'une diminution du terme I_{RES} avec l'augmentation de la taille des unités spatiale ne semble donc pas se vérifier ici (les résultats présentés à l'annexe X indiquent néanmoins que l'infiltration vers le réseau reste, avec les choix prétraitement utilisés, sensible à la discrétisation spatiale du bassin versant).

Scénario	ET	Q _{NAT}	Q _{VOI}	Q _{BAT}	I _{RES}	Q _{INF}	Q _{SF}	ΔSTOCK
État initial	64 [63-64]	1 [1-1]	3 [3-3]	5 [5-5]	4 [3-6]	N.A.	19 [17-21]	5 [4-6]
État aménagé	51 [50-52]	0 [0-1]	5 [5-5]	13 [13-13]	11 [8-15]	2 [2-2]	19 [17-21]	2 [0-3]

Tableau 33 - Synthèse des différents termes du bilan hydrologique simulé à l'état initial et à l'état aménagé pour les configurations sélectionnées à l'issu du calage (valeur moyenne et entre crochets valeurs minimales et maximales)

Les résultats actualisés font également apparaître une évolution des termes de ruissellement Q_{NAT} et Q_{VOI} entre l'état initial et l'état aménagé différente de celle obtenue en première approche. Alors qu'une augmentation du ruissellement était simulée pour l'application initiale du fait de l'élévation du niveau moyen de la nappe superficielle, l'aménagement s'accompagne désormais d'une nette diminution de Q_{NAT} et dans une

moindre mesure de Q_{VOI} . Bien qu'une élévation des niveaux piézométriques soit à nouveau simulée à l'état aménagé, la formation du ruissellement par saturation du sol ne se produit probablement plus que de façon marginale pour les résultats actualisés, les niveaux de nappe étant nettement inférieurs à ceux simulés en première approche. La diminution de Q_{NAT} à l'état aménagé est alors en grande partie expliquée par la réduction de la part des surfaces « naturelles ».

4.3.4 Conclusions

4.3.4.1 Rappel des résultats

L'actualisation de l'application du modèle URBS à la ZAC de Moulon, reposant à la fois sur une gestion des données géographiques plus adaptée à la description de l'infiltration vers les réseaux et la prise en compte d'éventuelles interactions entre la nappe superficielle et la nappe des sables de Fontainebleau, permet de conforter certains des résultats obtenus à l'issue des travaux antérieurs (Li, 2015). Les nombreuses simulations réalisées pour cette nouvelle configuration du modèle tendent ainsi à confirmer la possibilité d'une élévation du niveau de la nappe superficielle suite à l'aménagement de la zone d'étude (même si les écarts sur les niveaux piézométriques simulés entre état initial et état aménagé apparaissent ici plus limités que dans l'application initiale). Les raisons de cette élévation simulée restent à analyser et interpréter de façon plus fine.

L'incidence de l'aménagement sur les volumes s'infiltrant vers le réseau apparaît en revanche, après actualisation des résultats, nettement plus compatible avec les effets observés au niveau de la nappe superficielle. La diminution de ce terme simulée en première approche à l'état aménagé, difficilement explicable compte tenu de l'élévation du niveau piézométrique, n'est ainsi pas reproduite. Pour les nouvelles simulations, la modification de la profondeur de la nappe s'accompagne à l'inverse d'un drainage accru par le réseau d'assainissement sous l'effet de l'augmentation de la charge hydraulique au-dessus de ce dernier.

De manière plus générale, l'introduction dans le modèle d'un flux d'infiltration de la zone saturée (correspondant à la nappe superficielle) vers des horizons plus profonds se traduit par des modifications significatives des bilans hydrologiques simulés à l'état initial et dans une moindre mesure à l'état aménagé. Le calage du modèle conduit en effet à retenir une valeur annuelle de ce flux d'environ 120 mm/an soit environ de 20 % des précipitations, dont le poids dans le bilan hydrologique est par exemple contrebalancé par une très nette diminution de l'infiltration dans le réseau à l'état initial. Le ruissellement sur les surfaces naturelle est également affecté par la prise en compte ces échanges entre la nappe superficielle et la nappe des sables, à travers les effets induits sur le calage du modèle. Cette composante du bilan hydrologique diminue ainsi fortement sous l'effet de l'abaissement du niveau de la nappe superficielle mais surtout du fait de la modification de la perméabilité du sol (une valeur très supérieure à celle utilisée en première approche étant identifiée à l'issue du calage).

La meilleure adéquation entre les niveaux de nappes simulés et les observations est ici obtenue pour des valeurs très largement supérieures à zéro du flux d'infiltration vers la nappe des sables. Les résultats du calage associés à cette nouvelle application du modèle indiquent donc que l'hypothèse d'une interaction entre la nappe superficielle et la nappe des sables de Fontainebleau ne peut à ce stade pas être écartée. Le fait que des performances du modèle équivalentes puissent être obtenues en supposant (comme dans l'application initiale) une absence d'échanges entre les deux nappes suggère néanmoins

que les résultats précédents pourraient être avant tout conditionnés par les choix de traitement des connexions parcelles-réseau et doit donc inviter à une certaine prudence dans leur interprétation. Des investigations complémentaires seront donc à terme nécessaire pour tenter de préciser les interactions entre la nappe superficielle et la nappe des sables de Fontainebleau à l'échelle de la ZAC.

4.3.4.2 Principaux enseignements

L'influence du prétraitement des données géographiques, déjà mise en évidence à l'issu des tests de sensibilité présentés en 4.2.3, est clairement confirmée à travers la démarche d'actualisation de l'application de URBS à la ZAC de Moulon. Les résultats obtenus en procédant au calage du modèle sur la base d'un schéma alternatif de connexion parcelles-réseau conduit ici à retenir des jeux paramètres parfois très différents de ceux identifiés en première approche. Ces modifications de la valeur des paramètres du modèle se traduisent alors par des différences assez notables dans le fonctionnement hydrologique du bassin versant étudié. La distribution spatiale des points de connexion des parcelles au réseau, dépendante du niveau de discrétisation de la zone d'étude mais surtout des choix de prétraitement des données géographiques, semble donc très largement conditionner les niveaux de nappes ainsi que les différents flux simulés par le modèle.

L'application proposée illustre également l'intérêt d'une démarche, même simplifiée, d'analyse des incertitudes pour compléter l'interprétation de certains résultats. L'incertitude sur les niveaux de nappe simulés apparaît assez importante mais surtout largement supérieure aux variations induites par la plupart des tests de sensibilités présentés en 4.2. Si un tel résultat permet en premier lieu de relativiser l'importance d'un bon nombre d'hypothèses de modélisation, il doit également inviter à se concentrer sur certaines des composantes actuelles du modèle. Ainsi, s'il demeure probablement pertinent de poursuivre le développement de nouvelles fonctionnalités, il semble également indispensable, compte tenu des incertitudes sur les niveaux de nappes simulés, de chercher à consolider la représentation de certains processus dans le modèle.

Enfin, le fait que la modification des prétraitements géographiques conduise à identifier une paramétrisation produisant des résultats semblables à ceux obtenus en première approche en termes d'adéquation aux observations, mais avec un fonctionnement hydrologique du bassin versant radicalement différent, doit probablement amener à s'interroger sur le pouvoir prédictif du modèle. Un tel résultat illustre l'une des limites de l'application de URBS à la ZAC de Moulon : l'information apportée par les seules données piézométriques se révèle ici insuffisante pour distinguer laquelle, de la configuration « initiale » ou de la configuration « actualisée », est la plus réaliste. La poursuite des travaux de modélisation sur la zone d'étude supposerait donc vraisemblablement de diversifier les sources d'observations pour conforter la paramétrisation de certains flux.

4.4 Conclusion et perspectives

La poursuite des travaux de modélisation sur la ZAC de Moulon s'inscrit dans le cadre d'une démarche plus globale de développement du modèle URBS, reposant à la fois sur une analyse critique de son application à différents bassins versant et sur l'introduction de nouvelles fonctionnalités à partir de tests et d'observations spécifiques à ces différents cas d'étude. Ces travaux ont ici permis de contribuer au développement de deux « modules », l'un visant à simuler une régulation des débits via des noues végétalisées et l'autre des rabattements de nappes superficielles au niveau des sous-sols, en s'appuyant

pour le second sur des mesures de débits d'exhaure sur l'un des bâtiments de la ZAC. Si la représentation dans URBS de ces deux composantes mérite encore probablement d'être consolidée, les résultats précédents illustrent bien l'intérêt d'un terrain d'étude tel que la ZAC de Moulon pour approfondir la compréhension et la modélisation du fonctionnement des bassins versant urbains.

Au-delà du développement de ces deux fonctionnalités, l'application de URBS à la ZAC de Moulon a été l'occasion de progresser de façon significative dans la compréhension du « comportement » du modèle, et notamment de sa sensibilité à certains choix de modélisation. Le caractère relativement atypique du bassin versant étudié, avec la présence de nombreuses parcelles agricoles, un découpage cadastral très irrégulier et une extension limitée du réseau d'assainissement, a ainsi permis de mettre en évidence l'influence des prétraitements géographiques lorsque la configuration de la zone d'étude s'éloigne de celles pour lesquelles le modèle avait initialement été développé (c.à.d. milieu strictement urbain structuré par le réseau viaire).

Les résultats obtenus dans le cadre du travail permettent également de conforter certaines des conclusions quant à l'impact du projet formulées à l'issue de la première application du modèle à la zone d'étude. En dépit des multiples incertitudes générées par les différents choix de modélisation, et notamment le mode gestion des connexions parcelles-réseau à partir des données géographiques, les simulations semblent en effet confirmer que l'aménagement pourrait s'accompagner d'une élévation non-négligeable du niveau moyen de la nappe superficielle. Ces résultats doivent néanmoins être interprétés avec une certaine prudence. Le fonctionnement hydrologique du bassin versant n'est à ce jour compris que de façon partielle, ce qui se traduit par des erreurs sur les niveaux de nappes simulés à l'état initial mais aussi par des incertitudes importantes sur les sorties du modèle à l'état aménagé.

De nombreux aspects de l'application du modèle URBS à la ZAC de Moulon pourraient probablement être approfondis pour améliorer la compréhension de l'impact de l'aménagement. Des interrogations subsistent en particulier quant aux processus de subsurfaces tels que l'infiltration de la nappe superficielle vers les réseaux et les éventuels échanges entre cette dernière et la nappe des sables de Fontainebleau, que les travaux de modélisation ne permettent pas véritablement de quantifier. En absence de connaissances plus précises sur les échanges entre la nappe superficielle et la nappe des sables de Fontainebleau, seule la diversification des observations, avec par exemple un suivi des débits dans certaines portions du réseau, pourrait contribuer à améliorer la connaissance du fonctionnement hydrologique de la ZAC et préciser les impacts du projet d'aménagement. Le niveau de caractérisation géologique de la zone d'étude, assez inédit en comparaison des données habituellement disponibles en hydrologie urbaine, pourrait également inviter à s'interroger sur l'intérêt d'une représentation plus détaillée du sous-sol dans URBS, avec notamment une prise en compte de son hétérogénéité verticale et horizontale. Enfin, si les travaux précédents illustrent bien l'intérêt du cadre de modélisation pour simuler l'effet des techniques de gestion à la source des eaux pluviales, il sera vraisemblablement nécessaire de conforter la représentation de ces ouvrages dans URBS et d'analyser de manière plus approfondie leur impact sur la nappe superficielle.

5 Conclusions et Perspectives

Le partenariat de recherche entre le Cerema, l'Ifsttar, et l'Epa Paris-Saclay sur la ZAC du Moulon a permis des échanges de données et de résultats qui sont présentés dans ce rapport final. Les travaux sur la géologie, l'hydrogéologie superficielle, et la modélisation intégrée du cycle de l'eau pluviale ont permis de mieux comprendre le fonctionnement hydrologique de la ZAC en construction et de donner des pistes sur le fonctionnement futur une fois aménagé.

Comme attendus, la géologie et l'hydrogéologie superficielles se sont avérées complexes car fortement hétérogènes spatialement et temporellement. Malgré des investigations à un niveau de détail assez rare (500 sondages géologiques recensés ; 9 piézomètres suivis en continu depuis 6 ans et 17 campagnes de mesures ponctuelles lors desquelles 35 piézomètres étaient relevés en moyenne), la caractérisation n'est pas encore complète. Du point de vue géologique, la distinction des différentes formations superficielles listées dans la carte géologique officielle s'est avérée difficile du fait des mélanges et hétérogénéités spatiales, ainsi que de la subjectivité des descriptions faites dans les coupes de sondage. Il a finalement été retenu de distinguer 3 couches dans le modèle géologique 3D : la couche de Limons des Plateaux, une couche constituée des Argiles à Meulière et des Formations de Lozère, ainsi que la couche des Sables de Fontainebleau, facilement identifiable. La constitution du modèle 3D a aussi été l'occasion de porter des avis critiques sur les résultats des sondages opérationnels, et d'utiliser une méthode de diagraphie nucléaire pour mieux identifier les interfaces entre couches.

La présence d'une réelle nappe pérenne et avec des écoulements horizontaux significatifs a pu être confirmée sur la partie Nord de la ZAC, nappe qui s'avère drainée vers le Nord par la rigole de Corbeville et vers l'Est par le talweg naturel présent. Dans les parties plus au Sud de la ZAC, où des aménagements anciens sont présents, les piézométries observées ne permettent pas de conclure à une réelle nappe pérenne. Il apparaît plutôt des poches de saturation, dont les variations de niveau d'eau ne sont pas toujours corrélées et semblent parfois influencées par des aménagements anthropiques voisins (bassins, anciennes rigoles,).

L'usage du modèle de recherche intégré URBS sur le projet d'aménagement de ZAC a été riche d'enseignements. Le cas d'étude, avec un contexte hydrogéologique peu favorable à une gestion à la source des eaux pluviales, a d'abord été l'occasion de développer dans le modèle certaines fonctionnalités : c'est particulièrement le cas des eaux d'exhaure et de la régulation des débits. Il a aussi été l'occasion d'évaluer, et parfois corriger, certains parti pris de modélisation qui étaient pertinents sur une zone urbaine assez dense avec un réseau viaire structurant, ce qui n'est pas le cas de la ZAC à l'état actuel mais aussi à l'état futur : c'est par exemple le cas des connexion parcelle-réseau. Il a enfin été l'occasion d'une étude assez complète du réalisme des résultats du modèle à l'état actuelle de la ZAC mais aussi à l'état futur. Les résultats indiquent que l'approche de modélisation est clairement sur-paramétrée par rapport aux observations disponibles pour caler le modèle (les seules mesures piézométriques) : il en résulte que des différentes paramétrisations du modèle permettent de bien reproduire les observations (problème de l'équi-finalité). Malgré ces réserves, une étude de sensibilité et d'incertitude a montré que certains résultats sur l'impact de l'aménagement paraissent robustes : c'est le cas par exemple du flux d'évapotranspiration qui se trouve réduit et du niveau moyen de la nappe qui s'élève suite aux aménagements.

Le ZAC du Moulon est en pleine évolution car en construction, des méconnaissances affectent encore son comportement hydrogéologique, et son cas d'étude reste adapté à la poursuite des développements et l'évaluation du modèle intégré URBS. Des Perspectives précises ont été identifiées dans ce rapport en fin de présentation de chaque action. Elles peuvent être complétées plus généralement en soulignant que malgré des efforts importants d'observation de la géologie et de l'hydrogéologie superficielle, il est apparu un manque de mesures hydrologiques pour mieux connaître les écoulements d'eau dans le réseau d'eau pluviale et mieux caler le modèle URBS.

Références

- Artelia, 2013. Modélisation des écoulements du réseau hydrologique du plateau de Saclay. Rapport de phase 1 – Construction du modèle.
- Artelia, 2013. ZAC du Projet urbain de Moulon. Dossier de demande d'autorisation d'une opération classée au titre de la loi sur l'eau (articles L214-1 à L214-6 du Code de l'Environnement).
- Artelia, 2016. Lisière du Moulon, note d'assainissement. Rapport Artelia et Confluences Ingénieur Conseil.
- Avignon C., Estimation du bilan hydrologique du Plateau péri-urbain de Saclay : approche par observations, 2015, Mémoire de master
- Beven K., 2001. How far can we go in distributed hydrological modelling?. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, European Geosciences Union, 5 (1), pp.1-12.
- Beven K., 2006. A manifesto for the equifinality thesis, Journal of Hydrology, Volume 320 (1–2), pp. 18-36
- Clark M. P., Bierkens M. F. P., Samaniego L., Woods R. A., Uijlenhoet E., Bennett K. E., 2017. The evolution of process-based hydrologic models: historical challenges and the collective quest for physical realism, Hydrol. Earth Syst. Sci., 21, 3427-3440, 2017
- Cojean R., 1975. Contribution à une cartographie géotechnique pour l'aménagement régional : plateaux de Trappes-Saclay, vallées de la Bièvre et de l'Yvette. Mémoire de thèse, Université Paris VI.
- Grisoni J.C., 1970. Argiles à meulière et calcaires de Beauce en Hurepoix – Synthèse géologique. Rapport de recherche LPC n°87, juillet 1979.
- Houzé C., 2013. Caractérisation hydrogéophysique des nappes superficielles (Plateau de Saclay et du Moulon). Mémoire de Master, Université Paris Sud.
- Li, Y., 2015. Modélisation des processus hydrologiques au sein d'un bassin versant urbain -Étude d'un module d'écoulement dans la zone saturée et application au projet urbain du futur campus Paris-Saclay. Ecole Centrale de Nantes.
- Morena, 2004 ; Modélisation hydrologique distribuée en milieu urbanisé : représentation des processus de production et développement du modèle URBS, Thèse de doctorat, Grenoble INPG
- Nicole J., 2003. Dynamique d'une nappe perchée temporaire sur plateau d'argiles à meulière du bassin parisien, relation avec l'organisation pédologique et le fonctionnement hydrodynamique de la couverture de sol limoneux hydromorphe. Mémoire de Thèse.
- Renard F., Tognelli A., 2016. A new quasi-3D unsaturated-saturated hydrogeologic model of the Plateau de Saclay (France), Journal of Hydrology, Volume 535, pp.495-508
- Rodriguez F., Andrieu, H., Morena, F., 2008. A distributed hydrological model for urbanized areas :

Model development and application to case studies. J. Hydrol. 351, pp.268–287.

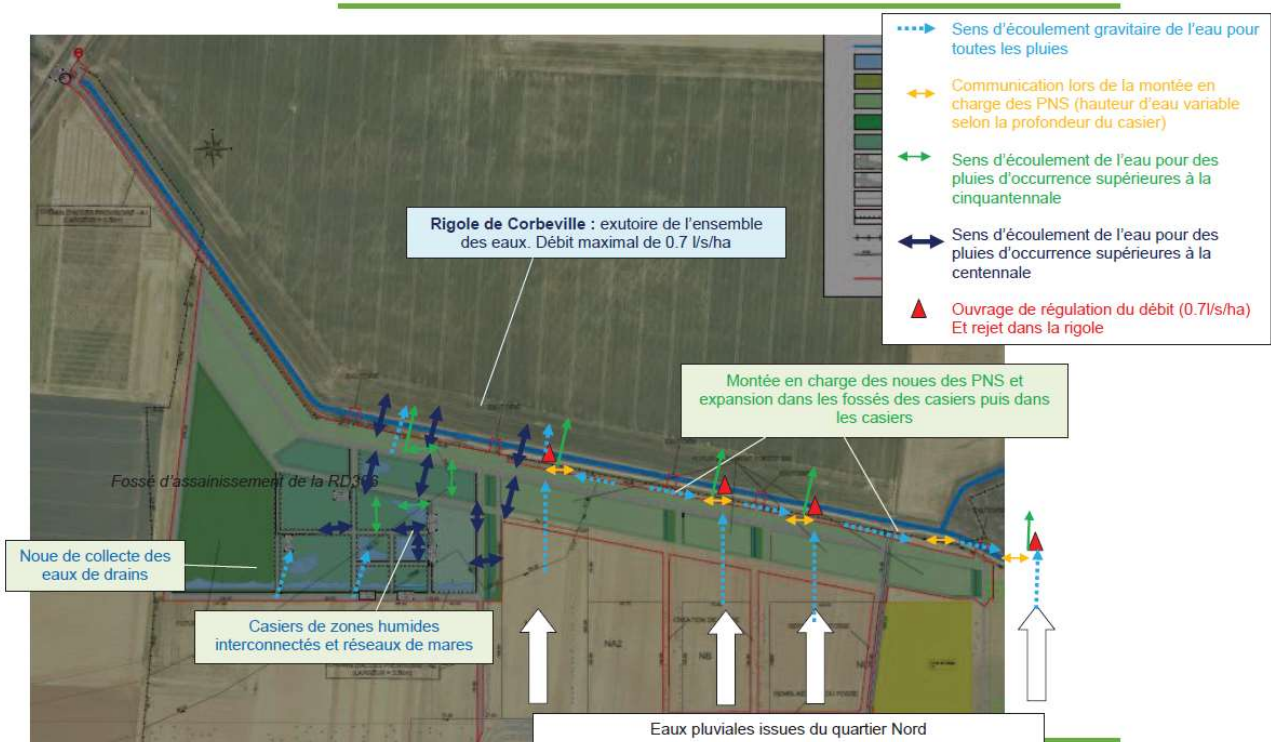
Vernoux J.F., Barbier J., Donsimoni M., Seguin J.J., Vairon J., 1999. Etude hydrogéologique du plateau de Saclay (Essonne), rapport BRGM SGR/IDF R40840.

Wang, Q.J., Shrestha, D.L., Robertson, D.E., Pokhrel, P., 2012. A log-sinh transformation for data normalization and variance stabilization. Water Resour. Res. 48.

6 Annexes

Annexe 1 – Détails de coupes géologiques

Cf. le fichier pdf joint au rapport

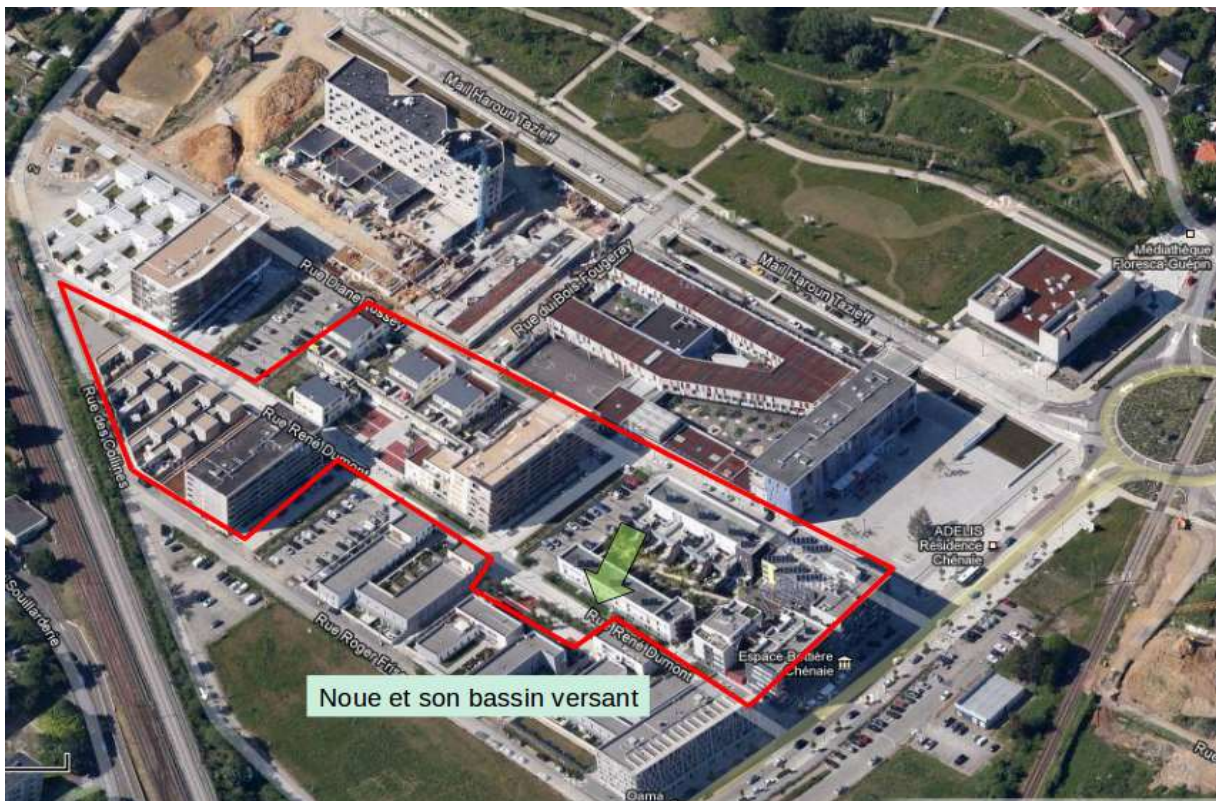


Fonctionnement hydrologique prévu en lisière Nord de la ZAC du Moulon

Annexe 3 – Description de l'Ecoquartier Bottière Chénaie

L'écoquartier Bottière Chénaie est un nouveau quartier situé à l'Est de Nantes, dont l'aménagement est réalisé depuis 2010 et devrait se terminer en 2018; sa superficie est de 35 ha. De nombreux aménagements de gestion alternative des eaux pluviales sont présents sur cet écoquartier (toitures végétalisées, bassin de rétention et noues végétalisées) sur lequel environ 1600 logements sont prévus à terme. Le drainage des eaux pluviales se fait essentiellement par un réseau de noues végétalisées qui favorisent l'infiltration. Une de ces noues a été équipée par le Laboratoire Eau et Environnement de l'IFSTTAR à partir de 2013 afin d'en étudier le comportement hydrologique, dans le cadre de l'ONEVU⁴ (Figure ci-dessous). La noue est équipée (1) d'une mesure du débit de sortie (la noue est connectée en aval au réseau d'eau pluviale) grâce à une mesure de hauteur d'eau dans un seuil à déversoir triangulaire et (2) d'une mesure de teneur en eau du sol à 35cm de profondeur dans l'axe de la noue. Ce tronçon de noue représente l'exutoire d'un bassin versant de 1,7 ha environ, dont la surface est très urbanisée (fraction imperméabilisée ~ 74%).

Les données du débit de sortie ont été utilisées pour l'évaluation de la performance du module "noues" du modèle hydrologique URBS. L'année 2014 a été considérée pour cette évaluation, c'est une année relativement pluvieuse (cumul de pluie ~ 960 mm) pour laquelle 113 événements pluvieux de hauteur précipitée supérieure à 2mm ont été identifiés.

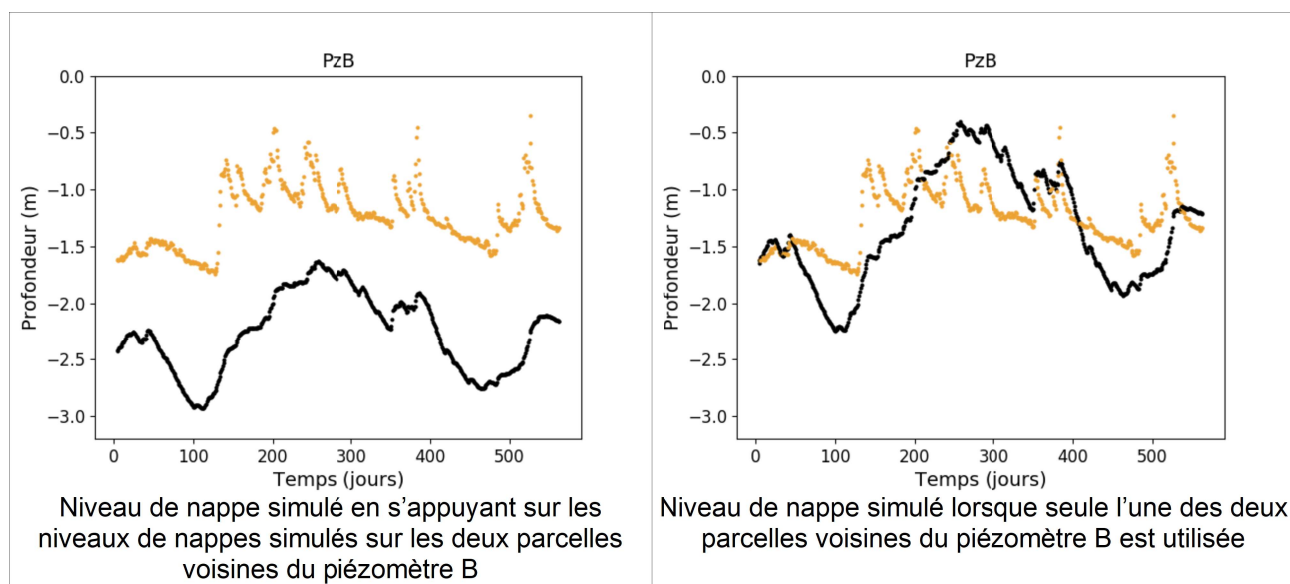


Représentation de la partie Nord de l'écoquartier Bottière Chénaie, avec le bassin versant de la noue instrumentée.

⁴ ONEVU : Observatoire Nantais des EnVironnements Urbains

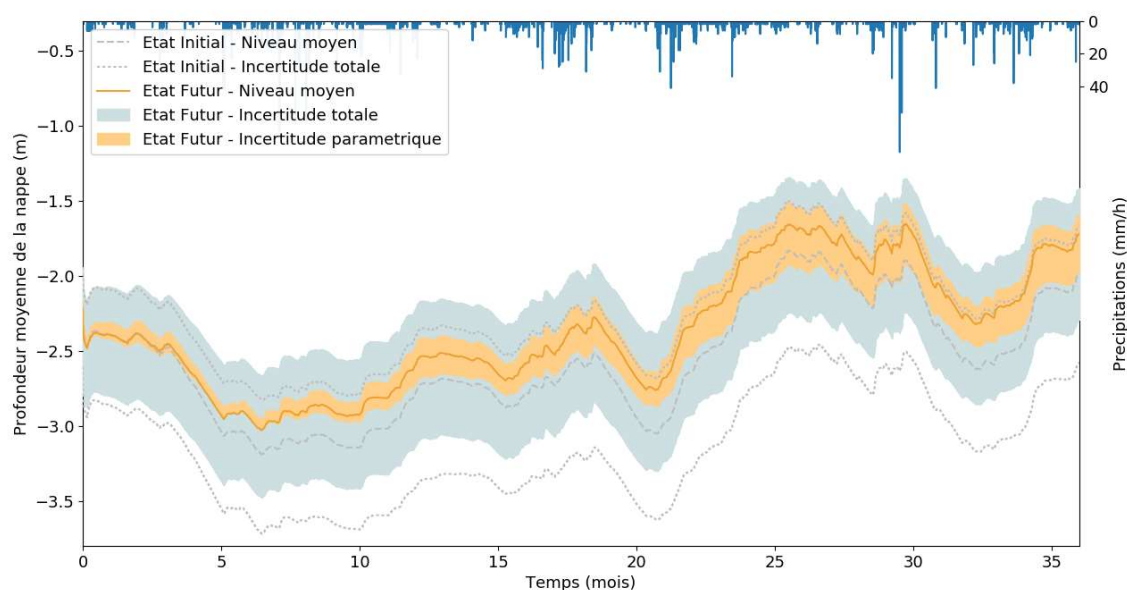
Annexe 4 – Sensibilité des résultats au mode de calcul de la profondeur de la nappe au niveau du piézomètre B

Le piézomètre B se situe à l'interface entre deux parcelles agricole de taille très conséquente (7.2 et 38.8 ha). Le niveau de nappe simulé par le modèle pour ce piézomètre, correspond à une valeur moyenne des niveaux associés à l'une et l'autre de ces parcelles, susceptible de différer assez fortement de la mesure relativement localisée du niveau de la nappe. Les graphiques ci-dessous font apparaître les niveaux de nappes simulés au niveau du piézomètre B en retenant dans le premier cas cette valeur moyenne et en ne s'appuyant dans le second que sur le niveau de nappe simulé sur la parcelle de 38.8 ha.



Annexe 5 – Incidence de la discrétisation pour la configuration correspondant aux résultats actualisés

Les niveaux moyens de nappe simulés à l'état aménagé en utilisant la discrétisation du bassin versant adoptée pour l'état initial sont présentés ci-dessous. En comparaison des fuseaux obtenus à l'état aménagé pour la discrétisation future (cf. figure 99), les niveaux de nappes simulés apparaissent ici plus proches de ceux simulés avant aménagement, en particulier en début de simulation. Si les résultats obtenus semblent confirmer que l'aménagement pourrait s'accompagner d'une élévation du niveau de la nappe superficielle, ces derniers indiquent également que l'amplitude cette élévation demeure largement incertaine et pourrait s'avérer bien plus limitée que ne laissait supposer les résultats initiaux.



Niveaux de nappe moyens simulés à l'état aménagé avec la discrétisation initiale et comparaison aux résultats à l'état initial (à comparer à la figure 99)

Le bilan hydrologique associé à ces nouvelles simulations est présenté dans le tableau ci-dessous et peut être comparé aux résultats obtenus pour la discrétisation future (second tableau):

Scénario	ET	Q _{NAT}	Q _{VOI}	Q _{BAT}	I _{RES}	Q _{INF}	Q _{SF}	Δ _{STOCK}
Discrétisation initiale – Minimum	49.3	1.3	5.5	13.4	2.8	1.0	17.1	5.8
Discrétisation initiale – Moyenne	49.9	2.0	5.6	13.4	3.5	1.1	19.3	7.1
Discrétisation initiale – Maximum	50.6	2.8	5.8	13.4	4.4	1.2	21.1	7.9
Scénario	ET	Q _{NAT}	Q _{VOI}	Q _{BAT}	I _{RES}	Q _{INF}	Q _{SF}	Δ _{STOCK}
Discrétisation future – Minimum	50.1	0.2	5.3	13.4	8.1	1.9	17.1	0.0
Discrétisation future – Moyenne	51.0	0.3	5.3	13.4	11.0	2.1	19.3	1.5
Discrétisation future – Maximum	51.8	0.5	5.4	13.4	15.0	2.3	21.1	2.7

Bilans hydrologiques simulés à l'état aménagé en utilisant la discrétisation finale et la discrétisation future

Le bilan hydrologique associé au scénario « état aménagé – discrétisation initiale » se révèle assez différent du bilan simulé pour la discrétisation future. Les termes le plus fortement affectés par la modification de la discrétisation sont l'infiltration vers le réseau I_{RES} et le ruissellement sur les surfaces naturelles Q_{NAT} .

Le recours à un découpage plus fin du bassin versant s'accompagne d'une augmentation du ruissellement sur les surfaces naturelles, en dépit d'une légère diminution du niveau moyen de la nappe superficielle. Un tel résultat traduit vraisemblablement le fait que les niveaux de saturation simulés pour le scénario « discrétisation initiale » sont globalement plus hétérogènes que pour le scénario « discrétisation future » (en fin de simulation l'écart-type du niveau de la nappe atteint ainsi 1.4 m dans le premier cas contre 90 cm dans le second). L'augmentation du ruissellement sur les surfaces naturelles pour la configuration s'appuyant sur la discrétisation initiale pourrait donc résulter d'élévation très localisées du niveau de la nappe superficielle dont le modèle URBS ne parvient pas à rendre compte lorsqu'un découpage du bassin versant plus grossier est utilisé.

Le passage de la discrétisation future à la discrétisation initiale donne également lieu à une nette diminution du flux d'infiltration I_{RES} . Cette dernière apparaît de manière générale cohérente avec l'abaissement du niveau moyen de la nappe simulé pour la configuration « état aménagé – discrétisation initiale ». Les valeurs calculées pour cette configuration s'avère relativement proches de celles obtenues à l'état initial. Si la discrétisation spatiale semble bel et bien influencer le calcul du flux d'infiltration vers les réseau, la tendance observée est ici à l'inverse de ce que pouvait laisser supposer les résultats obtenus en première approche (pour lesquels le recours à une discrétisation plus grossière semblait s'accompagner d'une diminution de I_{RES}). Cette diminution de la valeur de I_{RES} reste cependant difficile à interpréter ; cette dernière pourrait à la fois être expliquée par la diminution de la surface du bassin directement drainée par le réseau (elle même provoquée par une discrétisation plus grossière du réseau à l'état aménagé et par la diminution de la taille des parcelles au voisinage du réseau) et par l'élévation du niveau moyen du réseau à l'état futur du fait de la présence de noues.

Annexe 6 – Méthodologie pour l'estimation de l'incertitude totale sur les niveaux de nappes simulés

L'incertitude totale sur les niveaux de nappes simulés par le modèle URBS est déduite des propriétés statistiques des erreurs obtenues pour les piézomètres A, B, C, D, E et I. La comparaison à chaque pas de temps des niveaux de nappe observés et simulés permet en premier lieu de générer une distribution de ces erreurs $\varepsilon = Z_{OBS} - Z_{SIM}$ qui sera par la suite supposée représentative de l'erreur commise sur les niveaux moyens de nappe simulés par le modèle.

Les fuseaux associés à l'incertitude totale correspondent ici au seuil de risque de 95 %. L'enveloppe de l'incertitude totale peut donc en principe être estimée en ajoutant aux niveaux de nappes simulés un terme d'erreur correspondant au 5^e et au 95^e percentile de cette distribution.

L'hétéroscédasticité des résidus entre niveaux de nappes observés et simulés ne permet cependant pas d'appliquer un terme d'erreur identique à chaque pas de temps. En effet, une dépendance entre l'amplitude de l'erreur et les niveaux de nappe simulés est ici observée (avec des erreurs en moyenne plus élevées lorsque la profondeur de la nappe augmente comme l'illustre la figure 97). Une transformation des données (décrite par Wang et al, 2012) est donc utilisée pour contourner le problème de la dépendance entre la variance des résidus et les niveaux de nappes simulés.

Cette transformation des données Φ est appliquée aux niveaux de nappe simulés et observés (Z_{SIM} et Z_{OBS}) de manière à annuler la dépendance entre les sorties du modèle Z_{SIM} et la variance des erreurs ε . Dans l'espace des données transformées, les termes d'incertitude $\Phi(\varepsilon)_{05}$ et $\Phi(\varepsilon)_{95}$ correspondant au seuil d'erreur de 95 % peut alors être directement estimé à partir de la distribution des résidus obtenue à partir des niveaux de nappes transformés $\Phi(\varepsilon) = \Phi(Z_{OBS}) - \Phi(Z_{SIM})$. Ce terme est alors appliqué à chaque pas de temps, à la valeur transformée du niveau moyen de la nappe simulée par le modèle. Les fuseaux d'incertitude dans l'espace réel des niveaux de nappes sont finalement obtenue par transformée inverse : $Z_{05} = \Phi^{-1}(\Phi(Z_{SIM}) + \Phi(\varepsilon)_{05})$ et $Z_{95} = \Phi^{-1}(\Phi(Z_{SIM}) + \Phi(\varepsilon)_{95})$ (avec Φ^{-1} désignant la réciproque de Φ).

