

Université Pierre et Marie Curie, MinesParisTech
& AgroParisTech

Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie
Parcours Hydrologie-Hydrogéologie

Estimation du bilan hydrologique du Plateau
péri-urbain de Saclay : approche par observations

AVIGNON Cécilia

Co-encadrants : BERTHIER Emmanuel (Cerema)

MAUGIS Pascal (LSCE, CEA)

Cerema DTer IDF, Trappes (78)



Septembre 2015



Abstract

Owing to futures constructions of the cluster Paris-Saclay (big project of national interest) and in order to control flood risks, hydrological resources management on the Plateau became an essential issue. Therefore, understanding and describing the hydrological behavior of this artificial, intensely drained watershed are crucial steps. This starts with the estimation of the water-budget from observations over the last years, which has been conducted in this study.

The necessary data were recovered, reviewed, analyzed and validated. This allowed to seek influence parameters on selected hydrological flows. For example, annual flows and run-off coefficients are influenced by precipitation, drainage, drainage equipment, distribution and rate of urbanization, topography, ponds and anthropogenic activity. This study provides estimates of groundwater recharge and infiltrations in sub-surface using the fluctuations method, which compare well to other results. However, this method relies on a "specific yield" parameter which is difficult to determine. Complementary field experiments will certainly prove useful to check this concept and document the value.

The different contributions to the water-budget (precipitations, drainage, recharge, variation of subsurface hydrological reserve, run-off coefficients, industrial use, etc.) were calculated. This allowed to quantify some components of the hydrological dynamics of the plateau at both yearly and seasonal scales. It appears that drainage and rain partitioning primary flow are important and that other ones are comparatively weak. The estimation of water-budget improve generally in accuracy and time-space scale as data quality and reliability increase and parameters get more confidently estimated. Despite that, measurements and calculations uncertainty are not insignificant and it is important to consider them.

Keywords: Plateau, water-budget, flow, artificial, observations, space and temporal scale, hydrological resources management.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier grandement mon encadrant principal Emmanuel Berthier, pour tous ses conseils pertinents, le temps et la confiance qu'il m'a accordé. Je n'oublie pas Pascal Maugis, à qui j'adresse aussi mes remerciements pour ses disponibilités et son enthousiasme à m'accompagner aux différents entretiens ainsi qu'aux conseils pointilleux pour la réalisation de ce stage. Je n'oublie pas non plus Yinghao Li pour toute son aide et sa patience ainsi que les autres membres du Cerema avec qui j'ai pu passer d'agréables moments et découvrir de nouvelles activités. Un grand merci aux quatre petites sardines du fond sans qui ce stage n'aurait pas été pareil : beaucoup d'entraide, de débats, de tests culinaires mais surtout de rires et de paris.

Je n'oublie certainement pas tous mes amis d'HH et celui qui se reconnaîtra pour tous ces moments délirés passés ensemble qui ne risquent pas de s'oublier de sitôt. J'adresse aussi un grand merci aux responsables et professeurs de ce master, toujours disponibles et à l'écoute de leurs étudiants. Enfin, je remercie tous ceux qui prendront la peine et le temps de lire ce rapport et qui contribueront à son amélioration.

Table des matières

Abstract.....	2
Remerciements.....	2
Table des matières	3
Liste des figures.....	4
Liste des annexes.....	4
Liste des tableaux.....	4
Introduction	5
1. Contexte de l'étude	6
1.1. Caractérisation de la zone d'étude : le Plateau péri-urbain de Saclay	6
1.1.1. Contexte géographique et aspect géomorphologique	6
1.1.2. Contexte climatique	7
1.1.3. Contexte hydrologique et pédologique.....	8
1.1.4. Contexte hydrogéologique	9
1.2. Définition des bilans hydrologiques.....	12
1.2.1. Cas général	12
1.2.2. Application en contexte péri-urbain.....	15
2. Démarche de travail	16
2.1. Synthèse des données obtenues	16
2.2. Instauration d'hypothèses	17
2.3. Méthode d'analyse des données obtenues.....	18
3. Estimation des différents flux du bilan hydrologique	19
3.1. Pluies et évapotranspiration potentielle	19
3.1.1. A l'échelle annuelle.....	19
3.1.2. Répartition mensuelle.....	20
3.2. Ecoulements dans les rivières, rus et rigoles.....	21
3.2.1. Contribution du CEA Saclay.....	21
3.2.2. Etude débitimétrique	23
3.2.2.1. A l'échelle pluriannuelle.....	23
3.2.2.2. A l'échelle annuelle	24
3.2.2.3. A l'échelle mensuelle.....	26
3.2.3. Estimation des coefficients d'écoulements pluriannuels.....	28
3.3. Infiltration en sub-surface et recharge en profondeur	30
3.3.1. Infiltration dans les lentilles aquifères de sub-surface	30
3.3.1.1. Méthode.....	31
3.3.1.2. Incertitudes et limites de la méthode.....	33
3.3.1.3. Résultats et interprétations.....	34
3.3.2. Recharge de la nappe des Sables de Fontainebleau	36
3.3.2.1. Méthode.....	36
3.3.2.2. Incertitudes et limites de la méthode.....	37
3.3.2.3. Résultats et interprétations.....	37
4. Bilan hydrologique pluriannuel du Plateau de Saclay	39
Conclusion et perspectives.....	41
Références bibliographiques	43
Annexes	44
Résumé	53

Liste des figures

Figure 1 : Localisation du Plateau de Saclay à l'échelle de l'Île de France	6
Figure 2 : Températures mensuelles relevées à la station météorologique de Trappes sur 30 ans.....	7
Figure 3 : Précipitations mensuelles moyennes relevées à la station météorologique de Trappes sur 67 ans	7
Figure 4 : Représentation schématique de la géologie du plateau (coupe SN).....	10
Figure 5 : Représentation des différents flux existants sur le Plateau de Saclay	14
Figure 6 : Localisation de l'ensemble des points de mesures	17
Figure 7 : Variation annuelle de l'ETP Penman Monteith sur 63 ans	19
Figure 8 : Évolution mensuelle des évapotranspirations à la station de Trappes et des précipitations moyennes du plateau	20
Figure 9 : Fonctionnement du CEA Saclay (exemple pour l'année 2014)	21
Figure 10 : Débits pluriannuels de l'ensemble des stations du plateau	23
Figure 11 : Diagramme à moustache des stations sur les rivières	24
Figure 12 : Diagramme à moustache des stations sur les rigoles et rus du plateau.....	25
Figure 13 : Coefficients d'écoulement pluriannuels de chacune des stations	29
Figure 14 : Répartition de l'ensemble des piézomètres dans les eaux de sub-surface	30
Figure 15 : Variations piézométriques des eaux de sub-surface	30
Figure 16 : Exemple d'estimation de l'augmentation du niveau piézométrique	31
Figure 17 : Exemples de courbes de rétention des eaux : a) pour une nappe profonde ; b) pour une nappe peu profonde (cas de la « nappe » superficielle).....	32
Figure 18 : Evolution des niveaux piézométriques et de la moyenne associée dans la zone du Moulon	34
Figure 19 : Cas de la nappe des Sables de Fontainebleau	36
Figure 20 : Evolution des niveaux piézométriques de la nappe des Sables de Fontainebleau	37

Liste des annexes

Annexe 1 : Représentation schématique du réseau hydrographique du Plateau de Saclay	44
Annexe 2 : Représentation schématique de l'occupation du sol du Plateau de Saclay et localisation des principales villes	45
Annexe 3 : Répertoire de l'ensemble des données obtenues	46
Annexe 4 : a) Variations pluviométriques annuelles des pluviomètres du centre du plateau (par météorologique du CEA Saclay, Saclay et Saint-Aubin)	47
Annexe 4 : b) Variations pluviométriques annuelles des pluviomètres à l'Ouest du plateau	48
Annexe 5 : a) Evolution mensuelle des débits dans l'aqueduc des Mineurs	48
Annexe 5 : b) Evolution mensuelle des débits des rivières adjacentes au plateau.....	49
Annexe 5 : c) Evolution mensuelle des débits des rigoles et rus du plateau	50
Annexe 6 : a) Délimitation des bassins versants des stations d'Arcades, de Trou Salé, de Golfy et de l'Yvette	51
Annexe 6 : b) Délimitation des bassins versants de la station de Vauboyen, de l'aqueduc des Mineurs, des rigoles de Saint-Aubin et de Châteaufort, de Favreuse, de Monseigneur et de Cambacérès	51
Annexe 7 : Exemple d'estimation de l'infiltration en sub-surface pour l'année 2013 ($S_y=0,03$)	52

Liste des tableaux

Tableau 1 : Ensemble des acteurs du plateau rencontrés au cours de l'étude	16
Tableau 2 : Volumes d'eau potable apporté au CEA Saclay	22
Tableau 3 : Coefficients de variation des données de débits annuels des stations	25
Tableau 4 : Coefficients de corrélation entre la pluie annuelle et les débits	26
Tableau 5 : Importances relatives des débits semestriels	27
Tableau 6 : Pourcentages d'urbanisation des bassins versants associés aux stations de mesures débimétriques et coefficients de corrélation débits/ETP mensuels.....	27
Tableau 7 : Surface des bassins versants de chaque station débimétrique	28
Tableau 8 : Estimation statistique du S_y en fonction du type de sol	33
Tableau 9 : Estimation de la lame d'eau infiltrée avec $S_y=0,19$	35
Tableau 10 : Estimation de la lame d'eau infiltrée avec $S_y=0,03$	35
Tableau 11 : Détails des résultats de recharge obtenus pour la nappe des Sables	38
Tableau 12 : Diverses estimations de la recharge de la nappe des sables	38
Tableau 13 : Estimation des flux du bilan hydrologique du plateau.....	40

Introduction

Le Plateau de Saclay, considéré comme le territoire naturel le plus proche de la capitale, constitue un élément primordial de la ceinture verte de l'Île de France. Il a été choisi pour accueillir un projet scientifique, économique et urbain de très grande envergure : « le cluster Paris-Saclay » [3]. Ce dernier a pour objectif de réunir les entreprises, enseignements supérieurs et chercheurs scientifiques afin de favoriser leurs coopérations, synergies et de ce fait, donner à la France, un rôle important en termes de croissance économique, d'innovations et de créations d'emplois [3]. Des aménagements très denses sont, par conséquent, en construction dans la zone du Moulon, de Polytechnique et de Satory et ce jusqu'aux environs de 2020 [3].

En parallèle, ce projet a pour objectif de faire du plateau un éco-territoire en instaurant la transition énergétique, en maintenant la trame verte et bleue ou encore en développant des moyens de transport adaptés afin de limiter la pollution [3]. Sur le plan hydrologique et dans le but de limiter les inondations dans les vallées, la gestion de l'eau à l'échelle de la parcelle, du quartier et du plateau est devenu un enjeu majeur pour le cluster [3].

Ce contexte a ainsi, dans le cadre d'un groupe de travail scientifique (chercheurs d'universités, organismes publiques et opérationnels de la gestion des eaux), soulevé de nombreuses réflexions sur le fonctionnement du cycle de l'eau du plateau.

L'objectif principal de cette étude est d'estimer le bilan hydrologique pluriannuel du Plateau péri-urbain de Saclay, qui est à l'heure actuelle mal connu. En effet, seuls quelques éléments d'expertise de ce bilan ont déjà été réalisés à partir de modélisations et d'observations mais restent incomplets et parfois antinomiques. Une approche par observations a été privilégiée pour l'établissement de ce bilan.

Le premier axe de ce mémoire dressera le contexte de l'étude en caractérisant le plateau péri-urbain tant sur les plans géographique, géomorphologique, climatique, pédologique, hydrologique, qu'hydrogéologique. Cette première partie sera aussi consacrée à la définition des bilans hydrologiques et à l'explication de la complexité qui peut en résulter selon les échelles temporelles et spatiales considérées.

L'établissement de ce bilan hydrologique pluriannuel nécessite un ensemble de données conséquentes mais qui ne sont pas toujours accessibles. Il sera donc expliqué en seconde partie la démarche qui a été suivie pour obtenir ces données et pallier ce manque.

Grâce à l'obtention et la synthèse des données hydrologiques et hydrogéologiques disponibles et existantes sur le plateau, une analyse critique et de validation est réalisée en troisième partie. La récupération de l'ensemble des paramètres est aussi l'occasion de comprendre le comportement tant hydrologique qu'hydrogéologique du plateau. C'est pourquoi, une analyse plus approfondie des différents flux constituant ou participant au bilan a été conduite et cela à différentes échelles (pluriannuelle, annuelle, mensuelle ou encore à l'échelle de l'événement pluvieux).

Enfin, l'évaluation du bilan hydrologique du plateau clôtura ce mémoire en quatrième et dernière partie.

1. Contexte de l'étude

1.1. Caractérisation de la zone d'étude : le Plateau péri-urbain de Saclay

1.1.1. Contexte géographique et aspect géomorphologique

Le Plateau de Saclay se situe dans la région de l'Île de France à environ 15 km au Sud-Ouest de Paris (Figure 1) [13]. Plus précisément, il appartient au Nord de l'Essonne (91) et au Sud-Est des Yvelines (78) [2]. Il est encadré par les vallées de la Bièvre au Nord et celles de la Mérantaise et de l'Yvette au Sud (Annexe 1) [1]. La délimitation précise de ce plateau a été réalisée, dans le cadre de ce stage, en fonction des hauts versants. Il s'étend ainsi latéralement de la ville Nouvelle de Saint-Quentin en Yvelines à l'Ouest jusqu'à Palaiseau à l'Est, où les vallées se rapprochent et referment le plateau (Annexe 2) [2]. De plus, à ses bordures, il est surplombé par le plateau septentrional (au Nord de la Bièvre) et méridional (au Sud de l'Yvette) [21].

D'un point de vue géomorphologique, le plateau est légèrement incliné Nord-Ouest Sud-Est et a une pente moyenne très faible, du Sud au Nord, de l'ordre de 1% [10, 21]. Il présente donc une quasi-horizontalité. D'autre part, les altitudes moyennes de cette zone d'étude varient entre 150 et 165 m NGF [10]. Le creusement des vallées entraîne des dénivelés qui varient entre 50 et 100 m d'amont en aval des rivières [21]. Les dénivelés de la Bièvre et de la Mérantaise présentent les amplitudes les plus importantes et ceux de l'Yvette les plus faibles [21]. Enfin, il a une superficie d'approximativement 6800 hectares (soit 68 km²) et s'étend sur 4 à 6.5 km en largeur et 17 km en longueur.

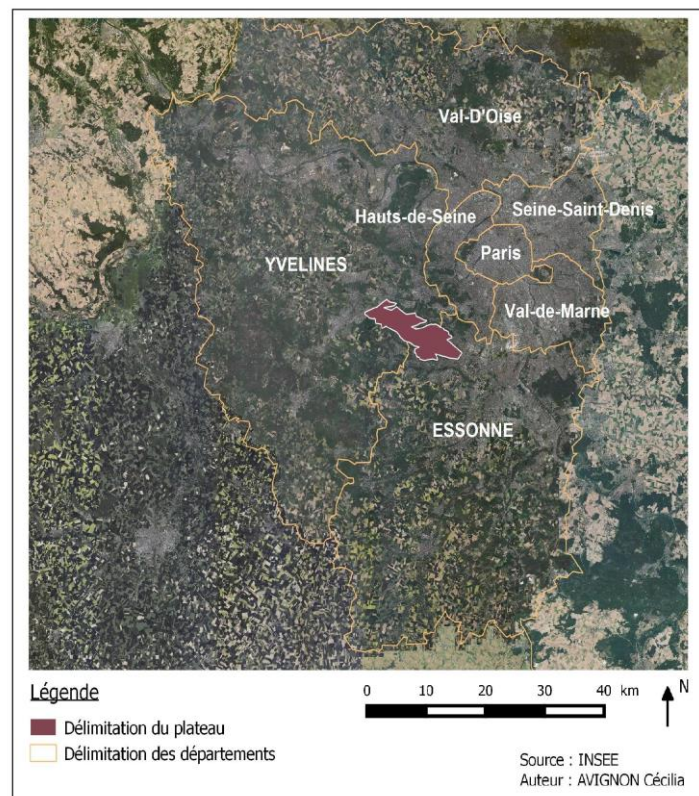


Figure 1 : Localisation du Plateau de Saclay à l'échelle de l'Île de France

1.1.2. Contexte climatique

Les conditions climatiques du Plateau de Saclay sont représentatives d'un climat dit océanique (hivers doux et pluvieux et étés humides et rafraîchis). Plus précisément, nous parlons de climat océanique dégradé car les fortes humidités provenant des bordures océaniques s'atténuent d'Ouest en Est pour faire place à une dominance continentale [10].

En prenant la station météorologique de Trappes comme référence, nous pouvons noter que la température moyenne annuelle relevée de 1981 à 2010 est de 11.2°C avec des moyennes minimales pouvant aller jusqu'à 7.2°C et des maximales à 15.2°C [15]. Les mois les plus froids sont en moyenne ceux de Janvier et Février avec une température moyenne de 1.3°C et le mois le plus chaud est Juillet avec une température moyenne de 24.3°C (Figure 2).

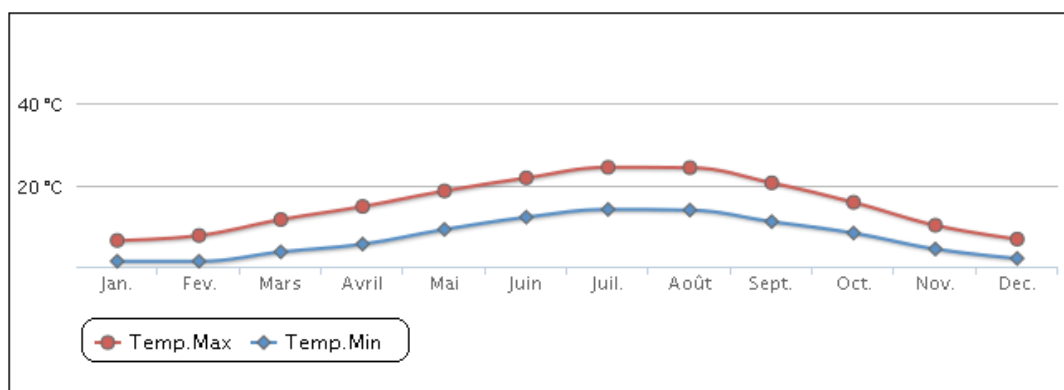


Figure 2 : Températures mensuelles relevées à la station météorologique de Trappes sur 30 ans
(Source : Météo France, 2015 [15])

A la même station météorologique, le relevé des précipitations indique une moyenne de l'ordre de 657 mm/an sur la période 1945-2011. A l'échelle mensuelle, les précipitations restent en moyenne constantes sur l'année. Historiquement, les années 2007 et 2013 ont été répertoriées comme des années très humides où des inondations ont eu lieu. Les années 1971, 1976, 1996 et 2005 sont, quant à elles, caractérisées comme des années très sèches (Figure 3).

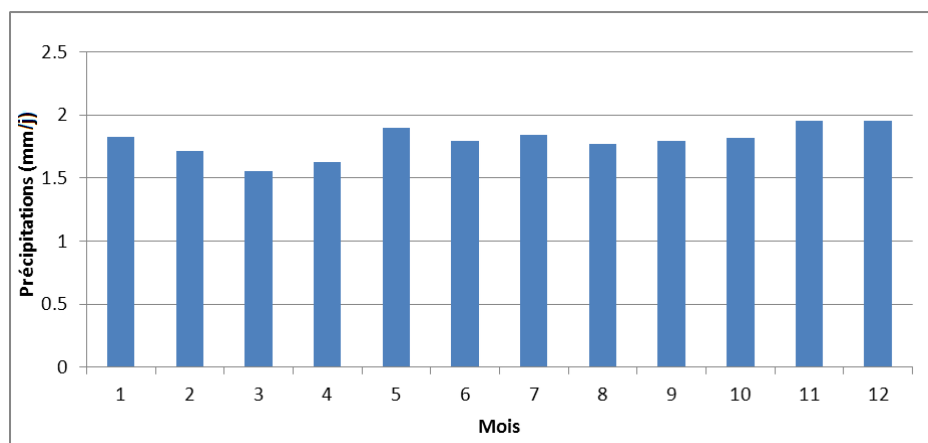


Figure 3 : Précipitations mensuelles moyennes relevées à la station météorologique de Trappes sur 67 ans

1.1.3. Contexte hydrologique et pédologique

Le Plateau de Saclay se trouve sur deux bassins versants : le bassin versant de la Bièvre au Nord et celui de l'Yvette au Sud. Il est occupé en majeure partie par le bassin de la Bièvre (à 77%).

En plus d'être entouré par les 3 rivières que sont la Bièvre, l'Yvette et la Méranthaise - affluent de l'Yvette -, il est l'hôte d'un réseau hydrographique très hétérogène et en grande partie artificiel. En effet, il est constitué d'étangs (étang Vieux et Neuf de Saclay, d'Orsigny, de Villiers, du Trou Salé et du Pré-Clos), de bassins (bassin des Biches, de la Commanderie de Villaroy, du Moulin à Vent, de Sourderie et de l'Ecole Polytechnique), de rigoles (fossés creusés au XVII^{ème} siècle pour permettre le drainage des terres agricoles en direction du château de Versailles), d'aqueducs (aqueducs des Mineurs, de Buc et la Ligne des Puits), de mares ainsi que de bassins de rétention secondaires [1,2].

La figure en Annexe 1 caractérise schématiquement l'ensemble de ce réseau. Comme le montre cette dernière, les eaux de ruissellement du plateau ont pour exutoires principaux les rivières dans les vallées, qui s'écoulent d'Ouest en Est [2].

Les eaux des rigoles de Corbeville, Saint-Aubin et Châteaufort convergent vers le bassin des Biches où elles sont transportées à l'étang Vieux via l'aqueduc des Mineurs [1,18]. Elles sont ensuite acheminées principalement vers l'étang Neuf de Saclay puis redirigées en direction de la Bièvre via le ru de Vauhalla [1]. Depuis l'étang Vieux, une autre partie peut prendre le chemin de l'étang d'Orsigny puis du Trou Salé par la ligne des Puits (succession d'aqueducs enterrés : de Villedombe et du Plessis) [1]. Les eaux étaient ensuite transportées de l'étang du Trou Salé jusqu'aux étangs de Gobert via l'aqueduc et les Arcades de Buc. Cependant l'étang du Trou Salé a disparu en raison d'activités anthropiques et les Arcades et l'aqueduc de Buc ne sont plus fonctionnelles [2]. Les eaux de la Ligne des Puits sont donc transportées au ru de Saint-Marc.

L'étang Vieux est, quant à lui, alimenté par la rigole de Guyancourt et alimente lui-même l'étang Neuf. Ce dernier, en plus d'être alimenté par l'étang Vieux, est aussi approvisionné en eaux par les rigoles des Granges et de Favreux. Dans la partie Ouest du plateau, les eaux des rigoles de Guyancourt se jettent en aval dans l'étang Vieux. En amont, elles sont collectées par le réseau d'eaux pluviales de l'aérodrome de Toussu-le-Noble puis sont rejetées dans le ru de Saint-Marc [1].

Enfin, au Sud du plateau, l'étang de Villiers qui est alimenté par la rigole de Corbeville, se déverse dans le bassin des Biches, qui reçoit lui-même les eaux des rigoles de Châteaufort et de Saint-Aubin [1].

Le réseau de rigoles du plateau n'est pas continu et est constitué de quelques déconnexions qui font que les eaux collectées par les rigoles ne rejoignent pas les étangs et retournent à leurs bassins versants naturels [1]. Ces déconnexions se trouvent dans les rigoles de Corbeville, Saint-Aubin, des Granges et Favreux [1]. Cependant, elles restent rares (Annexe 1).

Anciennement zone marécageuse, le Plateau de Saclay a été fortement modifié à partir du XVII^{ème} siècle [10]. En effet, ce réseau de 200 km de rigoles est la conséquence des exigences du roi Louis XIV [1, 10]. En raison de la localisation du

Château de Versailles, un réseau de collecte des eaux de drainage et de ruissellement de la plaine de Trappes et du Plateau de Saclay a été mis en place pour pouvoir fournir l'eau nécessaire aux fontaines, jeux d'eau et, par la suite, à l'alimentation de la population [10]. Ce réseau de rigoles transportait l'eau vers les étangs Vieux et Neuf de Saclay qui desservaient eux-mêmes les réservoirs du Château via l'aqueduc et les Arcades de Buc [1]. Le plateau a donc, à partir de cette époque, vu la modification de son occupation du sol, qui est devenue agricole comme co-bénéfice souhaité des actions d'assainissement indispensables à réaliser [10]. Il est à ce jour le plus grand espace rural proche de Paris. Cependant, ce réseau de rigoles a manqué d'entretien et s'est dégradé depuis les années 1950. Des projets de restauration ont, par conséquent, été mis en place par les syndicats de la Bièvre et de l'Yvette et sont à l'heure actuelle en cours [3].

La figure en Annexe 2 caractérise en détails l'occupation du sol du plateau. Comme nous pouvons le distinguer, il est constitué de 9% de forêts et milieux semi-naturels, 41% d'espaces agricoles, 48% d'urbanisation (habitats, infrastructures routières, équipements, industries etc.) et de 2% de plans d'eau fermés. L'ensemble de ces zones naturelles est le siège d'une grande diversité écologique (faune et flore) au sein du plateau.

Ce dernier reste, malgré une richesse naturelle et agricole, bien urbanisé et va voir son taux d'urbanisation augmenter au cours des prochaines années en raison des aménagements du cluster Paris Saclay.

1.1.4. [Contexte hydrogéologique](#)

Le Plateau de Saclay est de type sédimentaire. Il est constitué de neuf couches lithologiques qui datent principalement de l'ère tertiaire et qui ont été recouvertes par des dépôts d'origine éolienne (limons de plateaux) datant du Quaternaire [2]. Les fonds et pentes des vallées sont recouverts respectivement d'alluvions de Quaternaire et de colluvions [2].

Des plus récentes aux plus anciennes, ces formations sont les suivantes [10, 21] :

1. **Les limons des plateaux** (0.5-3 m et au maximum 9 m d'épaisseur)
2. **Les formations de Lozère : sables argileux et argiles sableuses** (2-5 m)
3. **Les Argiles à Meulière de Beauce ou de Montmorency** (1-6 m)
4. **Les Meulières de Montmorency** (2-11 m et en moyenne 6 m d'épaisseur)
5. **Les Sables et Grès de Fontainebleau** (30-70 m)
6. **Les Marnes à Huîtres** (2-14 m et en moyenne 7 m d'épaisseur)
7. **Les formations de Brie** (2.5-9 m et en moyenne 3.5 m d'épaisseur)
8. **Les Argiles vertes** (2-11 et en moyenne 6.5 m d'épaisseur)
9. **Les Marnes supragypseuses** (3-18 m et en moyenne 12 m)

Les quatre premières couches sont considérées comme les formations de couverture. Quant aux cinq dernières, celles-ci sont caractéristiques des formations profondes du Bassin Parisien. La Figure 4 schématise l'ensemble de ces formations.

L'ensemble de ces dépôts a des origines (pouvant aller d'éolienne à fluviale, à lacustre etc.) et des épaisseurs différentes qui varient sur le Plateau de Saclay en

fonction de la localisation [21]. L’affleurement de ces couches lithologiques reste aussi assez varié. En effet, les limons affleurent sur tout le plateau, les Sables de Fontainebleau dans les vallées et dans la partie Est du plateau et les Marnes à Huîtres et Argiles Vertes dans les vallées de l’Yvette et de la Mérantaise ainsi qu’à l’Est du plateau [21].

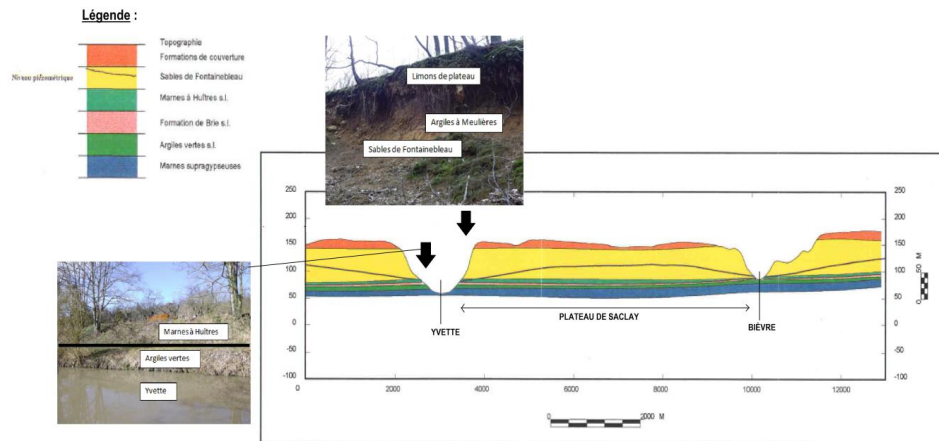


Figure 4 : Représentation schématique de la géologie du plateau (coupe SN)
(Source : Vernoux J.F. et al, 1999 [21])

D’un point de vue hydrogéologique, de nombreuses connaissances ont été acquises sur le plateau. Il est principalement composé de deux nappes qui se superposent : « la nappe » dite superficielle au plus proche de la surface et la nappe des Sables de Fontainebleau située plus en profondeur.

➤ « Nappe » superficielle (lentilles aquifères perchées)

En raison du caractère imperméable des limons et de la topographie du plateau, restant très plane, les eaux de pluies forment des poches d’eaux stagnantes sur celui-ci et percolent lentement à travers les formations de couverture. Le Plateau de Saclay reste donc, en général, très humide. Les eaux qui s’infiltrent au sein des formations de surface (limons de plateau, formations de Lozère, Argiles à Meulière et Meulière de Montmorency) forment un ensemble de lentilles aquifères perchées temporaires [10].

Ces formations de surface ont des perméabilités qui varient entre 10^{-5} et 10^{-8} m/s, ce qui reste très hétérogène et justifie la formation de poches d’eaux irrégulières en discontinuité hydraulique [10, 21]. Elles possèdent aussi une porosité comprise entre 0,1 et 5 %, ce qui reste très faible [21]. L’ensemble de ces réservoirs d’eau a donc des épaisseurs et des extensions très variables qui dépendent du caractère du sol. Cependant, ceux-ci ne sont pas toujours existants. En effet, en été, ces lentilles aquifères perchées ont tendance à s’assécher alors qu’en hiver, elles sont présentes et peuvent parfois affleurer en surface [10]. Cette « nappe » superficielle est donc alimentée à partir de flux verticaux provenant des précipitations et son toit est en moyenne située à 3 m de profondeur [10].

Ces eaux ne sont cependant pas utilisées à des fins anthropiques. Cette « nappe » superficielle sera par la suite nommée par les termes : d’eaux de sub-surface ou niveaux locaux non connectés pour éviter que ces eaux soient considérées comme liées à une seule entité.

➤ Nappe des Sables de Fontainebleau

Les Sables de Fontainebleau sont perméables (6.10^{-5} à 7.10^{-6} m/s) et renferment une nappe aquifère considérée comme libre, de 60 m de puissance dont environ 40 m saturé [21]. Cette dernière est soutenue par des formations imperméables marneuses calcaires et argileuses. Elle possède un coefficient d'emménagement compris entre 10 et 15 % et une transmissivité de $2,6.10^{-4}$ à $8,5.10^{-4}$ m²/s [21].

La nappe des sables de Fontainebleau est alimentée par deux modalités [21] :

1. Infiltrations directes des eaux de pluies au niveau des affleurements,
2. Infiltrations à travers les couches sus-jacentes.

Les eaux s'infiltrant directement aux niveaux des zones d'affleurement, sur les pentes des coteaux périphériques, rejoignent très rapidement les cours d'eau et alimentent peu la nappe en elle-même [21]. Cet aquifère est donc principalement alimenté par les eaux infiltrées à travers les couches superficielles. Cependant, ces dernières étant très épaisses (principalement les Argiles à Meulière), la recharge de la nappe est très lente. En effet, d'après une étude menée par le BRGM, elle a un temps de réaction à un événement pluvieux d'environ un an (sauf dans les zones où l'infiltration est favorisée en raison de l'épaisseur fine des Argiles à Meulière, sous les étangs ou encore dans certains puits au sable construits au sein du Centre d'Etudes de Saclay) [21]. De plus, des drains agricoles ont été mis en place et sont reliés au réseau de rigoles. Cela limite donc l'alimentation de la nappe superficielle et par conséquent celle de la nappe des Sables [10].

La nappe des Sables s'écoule du Nord-Ouest au Sud-Est sur le plateau. Cependant, son écoulement est rapidement conditionné par les vallées adjacentes et alimente, par conséquent, les rivières [21]. Cette influence est, malgré tout, différente au Nord et au Sud. En effet, au Nord, la nappe des Sables de Fontainebleau est en lien direct avec la nappe des alluvions de la Bièvre et alimente cette rivière [21]. Au Sud, au contraire, la nappe des Sables est incisée par la vallée de l'Yvette [21]. Par conséquent, les alluvions se retrouvent sur les Marnes à Huîtres ou Argiles Vertes (Figure 4). La nappe des Sables de Fontainebleau n'est donc pas en continuité hydraulique avec la rivière, d'où la présence de sources prépondérantes dans les vallées de l'Yvette et de la Méranaise.

Il est important d'indiquer qu'il subsiste une autre nappe (la nappe des éboulis et colluvions) qui est présente dans les versants et qui est alimentée par les eaux de sub-surface, des Sables de Fontainebleau ainsi que les eaux de ruissellement [10].

Le niveau piézométrique de cette nappe, qui se situe en dessous du toit des sables, varie lentement au cours du temps et selon la localisation [21]. Le sommet maximal se situe dans la zone où les couches sus-jacentes sont les plus fines (4 à 6 m), à l'Ouest des étangs de Saclay [21]. D'autre part, le substratum imperméable de cette nappe l'éloigne de celles plus en profondeur comme par exemple la nappe du Dogger qui est située à 1500 m de profondeur et peut atteindre jusqu'à 70°C [21]. Enfin, les activités anthropiques (captage des eaux de la nappe des Sables de Fontainebleau par exemple) restent assez faibles sur le plateau.

1.2. Définition des bilans hydrologiques

1.2.1. Cas général

Comme nous le savons, l'eau peut être présente sous trois états différents : liquide solide et gazeux. Elle est continuellement en mouvement et subit en permanence des changements de phase qui entraînent le renouvellement des ressources hydrologiques sur Terre. Le cycle de l'eau est donc un modèle simplifié qui permet de caractériser les transferts d'eau entre les différents réservoirs terrestres [16]. Grâce à une démarche physique et plus particulièrement à un bilan hydrologique sur un système donné, il est possible de schématiser ce cycle à une échelle plus fine que celle de la Terre [4, 16].

Pour pouvoir caractériser correctement ce bilan hydrologique, deux échelles sont à prendre en compte [4, 16]:

- une échelle spatiale : un bassin versant ou un plateau par exemple,
- une échelle temporelle : pouvant aller d'une période pluriannuelle à une année hydrologique, à une saison hydrologique ou encore à un événement pluvieux.

Ce bilan hydrologique repose sur un unique principe : celui de conservation de la masse, lui-même décrit par l'équation de continuité. Cette équation consiste à établir un bilan entre les entrées et sorties en eau d'un système à une échelle temporelle et spatiale clairement définie en amont [4, 9, 16].

La formule la plus couramment utilisée pour un pas de temps x et un espace y est la suivante :

$$P + S_1 - R - ET = S_2$$

$$\Leftrightarrow P + S_1 = R + ET + S_2$$

$$\Leftrightarrow P = R + ET + (S_2 - S_1)$$

$$\Leftrightarrow P = R + ET \pm \Delta S$$

$$\Leftrightarrow ET = V_{\text{entrant}} - V_{\text{sortant}} \pm \Delta S$$

P : précipitations liquides (bruine, pluies etc.) et/ou solides (neige, grêle etc.) (en mm)

R : écoulements transversaux qui correspond à la somme du ruissellement de surface et aux écoulements latéraux souterrains (en mm)

ET : évapotranspiration (en mm),

ΔS : variation du stock d'eau qui correspond principalement à la variation d'eau disponible dans le sous-sol mais aussi parfois en surface (en mm),

S_1 : stock d'eau présent au début du pas de temps x (en mm),

S_2 : stock d'eau présent à la fin du pas de temps pris en compte (en mm). [4]

Plusieurs variables hydrologiques sont donc à prendre en compte pour établir ce bilan hydrologique. Les précipitations, appelées aussi eaux météoriques, constituent le principal apport en eau du sol et subissent différents transports. En effet, une fois qu'elles interceptent l'espace hydrologique concerné, trois processus peuvent se mettre en place : le ruissellement de surface et/ou en thalweg, l'évapotranspiration ou encore l'infiltration dans le sol.

➤ Le ruissellement de surface (run-on) :

En fonction de l'intensité de la pluie, de la perméabilité, de la saturation initiale du sol et de sa topographie, les précipitations peuvent former un excès en eau et s'écouler à la surface. C'est ce que l'on appelle communément le ruissellement de surface.

➤ Le ruissellement en thalweg (run-off) :

C'est l'écoulement de l'eau concentré dans les dépressions naturelles (rivières pérennes ou intermittentes) ou artificielles (rigoles, aqueducs, etc.).

➤ L'évapotranspiration :

Pendant et après un événement pluvieux, une quantité d'eau tombant au sol ou déjà présent dans celui-ci peut être évaporée. Cette quantité varie selon les conditions climatiques (température, vent et ensoleillement), l'humidité et la pression atmosphérique, la composition du sol et la couverture végétale mises en jeu [5]. Deux notions autour du flux d'évapotranspiration nous intéressent particulièrement : l'évapotranspiration réelle (ETR) et potentielle (ETP). L'ETP ne dépendant ni du couvert végétal, ni des conditions de saturation du sol mais seulement de la vitesse du vent, de la température, de l'ensoleillement et de l'humidité relative. Celle-ci correspond à une évapotranspiration calculée où la quantité en eau du sol n'est pas limitante pour le processus [5]. L'ETR, à l'opposé de l'ETP, représente l'évapotranspiration du système en place où l'eau est éventuellement limitée. Elle correspond ainsi à une quantité d'eau exacte pouvant être évapotranspirée et est souvent difficile à déterminer [5]. C'est pourquoi, l'ETP est régulièrement utilisée en contrepartie malgré ces hypothèses. L'ETR peut tout de même être déduite du bilan hydrologique. Dans ce cas, il dépend de la fiabilité des autres paramètres (P, R et ΔS).

➤ L'infiltration :

En parallèle des deux processus précédents, les eaux précipitées et interceptées à la surface peuvent s'infiltrer dans les couches superficielles du sol ainsi que dans les couches plus profondes (on parle généralement de percolation) [16]. Ces deux processus s'effectuent grâce aux forces de gravité et de pression [16]. Il en résulte quatre types d'écoulements :

- Des écoulements verticaux et latéraux de sub-surface,
- Des écoulements verticaux et latéraux souterrains

Les écoulements verticaux de sub-surface sont considérés comme rapides, à la différence des écoulements verticaux souterrains qui restent plus lents [16]. Les écoulements latéraux de sub-surface et souterrains participent, avec le ruissellement, de surface, à l'approvisionnement de la variable R, définie dans le bilan hydrologique ci-dessus.

La variable ΔS résulte de ces processus d'infiltration et de percolation et correspond à la variation du stock d'eau dans le sol, incluant à la fois l'eau mobilisable par les plantes ou évaporables directement et l'eau circulant verticalement plus profondément vers (ou depuis) le toit de la nappe [7]. Cette variable peut donc être

positive (augmentation du contenu en eau dans le sol) ou négative (baisse du contenu en eau dans le sol, baisse de la piézométrie). Ces processus interagissent alternativement mais aussi et surtout simultanément.

Le concept de bilan évolue en fonction du volume de contrôle et de l'échelle de temps. Prenons comme exemple la Figure 5, situation analogue à notre zone d'étude. Nous pouvons remarquer que le bilan hydrologique des eaux de sub-surface (« nappe » superficielle : volume v_1) est différent si on y adjoint la nappe profonde (volume v_2). En effet, dans le premier cas, les entrées sont les précipitations et les sorties : l'évapotranspiration, le ruissellement de surface r' , les écoulements latéraux de sub-surface r'' ainsi que les écoulements verticaux souterrains en direction de la nappe profonde. Dans le second cas, les entrées sont les précipitations et les sorties : l'évapotranspiration, les écoulements transversaux $R (= r' + r'' + r''')$ et la drainance D_1 en sortie de la nappe des Sables. En prenant le volume de contrôle v_1 , seul le processus d'infiltration est considéré alors qu'avec le volume v_2 , les processus d'infiltration et de percolation (permettant la recharge Re de la nappe en profondeur) sont pris en compte dans l'estimation du bilan.

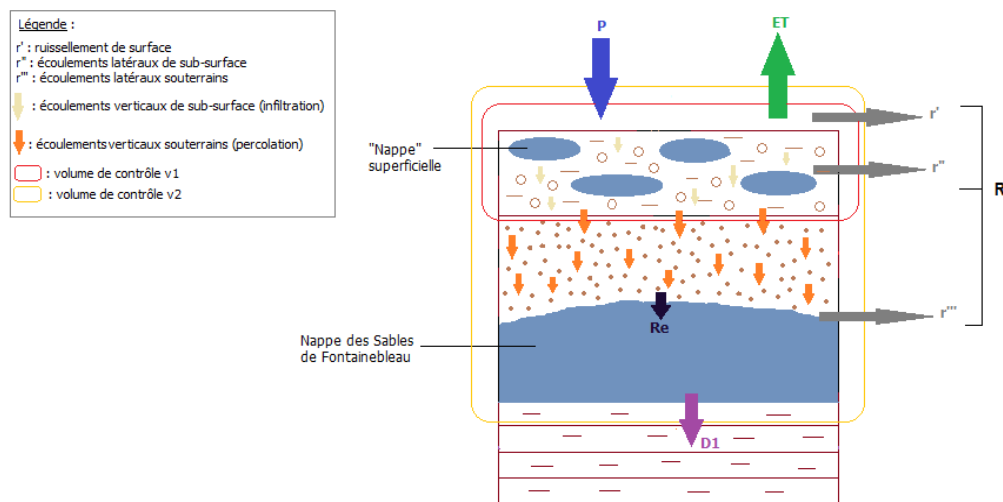


Figure 5 : Représentation des différents flux existants sur le Plateau de Saclay
(L'échelle n'est pas respectée sur la figure)

L'échelle de temps fait aussi varier le bilan hydrologique. En prenant un événement pluvieux (soit une échelle courte), certains flux ont tendance à être négligeables voire inexistants. Par exemple, pour un volume v_2 et un événement pluvieux de quelques jours, la variation de stock ΔS dans la « nappe » superficielle risque d'être importante alors que la recharge Re risque d'être très faible voire nulle pendant la durée de l'événement. Cela est dû à un certain décalage du transfert d'eau entre la surface et à plusieurs mètres de profondeur. Plus la nappe est profonde, plus le temps de transfert risque d'être important. Au contraire, en établissant un bilan sur plusieurs années, le ΔS de la « nappe » superficielle reste cantonné aux fluctuations entre le début et la fin de la période. La recharge de la nappe profonde, quant à elle, ne sera plus nulle puisqu'un laps de temps plus long se sera écoulé.

La caractérisation d'un bilan hydrologique reste cependant laborieuse au vu de la complication d'examiner certains processus hydrologiques et d'évaluer quantitativement certaines variables hydrologiques. La mise en place d'une telle application nécessite donc d'évaluer les incertitudes qui peuvent en découler [16].

1.2.2. Application en contexte péri-urbain

Le Plateau de Saclay est une zone péri-urbaine. Le bilan hydrologique d'un système comme celui-ci doit donc prendre en compte des flux supplémentaires de ceux évoqués précédemment (ET, P, R et ΔS) qui sont naturels (perturbés par le travail du sol et l'imperméabilisation) et qui proviennent uniquement des précipitations. En effet, le plateau est, en plus d'une zone rurale, très urbanisé. C'est pourquoi, il ne faut pas négliger comme flux supplémentaires :

➤ Les apports en eau potable provenant de l'extérieur du plateau (station de traitement de Choisy-le-Roi, de Viry-Châtillon, Morsang-sur-Seine et de Louveciennes) qui alimentent l'ensemble des communes du plateau.

➤ Le transfert des rejets d'eaux usées de chacune des communes du plateau à la station d'épuration de Valenton et Achères. Il existe aussi sur le plateau un ensemble de stations d'épuration privées et industrielles (CEA et CEPr).

Il y a donc un apport supplémentaire à la pluie qui provient des stations d'eau potable à condition que cette eau soit rejetée sur le plateau et non évacuées en dehors. Les privées rejettent leurs eaux traitées par décantation dans les nappes souterraines. Le CEA, quant à lui, reçoit de l'eau potable d'une station extérieure au plateau et en rejette une partie dans les rigoles. Cet apport supplémentaire à la pluie est donc à prendre en compte dans l'estimation du bilan hydrologique et contribue au ruissellement de surface et à l'alimentation des nappes. Enfin, le CEPr capte l'eau de l'étang Neuf, l'utilise, la traite puis la réinjecte. Il n'y a donc pas d'apports supplémentaires en eau potable qui alimente le plateau au niveau du CEPr puisque les eaux utilisées proviennent de l'étang et y sont réinjectées.

➤ les pompages des particuliers (agriculteurs principalement) et des industriels du plateau (CEA, CEPr et Danone). Ceux-ci peuvent modifier l'alimentation des nappes souterraines. L'eau provenant des captages des agriculteurs sert principalement à l'irrigation. Les flux entrants dans la nappe peuvent donc être minimisés puisque une part de l'eau captée peut repartir en ruissellement de surface et ne pas retourner à la nappe. Les pompages des particuliers ne perturbent cependant pas le bilan puisque l'eau captée se retrouve dans les flux r' ou ΔS . Les pompages des industriels servent, quant à eux, à des fins sanitaires ou industrielles (refroidissement de leurs machines par exemple). Ces eaux deviennent usées et peuvent être soit traitées par la station d'épuration du centre et être dirigées dans les rigoles (pour le CEA), être injectée dans l'étang Neuf (pour le CEPr) ou au contraire sortir du plateau pour être traitées par une station d'épuration extérieure (pour Danone). Il y a donc dans les trois cas, une perte en eau des nappes souterraines qui peuvent ne pas retourner à la nappe (CEA et CEPr) ou sortir du plateau (Danone). A noter qu'une partie des eaux libérées dans les rigoles peut aussi s'infiltrer à nouveau dans le sol. Dans le cas du CEA, si l'eau pompée est réinjectée dans les rigoles, le bilan hydrologique n'en sera pas affecté.

L'ensemble de ces activités anthropiques modifie donc les quantités en eau et sont à considérer dans le cadre d'un système péri-urbain.

2. Démarche de travail

Ma démarche de travail s'est organisée autour de trois grands axes :

- La récupération des données utiles pour la compréhension du comportement hydrologique et hydrogéologique du plateau et l'estimation de son bilan hydrologique pluriannuel,
- L'instauration d'hypothèses dues aux données manquantes,
- L'analyse des données obtenues

2.1. Synthèse des données obtenues

Pour pouvoir répondre à nos objectifs, il a été nécessaire de récupérer un ensemble de données auprès de différents organismes publics et industriels du plateau. Le tableau 1 liste l'ensemble des acteurs rencontrés.

Organismes rencontrés	Données obtenues
Cerema (Trappes)	✓
Cerema (Le Bourget)	✓
EPPS ¹	×
CEA Saclay ²	✓
Association Terre & Cité	×
SIABV ³	✓
DDT 91 ⁴	×
ADER ⁵	×
Université Paris-Sud	×
SYB ⁶	×
Agriculteurs du plateau	×
SIABHY ⁷	×
Météo France	✓
CEPr ⁸	×

Cependant, cette phase de récupération de données a aussi été rythmée de rendez-vous auprès de professionnels ayant des informations mais non structurées en base de données. Les témoignages de leurs expériences du plateau ainsi que leurs études faites en amont ont donc aussi été récupérées au cours de ces entretiens.

¹ **EPPS** : Etablissement Public Paris-Saclay

² **CEA** : Centre d'Energie Atomique

³ **SIABV** : Syndicat Intercommunale d'Assainissement de la Vallée de la Bièvre

⁴ **DDT** : Direction Départementale des Territoires

⁵ **ADER** : Association Des Étangs et Rigoles du plateau de Saclay

⁶ **SYB** : Syndicat mixte de l'Yvette et de la Bièvre

⁷ **SIABHY** : Syndicat Intercommunal pour l'Aménagement Hydraulique de la Vallée de l'Yvette

⁸ **CEPr** : Centre d'Essai des Propulseurs

Tableau 1: Ensemble des acteurs du plateau rencontrés au cours de l'étude

L'Annexe 3 répertorie en détails (fournisseurs, types de données et de relevés, échelle spatiale et temporelle etc.) les différentes données obtenues et utiles pour l'estimation du bilan hydrologique pluriannuel du plateau et la compréhension de son comportement hydrologique et hydrogéologique. Comme nous pouvons le remarquer, elles ont des échelles spatiales et temporelles très variables. La Figure 6 schématise la répartition spatiale de l'ensemble de ces points de mesures. Nous pouvons noter que l'emplacement des différents pluviomètres échantillonne régulièrement la pluviométrie moyenne du plateau puisque ceux-ci sont répartis sur l'ensemble de la zone. L'évapotranspiration potentielle, quant à elle, n'a été calculée que par la station météorologique de Trappes. La répartition est donc fortement limitée. D'autre part, l'emplacement des différents points de mesures de débits donne un premier aperçu des flux de la Bièvre, de l'Yvette et de certaines rigoles et rus du plateau. Cependant, cette répartition n'est pas exhaustive car un manque de données important est à noter dans plusieurs rigoles (Des Granges, Guyancourt,

Favreuse, INRA, Corbeville), sur la Mérantaise et en amont de l'Yvette. En revanche, une campagne de mesures hydrologique, mise en œuvre par le bureau d'études Hydratec, est en cours de réalisation depuis décembre 2014 sur une période de 8 à 12 mois. Ces données n'ont cependant pas pu être récupérées en raison de la période trop courte et de la qualité des données (pluies de l'année 2015 faibles (200 mm) entraînant des débits non représentatifs du plateau). Enfin, concernant les données piézométriques récupérées, nous pouvons remarquer que celles-ci sont principalement réparties dans la zone du Moulon (Sud-Est du plateau). Cette distribution n'est donc pas exhaustive et ne couvre qu'une partie de la zone d'étude. Elles donnent cependant un bon premier aperçu des niveaux piézométriques que l'on peut retrouver sur le plateau.

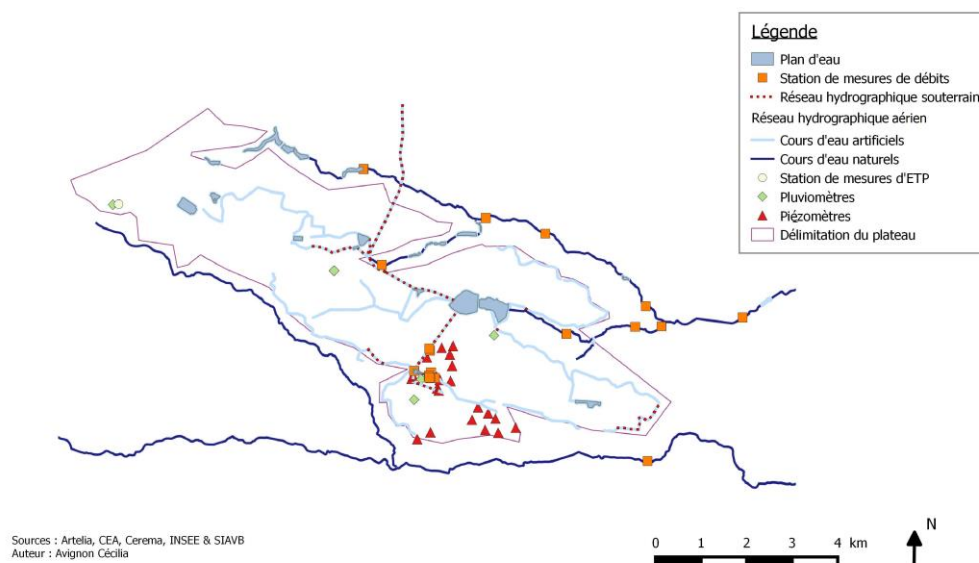


Figure 6 : Localisation de l'ensemble des points de mesures

2.2. Instauration d'hypothèses

Toutes les données nécessaires à l'estimation du bilan hydrologique et à la compréhension du comportement hydrologique et hydrogéologique de notre système péri-urbain n'ont pu être obtenues. En effet, plusieurs paramètres sont soit inexistantes et n'ont jamais été mesurés ou alors la donnée est inaccessible. De ce fait, plusieurs hypothèses plus ou moins fortes ont dû être instaurées pour pallier ce manque et estimer le bilan hydrologique pluriannuel de la manière la plus fiable.

- Les données d'ETR sont difficiles à mesurer. C'est pourquoi, seules des données d'ETP nous ont été fournies. Comme énoncé précédemment, les données d'ETP ont été uniquement mesurées à la station météorologique de Trappes. Nous avons donc émis l'hypothèse que l'ETP de Trappes correspond à la moyenne du plateau entier (hypothèse difficile à évaluer en l'absence de réseau météorologique fourni et pérenne).
- Les données piézométriques ne sont présentes que dans la zone du Moulon. Nous avons donc émis l'hypothèse que la dynamique des nappes souterraines est équivalente sur l'ensemble du plateau comme les sols et les pluies sont en moyenne identiques de part et d'autre de celui-ci (cette notion sera explicitée dans la partie suivante).

- Les données de pompage des particuliers et industriels (CEA, CEPr et Danone) ne sont pas accessibles. Cependant, ceux-ci semblent être négligeables d'après les témoignages des différents acteurs du plateau. Le niveau des nappes ne risque donc pas d'être fortement impacté par ceux-ci. Nous les avons ainsi négligés dans notre bilan pluriannuel final.
- Les apports en eau potable et les rejets en eaux usées du plateau sont des données qui n'ont pu être obtenues au cours de ce stage. Nous avons donc émis l'hypothèse que les entrées en eau potable (qui proviennent de l'extérieur du plateau) et les sorties en eaux usées (vers la station d'épuration en dehors du plateau) sont quasi-équivalentes et se compensent pour une grande majorité des habitations ou en tout cas, que la différence entre les deux est négligeable. Ces termes seront donc négligés dans le bilan final pluriannuel. Cependant, comme expliqué précédemment, il y a sur le plateau des stations d'épuration privées qui rejettent leurs eaux traitées dans le sol. Ces eaux sont donc un apport supplémentaire à la pluie qui n'est pas évacué en dehors du plateau. Cependant, les quantités d'eau rejetées n'ont pu être obtenues. Les habitations du plateau ayant des stations d'épurations restent tout de même rares. Ces quantités seront donc négligées dans le bilan.
- Enfin, les quantités d'eau potable provenant de l'extérieur et utilisées par le CEA nous ont été fournies. Une partie de ces eaux sont, après utilisation sanitaire et/ou industrielle, traitées puis rejetées dans les rigoles. Le bilan doit donc prendre en compte ces usages industriels.

L'ensemble de ces hypothèses sont à prendre avec prudence. En effet, il est plus judicieux de considérer toutes les données nécessaires au bilan et de les limiter au maximum dans le cas où il est possible de les obtenir.

2.3. Méthode d'analyse des données obtenues

Pour pouvoir répondre à nos objectifs de façon la plus fiable possible, il est nécessaire d'appliquer une analyse critique sur l'ensemble des données obtenues. En effet, avant d'utiliser celles-ci, il est primordial de les valider ou au contraire de les exclure si elles semblent erronées. Pour cela, il a été calculé à l'aide de l'outil numérique Scilab, le nombre de lacunes par années et pour chaque paramètre. Il a été considéré qu'à partir de 10 % de lacunes consécutives sur la même année, cette dernière serait exclue des calculs. En effet, l'objectif est de limiter les incertitudes pour avoir des résultats les plus réalistes et crédibles possibles.

D'autre part, grâce à des représentations graphiques via le tableur Excel et l'outil Scilab, la visualisation de certaines données incohérentes était plus aisée. Certaines données ont donc été corrigées ou exclues grâce à des discussions avec les fournisseurs et/ou propriétaires.

Enfin, l'outil de cartographie QGIS Brighton a permis de cartographier la localisation des points de mesures (à partir des systèmes de coordonnées et d'annotations par étiquettes). Cela a permis d'examiner les liens qui peuvent exister entre les différents résultats obtenus et d'en comprendre la signification d'un point de vue hydrologique ou au contraire de repérer des données incohérentes et à exclure de l'étude.

3. Estimation des différents flux du bilan hydrologique

Avant de réaliser le bilan hydrologique pluriannuel du plateau, il est nécessaire d'estimer les flux qui y contribuent et de comprendre en parallèle le comportement hydrologique et hydrogéologique de la zone d'étude.

3.1. Pluies et évapotranspiration potentielle

3.1.1. A l'échelle annuelle

Les pluies ont été mesurées à cinq stations sur des périodes différentes (Annexe 4 a) et b)). La comparaison entre les pluies annuelles des cinq pluviomètres montre une forte concordance entre ceux-ci et rend la mesure fortement fiable. L'Annexe 4 montre que les pluies annuelles sont fortement corrélées temporellement d'Ouest en Est sur le plateau. La moyenne des pluies de 1945 à 2014 sur les cinq pluviomètres est de 663 mm/an. Selon la période de relevés des pluies (qui est différente selon le pluviomètre), celles-ci varient en moyenne entre 659 et 707 mm/an (Annexe 4 a) et b)). Cela est cohérent avec le contexte climatique décrit précédemment par un seul pluviomètre. De plus, les témoignages des acteurs du Plateau de Saclay vont dans le sens d'une homogénéité des caractéristiques des pluies (par exemple, il a pu être constaté une même adéquation des pluies aux cultures).

Les données d'ETP fournies sur 63 ans par Météo France sont les ETP de Penman Monteith calculés à partir d'observations (températures, vitesse du vent, rayonnement global, durée d'insolation et tension de vapeur). Elles sont assez variables d'une année à l'autre (Figure 7) et semblent avoir légèrement augmenté depuis les années 1952. Nous notons une évapotranspiration potentielle moyenne de 728 mm/an avec un maximum pour l'année 2003 (927.8 mm) et un minimum pour l'année 1963 (562.8 mm). Ces données, tout comme les pluies, sont cohérentes avec les témoignages que nous avons récoltés lors des entretiens.

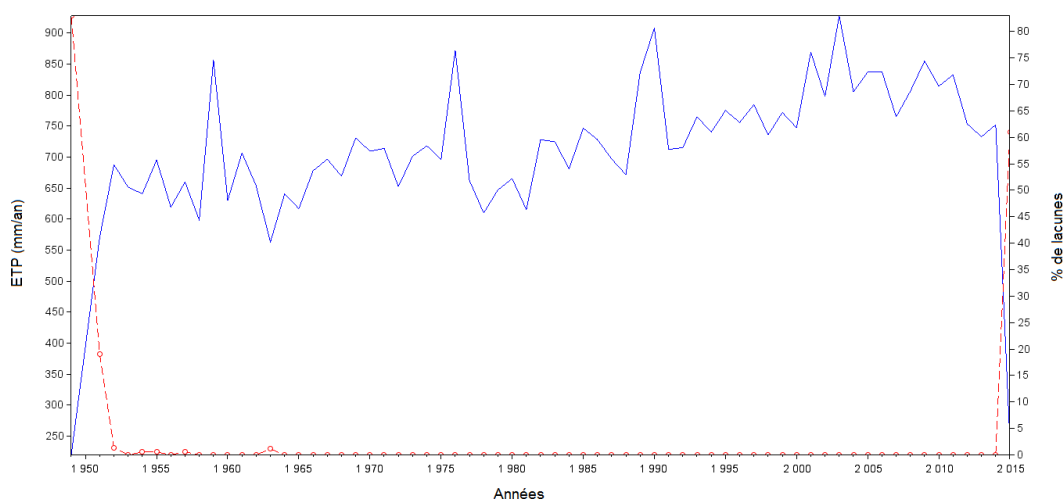


Figure 7 : Variation annuelle de l'ETP Penman Monteith sur 63 ans

Les données de pluies et d'ETP ont donc été retenues.

Les étangs Vieux et Neuf de Saclay sont au centre du plateau et représentent une superficie importante (70 ha). L'évaporation de ces étangs n'a cependant jamais été

mesurée. La seule information qui nous a été rapportée est que le lac peut évaporer jusqu'à 5 cm pour une semaine de forte chaleur. Cette évaporation dépend de nombreux facteurs et est difficile à estimer précisément. A partir de la formule suivante, nous avons estimé l'évaporation des étangs Vieux et Neuf de Saclay dont les superficies sont de 37 et de 33 hectares respectivement :

$$\text{perte (m3/an)} = \text{ETP} \times S_{\text{étang}} \times K_c$$

K_c est un coefficient spécifique aux lacs. Il permet de corriger l'ETP journalière et d'estimer l'évaporation des étendues d'eau dans son contexte topographique, bathymétrique et végétal [17]. Il existe différentes valeurs pouvant aller de 0.65 à 1.25 [17]. Lorsque le coefficient est inférieur à 1, cela correspond à un lac dit « froid » ayant une grande inertie et étant protégé par ses alentours. La valeur maximale, quant à elle, correspond à un lac dit « noir » et sans obstacle en pourtour atténuant le vent [17]. Dans notre cas, il a été approximé à 1.05 et correspond à des lacs dont la profondeur est inférieure à 5 mètres. Les résultats obtenus sont les suivants :

- Étang vieux : $2,8 \cdot 10^5$ m3/an soit 857.8 mm/an,
- Étang neuf : $2,5 \cdot 10^5$ m3/an soit 765 mm/an,

Cela reste une approche très simplifiée qui nous permet d'avoir un ordre de grandeur. Cette mesure est donc à prendre avec prudence car l'évaporation des lacs n'est pas universelle à toutes les étendues d'eau et n'est souvent valable que localement.

3.1.2. Répartition mensuelle

D'après la Figure 8, la pluviométrie mensuelle est bien répartie dans l'année. Il pleut autant en hiver/automne qu'au printemps/été. Cette moyenne a été faite sur 70 ans (1945-2014) à partir des données de cinq pluviomètres, ce qui rend le résultat représentatif. La variation d'ETP mensuelle (calculée sur 65 ans) montre, quant à elle, une évolution qui correspond fortement au climat océanique dégradé avec un maximum en été (Juillet) et un minimum en hiver (Décembre). Les pluies sont donc inférieures aux ETP de Mars à Septembre et supérieures sur le reste de l'année.

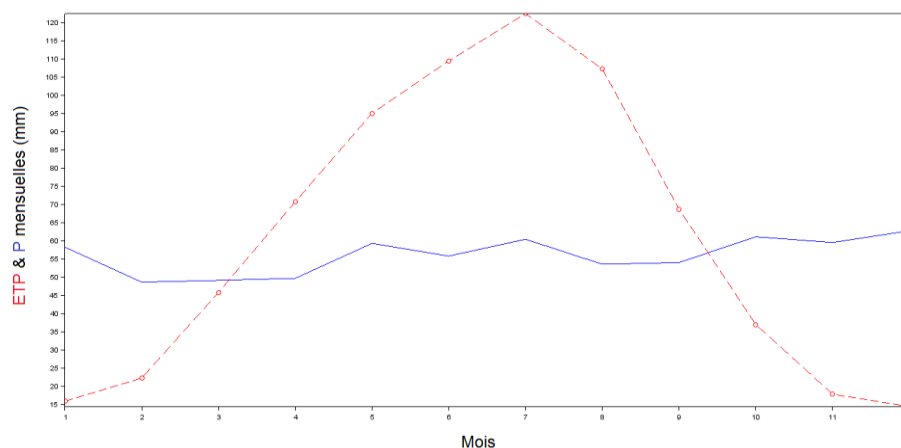


Figure 8 : Évolution mensuelle des évapotranspirations à la station de Trappes et des précipitations moyennes du plateau

3.2. Ecoulements dans les rivières, rus et rigoles

A partir des relevés débitimétriques répartis sur les rivières, rus et rigoles, l'objectif est de comprendre le comportement hydrologique du plateau à différentes échelles (pluriannuelle, annuelle et mensuelle). Les écoulements estimés à l'échelle pluriannuelle (et l'indicateur coefficient d'écoulement, rapport des écoulements sur la pluie) contribueront, par la suite, à l'estimation du bilan hydrologique final du plateau.

Le CEA Saclay a un rôle important sur le plateau et contribue fortement aux écoulements dans l'aqueduc des Mineurs. C'est pourquoi, avant d'analyser les relevés débitimétriques, il est nécessaire de comprendre le fonctionnement de ce centre industriel.

3.2.1. Contribution du CEA Saclay

La figure 9 ci-dessous illustre le fonctionnement interne et externe du CEA Saclay.

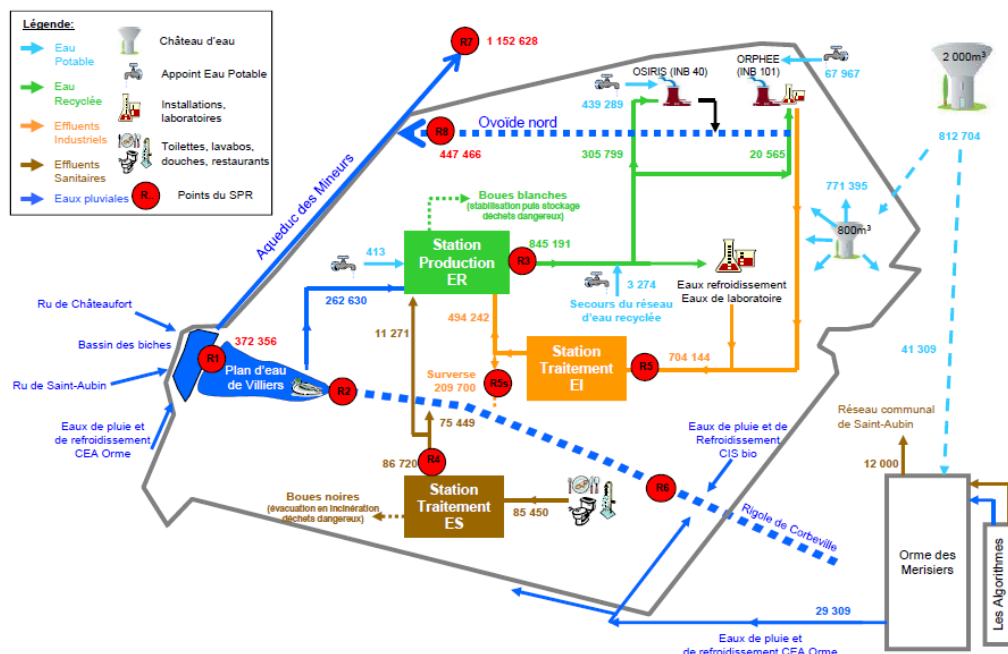


Figure 9 : Fonctionnement du CEA Saclay (exemple pour l'année 2014)

(Source : CEA Saclay, 2014 [6])

Le centre industriel a un réseau complexe. Il est constitué de différents types de fluides :

- effluents industriels et sanitaires,
- eaux pluviales et de refroidissement,
- eaux potables qui proviennent d'une station extérieure et qui peuvent devenir des effluents industriels et sanitaires,
- eaux recyclées qui peuvent devenir des effluents industriels.

Ces eaux sont utilisées à des fins de recherches ou de vie. Le CEA dispose de son propre réseau de distribution d'eaux potables et d'eaux recyclées et est constitué de stations de traitement qui s'occupent des effluents sanitaires et industriels [18]. Les eaux pluviales, quant à elles, ne sont pas traitées et alimentent directement les

rigoles [18]. Elles sont mélangées aux eaux de refroidissement qui proviennent de l'Orme des Merisiers [6]. Les eaux provenant de l'Orme des Merisiers sont soit acheminées vers la rigole de Corbeville, soit vers le bassin des Biches situé à l'Ouest du Centre [6]. En sortie de celui-ci, les eaux du bassin des Biches (alimentés par les rigoles de Saint-Aubin, Châteaufort et des eaux pluviales et de refroidissement du CEA Orme) et de l'Ovoïde Nord (alimenté lui-même par Osiris et les eaux pluviales) sont transportées à l'aqueduc des Mineurs qui se déverse dans l'étang Vieux de Saclay [6]. Les eaux de l'aqueduc des Mineurs sont donc dépendantes des eaux pluviales et des eaux internes au CEA. Ce dernier, par sa taille et son entretien ne peut pas évacuer plus d'1 m³/s avant engorgement. Le CEA Saclay est donc conditionné par des apports purement « naturels » externes et internes (provenant des pluies) et des apports d'eau potable externes.

Ce centre industriel est équipé d'un réseau de mesures de débits journalier de 2004 à 2012 et horaire de 2013 à 2014. L'emplacement des points de mesures est indiqué par les points SPR de la figure 9. A partir de ces différents flux, il est possible de déterminer les apports des rigoles de Saint-Aubin et de Châteaufort.

D'après la Figure 9 :

$$R7 = R8 + R1 + R_r + O_2$$

$$\Leftrightarrow R_r = R7 - R8 - R1 - O_2$$

R_r : volumes d'eau apportés par les rigoles de Saint-Aubin et de Châteaufort

O_2 : eaux de pluies et de refroidissement du CEA Orme

D'après les témoignages d'un agent du CEA, les apports d'eaux pluviales et de refroidissement du CEA Orme sont négligeables par rapport aux autres volumes. La quantification de ce paramètre étant inconnu, nous avons dû le négliger. Les apports des rigoles ont donc été estimés à partir de la formule suivante :

$$R_r = R7 - R8 - R1$$

Seuls des volumes combinés des eaux des rigoles de Saint-Aubin et de Châteaufort ont donc pu être obtenus avec les données fournies.

Comme énoncé précédemment, les apports en eaux potables pour le CEA Saclay ont pu être quantifiés. Les volumes d'eaux potables ont pu être obtenus sur les années 2012, 2013 et 2014 (Tableau 2).

Années	Volumes d'eau apportés (m3)	Volumes d'eau apportés (mm/plateau)	Volume relatif à la pluie du plateau (%)
2012	811 179	11.93	1.57
2013	763 836	11.23	1.48
2014	812 704	11.95	1.53

Tableau 2 : Volumes d'eau potable apporté au CEA Saclay

En moyenne ces volumes d'eau correspondent à seulement 1.5 % de la pluie du plateau. Ces apports en eau potable restent donc assez faibles à l'échelle du plateau. Cependant, ils restent indispensables pour le fonctionnement du centre industriel.

3.2.2. Etude débitimétrique

3.2.2.1. A l'échelle pluriannuelle

L'étude pluriannuelle des débits a pour objectif de caractériser les grandes familles débitimétriques qu'il existe sur la zone d'étude et de valider ou d'exclure certaines stations dont les données semblent incohérentes. Ces débits ont été mesurés par un système de gestion automatisé à la fréquence horaire, journalière ou toutes les cinq minutes (selon les fournisseurs).

La Figure 10 caractérise les débits pluriannuels de chacune des stations. Ils ont été calculés sur l'ensemble des années disponibles (10 à 15 ans selon les stations). Ils permettent d'avoir une vision globale et quantifiable du comportement hydrologique qu'il existe depuis plusieurs années.

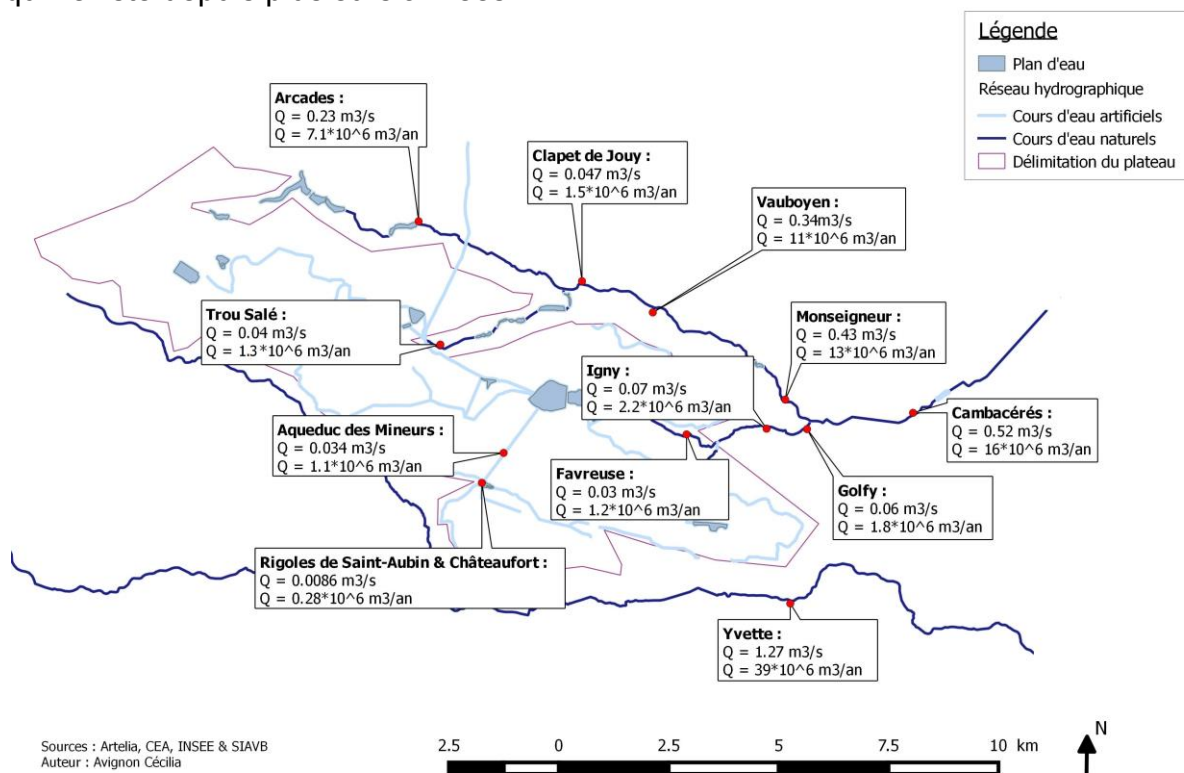


Figure 10 : Débits pluriannuels de l'ensemble des stations du plateau

Les débits du plateau sont très hétérogènes. Nous retrouvons deux grandes familles : les débits faibles des rigoles et des rus et ceux des rivières adjacentes au plateau qui sont plus importants. Cependant, des différences subsistent au sein des familles.

Tout d'abord, les rivières qui entourent le plateau ont de forts débits mais qui restent très différents. En effet, le débit de l'Yvette est 2,5 fois plus important que celui de la Bièvre en aval (station Cambacérés). L'ensemble des stations de la Bièvre (Arcades, Vauboyen, Monseigneur et Cambacérés) montre une forte cohérence : les débits augmentent d'amont en aval et sont homogènes. Cependant, la station Clapet de Jouy a un débit moyen pluriannuel incohérent et très faible par rapport aux stations voisines. Après de multiples vérifications de données, cette station a été exclue et n'a pas été prise en compte en raison de trop fortes incertitudes de valeurs.

De plus, que ce soit à l'Ouest ou à l'Est du plateau, nous pouvons remarquer une forte cohérence entre les débits pluriannuels des rus qui sont de l'ordre de $0.03 \text{ m}^3/\text{s}$ à $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$. Cependant, nous pouvons noter une certaine incohérence entre les débits moyens pluriannuels des stations Golfy et Igny. L'analyse détaillée des données d'Igny a montré quelques incohérences internes (corrélations avec les débits de Favreuse et Golfy pas toujours respectée alors qu'ils le sont entre eux, valeurs parfois aberrantes etc.). Cette dernière a donc été exclue du jeu de données. Le débit pluriannuel des rigoles de Saint-Aubin et de Châteaufort, quant à lui, reste le plus faible du plateau. Cela peut être expliqué par une faible pente qui limite les vitesses d'écoulement des eaux. Enfin, le débit dans l'aqueduc des Mineurs plus important que celui des rigoles de Saint-Aubin et Châteaufort montre clairement l'impact qu'a le CEA en apportant des volumes d'eaux supplémentaires.

Comme nous pouvons le remarquer, les mesures de débits manquent dans certaines rigoles et auraient été utiles pour une compréhension plus fine de la dynamique hydrologique du plateau.

3.2.2.2. A l'échelle annuelle

L'étude débitométrique pluriannuelle ne permet pas d'observer les variations annuelles qui peuvent subsister au sein d'une même station. L'analyse à l'échelle annuelle permet donc d'étudier la dispersion des débits sur plusieurs années et de comprendre pourquoi ces débits évoluent d'une année à l'autre à une même station.

La dispersion de ces débits peut être illustrée à partir de boîtes à moustaches (Figure 11 et Figure 12). Celles-ci permettent de confirmer les deux grandes familles qui ont été distinguées précédemment. Ces diagrammes montrent aussi que les dispersions sont très variables selon la localisation.

Par la suite et pour faciliter la lecture, les différentes stations seront nommées de la manière suivante : par exemple Bièvre 1 pour la station en amont (Arcades) et Bièvre 4 pour la station en aval (Cambacérés). Cette nomination sera aussi effectuée pour les rus et rigoles.

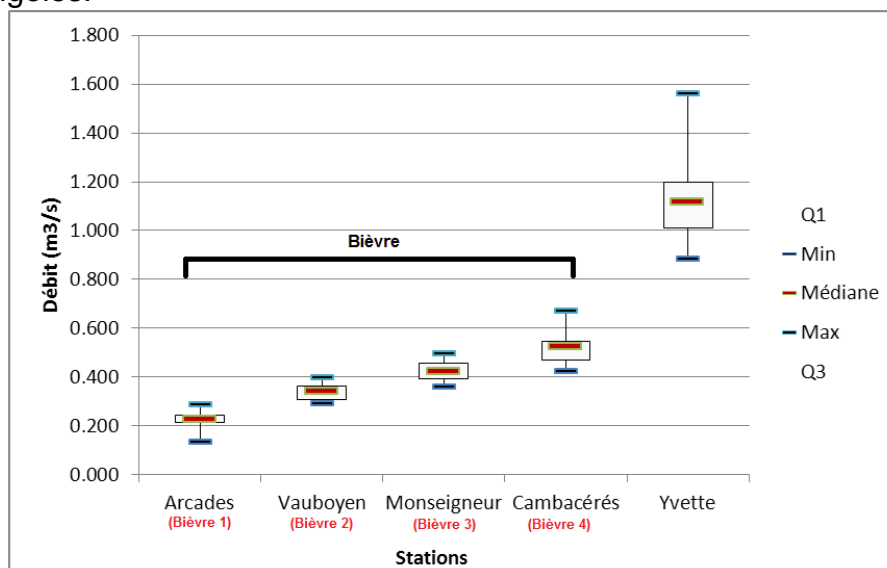


Figure 11 : Diagramme à moustache des stations sur les rivières

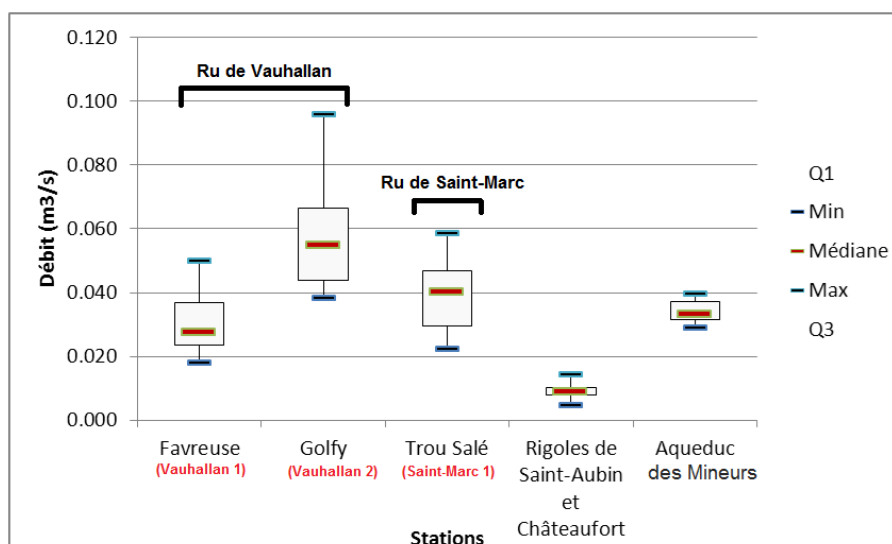


Figure 12 : Diagramme à moustache des stations sur les rigoles et rus du plateau

Ces dispersions peuvent être quantifiées à partir de coefficients de variations (Tableau 3).

Stations	Ecart-type	Moyenne	Coefficient de variation (%)
Bièvre 1	0.03	0.241	12.5
Bièvre 2	0.034	0.341	10.1
Bièvre 3	0.043	0.43	9.9
Bièvre 4	0.069	0.511	13.4
Vauhallan 1	0.01	0.032	29.8
Vauhallan 2	0.019	0.062	30.1
Saint-Marc 1	0.010	0.040	26.1
Rigoles de Saint-Aubin et de Châteaufort	0.003	0.009	33.8
Aqueduc des Mineurs	0.004	0.034	12.3
Yvette	0.195	1.182	16.5

Tableau 3 : Coefficients de variation des données de débits annuels des stations

Ces derniers sont le rapport entre l'écart-type et la moyenne et sont exprimés en pourcentage. Ils donnent une mesure de la dispersion des données autour de la moyenne et permettent de comparer les degrés de variation d'une station à une autre. Ainsi, plus le coefficient de variation est grand, plus la dispersion autour de la moyenne est importante. Ce qui signifie que les débits ont tendance à beaucoup varier d'une année à l'autre.

Les coefficients de variation de chacune des stations ont été calculés sur les mêmes années. Ils montrent une dispersion non négligeable qui est plus ou moins forte selon les stations. Nous pouvons noter plusieurs grandes familles :

- Des coefficients de variation assez forts sur le plateau (rigoles de Saint-Aubin et Châteaufort) et dans les rus de Vauhallan et de Saint-Marc (Trou Salé, Favreuse et Golfy) de l'ordre des 30%,
- Des coefficients de variation moyens de l'ordre des 12 % en amont et aval des rivières (Arcades, Cambacérés et Yvette),

- Des coefficients de variation faibles de l'ordre des 10 % en sortie d'affluents de la Bièvre (Vauboyen et Monseigneur) et en sortie du CEA Saclay.

Ces résultats suggèrent donc que les eaux des rigoles et rus du plateau ont des comportements plus variables (mise à part pour l'aqueduc des Mineurs qui est alimenté par le CEA et qui semble avoir une activité régulière) que dans les rivières.

Ces variations débitométriques ont pour cause principale les variations pluviométriques, modulées par des spécificités locales. Pour tester l'importance de la responsabilité de la pluie, les coefficients de corrélation entre les pluies et les débits de chacune des stations ont été calculés (sur les années en commun pluies-débits) et sont répertoriés dans le Tableau 4. Ces coefficients ont des valeurs significatives (≥ 0.5) sur la moitié des stations. L'aqueduc des Mineurs n'est pas entièrement alimenté par les eaux pluviales. Son coefficient de corrélation avec la pluie en est, par conséquent, justifié. Enfin, les valeurs de Bièvre 2 et Bièvre 3 (tout comme les rigoles de Saint-Aubin, de Châteaufort et sur le ru de Saint-Marc au Trou Salé) sont cohérentes entre elles mais plus faibles que la normale. Des incertitudes de mesures, entre autres hypothèses, ne sont donc pas à négliger et peuvent impacter ces coefficients de corrélation pluies-débits. Des corrélogrammes temporels, éventuellement opérés sur des moyennes glissantes pour tenir compte d'une inertie, pourraient éclairer la faiblesse des corrélations observées, mais ces démarches n'ont pas été réalisées faute de temps.

Stations	Coefficient de corrélation P-Q annuel
Bièvre 1	0.71
Bièvre 2	0.43
Bièvre 3	0.42
Bièvre 4	0.50
Vauhalla 1	0.73
Vauhalla 2	0.68
Saint-Marc 1	0.41
Rigoles de Saint-Aubin et de Châteaufort	0.42
Aqueduc des Mineurs	0.43
Yvette	0.81

Tableau 4 : Coefficients de corrélation entre la pluie annuelle et les débits

3.2.2.3. A l'échelle mensuelle

L'analyse mensuelle des débits a pour objectif de comprendre le comportement hydrologique du plateau à plus petite échelle. En effet, à l'échelle annuelle, les variations et différences interannuelles qui peuvent subsister, ont tendance à être « gommées ».

Les Annexes 5 a), b) et c) schématisent les évolutions mensuelles des débits pour certaines des stations. Vauboyen, Monseigneur et Cambacérès (Bièvre 2, 3 et 4) étant très proches et ayant des évolutions identiques, seule celle de Cambacérès est schématisée en Annexe 5 b). De même pour les stations Favreuse et Golfy (Vauhalla 1 et 2) qui ont des évolutions très similaires. Seule Favreuse est représentée en Annexe 5 c). Celles-ci ont été calculées sur le nombre d'années disponibles en excluant les années lacunaires d'au moins 10%. Ces graphiques montrent tout d'abord que les débits automne/hiver sont plus importants que ceux de printemps/été. Le tableau 5 quantifie ces valeurs.

Stations	Pourcentage de débits en hiver/automne	Pourcentage de débits en été/printemps
Bièvre 1	52	48
Bièvre 2	57.2	42.8
Bièvre 3	57.1	42.9
Bièvre 4	57.8	42.2
Vauhalla 1	67.8	32.2
Vauhalla 2	64.8	35.2
Saint-Marc 1	65.3	34.7
Rigoles de Saint-Aubin et de Châteaufort	62.4	37.6
Aqueduc des Mineurs	57.1	42.9
Yvette	59.1	40.9

Tableau 5 : Importances relatives des débits semestriels

L'analyse mensuelle des pluies a montré que celles-ci sont globalement constantes au cours de l'année. L'évolution des débits mensuels ne peut donc pas être expliquée par l'évolution pluviométrique comme à l'échelle annuelle. Un autre facteur explicatif est donc la cause de ces variations interannuelles de débits.

Comme il a été vu précédemment, l'évapotranspiration est plus importante au printemps/été qu'en automne/hiver. Les sols, qui alimentent les rigoles, ont donc tendance à être plus saturés en hiver. Nous supposons donc que l'occupation du sol des bassins versants associés aux stations de mesures a un rôle sur les variations mensuelles des débits. En effet, si le bassin versant est très urbanisé, la variation des débits aura tendance à avoir une composante saisonnière (débits forts en hiver et faibles en été) moins marquée qu'un bassin versant qui est alimenté par les rigoles qui sont elles-mêmes en lien avec les eaux de sub-surface (lentilles aquifères perchées).

Le Tableau 6 répertorie les taux d'urbanisation de chacun des bassins versants des points de mesures débitométriques ainsi que les coefficients de corrélation entre l'ETP et les débits. Ces coefficients de corrélation sont négatifs, incarnant par-là, la baisse des débits induits par une ETP croissante. Une forte valeur absolue indique un contrôle important des débits par l'ETP, en particulier pour les rivières aux débits saisonniers contrastés.

Stations	Taux d'urbanisation (%)	Coefficient de corrélation ETP-Q
Bièvre 1	47.5	-0.14
Bièvre 2	37.1	-0.62
Bièvre 3	36.3	-0.53
Bièvre 4	37	-0.59
Vauhalla 1	18.1	-0.53
Vauhalla 2	23.8	-0.54
Saint-Marc 1	17.2	-0.61
Rigoles de Saint-Aubin et de Châteaufort	11.1	-0.52
Aqueduc des Mineurs	14.3	-0.51
Yvette	19	-0.7

Tableau 6 : Pourcentages d'urbanisation des bassins versants associés aux stations de mesures débitométriques et coefficients de corrélation débits/ETP mensuels

D'après les graphiques en Annexe 5, seule la station Arcades (Bièvre 1) semble avoir une composante saisonnière beaucoup moins marquée que les autres stations. Cela est confirmé par les résultats obtenus en Tableau 5 et Tableau 6. En effet, le taux d'urbanisation du bassin versant étant fort, les débits hivernaux et estivaux ne sont pas très différents puisque le tampon des sols et la reprise évaporatoire interviennent peu. Le reste des stations, quant à elles, ont des composantes saisonnières plutôt bien marquées.

Ces variations mensuelles de débit laissent donc suggérer une composante saisonnière dépendante des liens avec les eaux de sub-surface (« nappe » superficielle) et avec le taux d'urbanisation du bassin versant drainé.

Cependant, les taux d'urbanisation n'ont pas de relations linéaires avec les coefficients de corrélation ETP-Q. Cela peut provenir principalement, outre d'incertitudes de mesures toujours possibles, de la répartition de l'urbanisation (concentrée ou non). Par exemple, le bassin versant de la station Bièvre 2 a un taux d'urbanisation qui n'est pas négligeable. Cependant, cette urbanisation reste concentrée et la station est alimentée par les eaux des rigoles de Guyancourt, de l'Inra et par le ru de Saint-Marc. Le coefficient de corrélation reste donc important malgré une urbanisation significative.

3.2.3. Estimation des coefficients d'écoulements pluriannuels

Le coefficient d'écoulement représente le ratio entre la lame d'eau qui s'écoule de manière concentrée (thalwegs, rigoles, aqueducs, etc.) et la quantité d'eau précipitée sur une période et un bassin donné. Il est fortement influencé par l'imperméabilisation des surfaces, la pente ou encore la fréquence des pluies. Ce concept de coefficient d'écoulement implique que l'eau peut provenir (en plus des précipitations) de réserves souterraines ou encore des pluies précédant la période d'étude. Cela dépend de l'échelle de temps considérée.

A partir des données en commun de pluies et de débits relevés à chaque station, ces coefficients d'écoulement pluriannuels ont pu être estimés (Figure 13). Les données de débits ont été transformées en lame d'eau (en mm) à partir des surfaces des bassins versants (Tableau 7) de chacune des stations (Annexes 6 a) et b) schématise l'ensemble des bassins versants).

Stations	Surface du bassin versant drainé (m ²)	Coefficient d'écoulement (%)
Bièvre 1	3,6.10 ⁷	29
Bièvre 2	6,6.10 ⁷	24
Bièvre 3	7,7.10 ⁷	26
Bièvre 4	1,0.10 ⁸	24
Vauhalla 1	3,1.10 ⁷	4
Vauhalla 2	5,8.10 ⁷	8
Saint-Marc 1	1,1.10 ⁷	16
Rigoles de Saint-Aubin et Châteaufort	5,0.10 ⁶	8
Aqueduc des Mineurs	8,2.10 ⁶	20
Yvette	2,3.10 ⁸	25

Tableau 7 : Surface des bassins versants de chaque station débimétrique

Les pluies, quant à elles, correspondent aux précipitations moyennes journalières des cinq stations. Nous avons fait l'hypothèse que les pluies sont équivalentes sur l'ensemble des bassins versants de chacune des stations, ce qui reste une hypothèse viable au vue des données de pluies étudiées précédemment.

La Figure 13 montre une hétérogénéité des coefficients d'écoulement du plateau et des rivières. Les coefficients les plus importants se trouvent en aval dans les vallées de la Bièvre et de l'Yvette, où ils sont presque égaux autour de 25%. Ces valeurs relativement élevées sont sans doute dues aux secteurs urbanisés qui sont dans les vallées et à l'Ouest du plateau (la station Bièvre 1 possède le coefficient le plus élevé car elle draine la ville nouvelle de Saint-Quentin). D'autre part, comme vu précédemment, les eaux des nappes du plateau alimentent les rivières dans les vallées. Une contribution de ces eaux est donc aussi prise en compte dans les valeurs. D'autre part, les coefficients d'écoulement sur le plateau sont plus variables, et significativement plus faibles (<10%) en raison de la modération des pentes et de l'urbanisation, avec pour exceptions notables ceux de l'aqueduc des Mineurs (imperméabilisation du bassin versant non négligeable et surtout apport artificiel du CEA) et du Trou Salé (Saint-Marc 1) donc les impluviums sont fortement imperméabilisés (ce dernier au niveau de l'aérodrome de Toussu-le-Noble). Enfin, les coefficients d'écoulement du reste du plateau peuvent être justifié par des taux d'urbanisation et des pentes assez faibles.

Les résultats sont influencés par la combinaison de plusieurs facteurs (taux d'urbanisation et répartition de celle-ci, pente etc.). Il n'y a donc pas de relation linéaire entre l'urbanisation, la pente et les coefficients d'écoulement. De plus, des incertitudes de mesure et de calcul peuvent subsister.

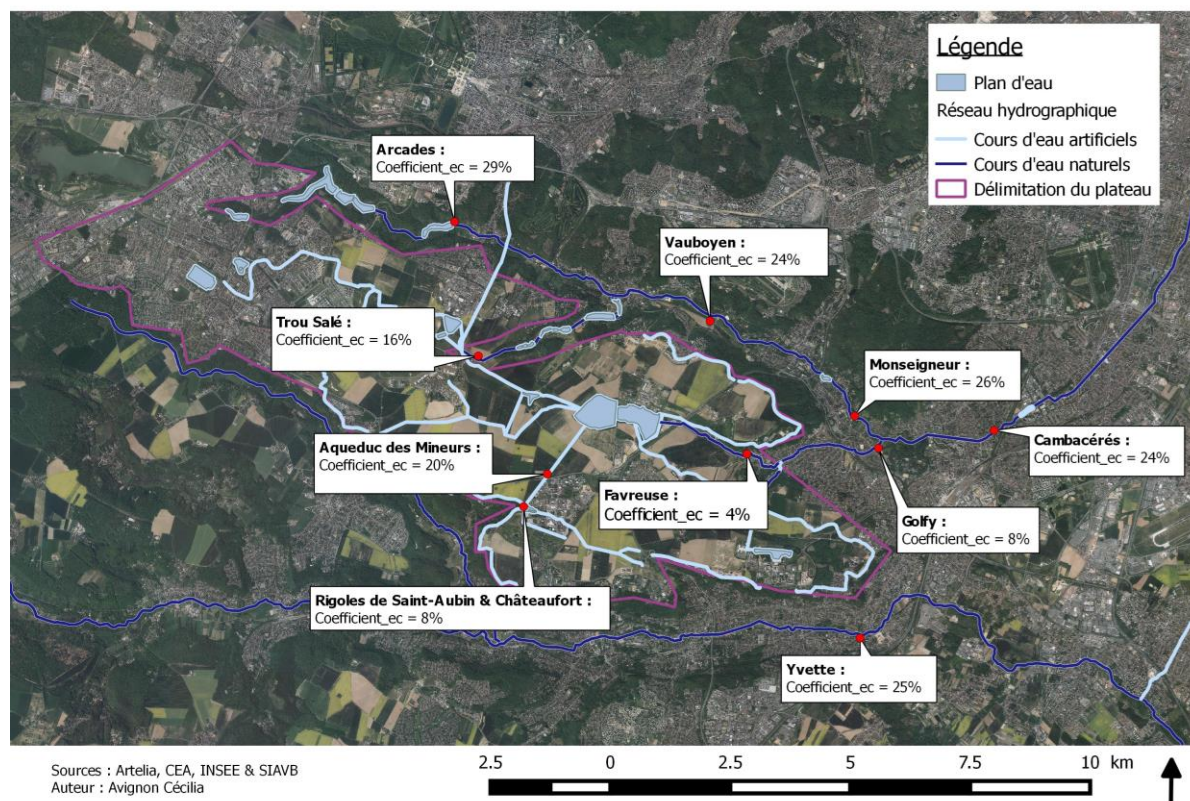
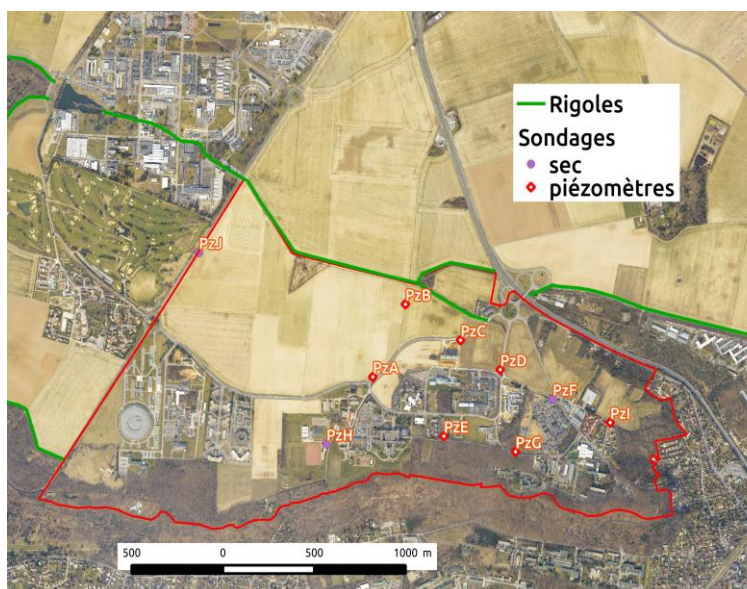


Figure 13 : Coefficients d'écoulement pluriannuels de chacune des stations

3.3. Infiltration en sub-surface et recharge en profondeur

L'objectif de cette partie est d'estimer l'infiltration en sub-surface et la recharge en profondeur de la nappe des Sables de Fontainebleau. Elles correspondent aux flux d'eau verticaux entrant dans la zone non-saturée ou jusqu'à la surface libre de la nappe respectivement. Cela permet d'une part d'apporter des informations sur le comportement hydrogéologique du plateau et d'autre part de documenter les flux qui sont transmis vers ces compartiments au cours de l'année. Grâce à l'interprétation des fluctuations piézométriques, ces dernières peuvent être identifiées. L'estimation de l'infiltration et de la recharge des nappes est fortement utilisée aujourd'hui et permet la gestion ainsi que la protection des ressources souterraines. Elle a été estimée sur le Plateau de Saclay par différentes méthodes et organismes. Pour apporter des informations à la compréhension du comportement hydrogéologique, il nous semble important d'estimer ces infiltration et recharge avec une toute autre méthode et la comparer aux résultats antérieurs.

3.3.1. Infiltration dans les lentilles aquifères perchées de sub-surface



Les eaux de sub-surface sont suivies par dix piézomètres répartis dans la zone du Moulon (Figure 14). Cependant, les piézomètres pzF, pzH et pzJ sont à secs et donc inutilisables. Les piézomètres A, B, C, D et I ont des dynamiques piézométriques cohérentes contrairement aux pzE et pzG qui semblent être perturbés par des activités anthropiques (Figure 15). Ces variations piézométriques ont été relevées et corrigées par la pression atmosphérique depuis Juin 2012 et cela jusqu'en décembre 2014.

Figure 14 : Répartition de l'ensemble des piézomètres dans eaux de sub-surface
(Source : Li Y., 2015 [13])

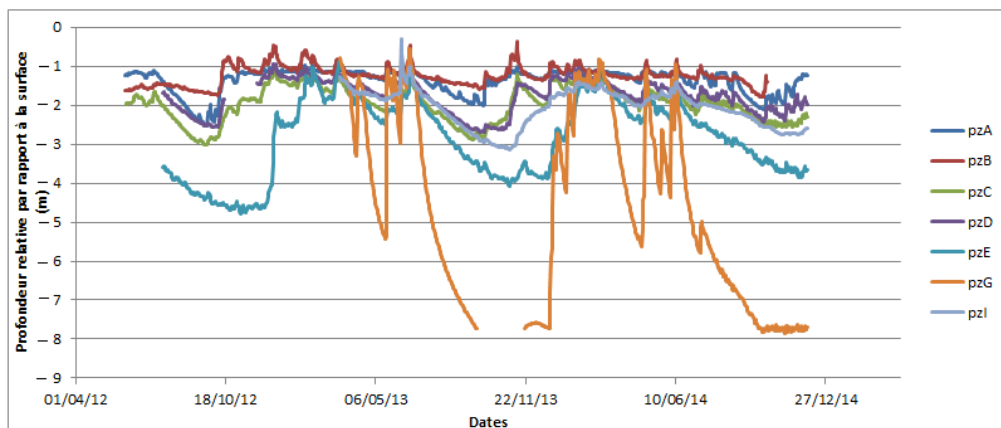


Figure 15 : Variations piézométriques des eaux de sub-surface

3.3.1.1. Méthode

Il existe de nombreuses méthodes pour estimer la recharge d'une nappe. Pour la « nappe » superficielle (eaux de sub-surface), notre choix s'est porté sur la méthode WTF (Water Table Fluctuation) décrite par Healy et Cook [8, 11] qui est fréquemment utilisée pour des cas de nappes libres et qui reste simple. Elle requiert la connaissance des variations piézométriques de la nappe au cours du temps (au pas de temps le plus fin : à l'échelle de l'heure ou de la journée) et d'un rendement spécifique S_y . Pour ces eaux de sub-surface, nous parlerons à proprement parler d'infiltrations au contraire de la nappe des Sables de Fontainebleau pour laquelle le terme recharge sera utilisé.

La formule utilisée est la suivante :

$$Re \text{ ou } I = S_y \times \Delta h / \Delta t$$

[8,11]

où S_y : rendement spécifique (sans unité)

Δh : augmentation du niveau de la nappe piézométrique (mm)

Δt : pas de temps (h)

Cette méthode s'effectue en deux étapes. Tout d'abord, elle consiste à relever pour chaque augmentation du niveau piézométrique, la différence entre h_1 et h_3 (Figure 16 a)). En effet, à partir des fluctuations piézométriques il est possible d'identifier le volume d'eau ayant fait augmenter le niveau de la nappe. Cependant, lors de l'augmentation des niveaux piézométriques, les flux de drainance (verticaux et latéraux en sortie de nappe) et d'ETP ne se stoppent pas et peuvent se poursuivre. Dans ce cas-là, la lame d'eau infiltrée (ou la recharge) n'est pas seulement l'augmentation du niveau (h_1-h_2) qui est visible mais au moins la différence entre h_1 et h_3 . Le prolongement de la courbe précédant l'augmentation des niveaux permet donc de prendre en compte, en plus, le volume d'eau éventuel évacué par ETP et/ou drainance sous les conditions plus sèches précédentes et supposées se perpétuer durant l'augmentation des niveaux. La pente du prolongement peut cependant varier (Figure 16 b)). En effet, nous n'avons aucune connaissance sur le pourcentage des flux de drainance et d'ETP. C'est pourquoi, nous avons estimé une pente maximum (qui correspond à h_3) et minimum (qui correspond à h_2). Cela permet ainsi d'avoir un intervalle de l'infiltration : $[(h_1-h_2) - (h_1-h_3)]$ pour encadrer l'estimation.

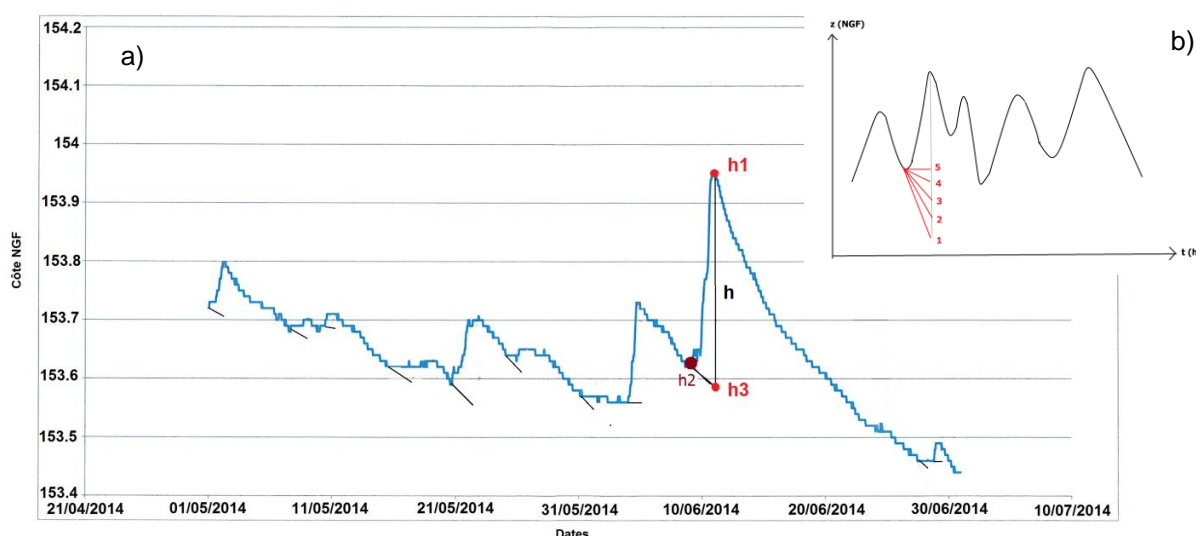


Figure 16 : Exemple d'estimation de l'augmentation du niveau piézométrique

Nous avons utilisé les niveaux piézométriques à l'échelle horaire afin d'être le plus précis possible et de limiter le lissage des variations piézométriques à l'échelle mensuelle voir annuelle. Ces relevés ont été effectués seulement sur les années 2013 et 2014. L'année 2012 a été exclue en raison de son fort pourcentage de lacunes.

La deuxième étape dans cette méthode consiste à estimer le rendement spécifique S_y . Ce paramètre permet de passer d'une augmentation de niveau de nappe (ou niveaux locaux déconnectés pour les eaux de sub-surface) à un volume d'eau qui a rejoint la nappe (ou niveaux locaux déconnectés). Il dépend du profil de teneur en dans la zone non saturée sus-jacente au moment de l'augmentation des niveaux piézométriques.

Expliquons rapidement comment fonctionne un profil de teneur en eau.

Les écoulements dans un milieu poreux sont provoqués par les différentiels de charge. L'eau subit donc plusieurs champs de force. La Figure 17 traduit que plus la pression capillaire h augmente (égale à l'opposé de la succion : potentiel de la force d'aspiration de l'eau sous l'effet de la plus grande affinité du milieu poreux pour l'eau que pour l'air), plus la teneur en eau diminue. Le profil d'un milieu initialement saturé en eau évolue donc d'une teneur en eau homogène à saturation (où tous les pores sont remplis d'eau) vers une teneur en eau résiduelle. La courbe en pointillé correspond au profil de la teneur en eau à l'équilibre avant la « recharge » de la nappe contrairement à la courbe continue qui représente le profil après l'arrivée des précipitations et l'augmentation du niveau saturé en supposant un équilibre instantané et un sol homogène.

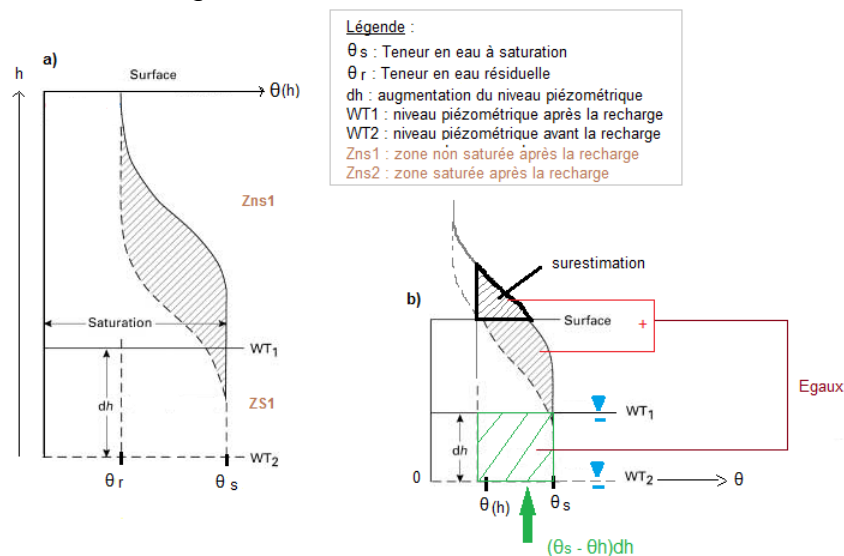


Figure 17 : Exemples de courbes de rétention des eaux : a) pour une nappe profonde ; b) pour une nappe peu profonde (cas de la « nappe » superficielle)
 (Source : Healy & Cook, 2002 [11])

Ce paramètre est variable en fonction de la profondeur de la nappe ou des niveaux locaux déconnectés (la teneur en eau résiduelle risque d'être atteinte avant la surface pour une nappe profonde au contraire d'une nappe peu profonde), du type de sol (pour un sol grossier le profil est plus aplati que pour un sol fin) et du temps en raison de la variation d'humidité du sol. Le cas des formations superficielles correspond donc au cas b) de la Figure 17 puisque ces niveaux locaux déconnectés

sont présents entre 0.5 et 3 mètres de profondeur et correspond à un sol relativement fin avec une longueur capillaire caractéristique de plusieurs mètres. Ce rendement correspond à la quantité d'eau à ajouter au sol par unité de surface pour obtenir une élévation dh du niveau saturé et peut être approximé par $\theta_s - \theta(h)$ (Figure 17 b)).

Ce paramètre reste assez discuté dans la littérature (Crosbie R.S et al., 2005 [8]; Healy & Cook, 2002 [11]). Nous avons donc choisi d'estimer l'infiltration en sub-surface à partir des valeurs minimales et maximales trouvées pour notre sol et qui ont été répertoriées par Johnson et al. en 1967 [12] (Tableau 8).

Texture	Average specific yield	Coefficient of variation (%)	Minimum specific yield	Maximum specific yield	Number of determinations
Clay	0.02	59	0.0	0.05	15
Silt	0.08	60	0.03	0.19	16
Sandy clay	0.07	44	0.03	0.12	12
Fine sand	0.21	32	0.10	0.28	17
Medium sand	0.26	18	0.15	0.32	17
Coarse sand	0.27	18	0.20	0.35	17
Gravelly sand	0.25	21	0.20	0.35	15
Fine gravel	0.25	18	0.21	0.35	17
Medium gravel	0.23	14	0.13	0.26	14
Coarse gravel	0.22	20	0.12	0.26	13

Tableau 8 : Estimation statistique du S_y en fonction du type de sol
(Source : Healy & Cook, 2002 [11])

3.3.1.2. Incertitudes et limites de la méthode

Cette méthode présente des incertitudes et limites. Tout d'abord, comme indiqué précédemment, nous n'avons pas connaissance des pourcentages de drainage et d'ETP représentés par le prolongement des courbes (Figure 16).

De plus, elle ne permet pas d'identifier une éventuelle infiltration quand les niveaux baissent ou sont plats. En effet, il est possible qu'il y ait une infiltration qui soit « gommée » par des flux de drainage ou d'évapotranspiration trop importants et qui entraînent une baisse ou une stagnation du niveau. Il a donc été analysé l'ensemble des plats qui ont été comparés aux pluies pour contrer cette limite et prendre en compte d'éventuelles infiltrations non visibles. L'infiltration n'a cependant pas pu être identifiée lorsque les niveaux piézométriques baissent.

L'ensemble des augmentations ou stagnations des niveaux piézométriques a été comparés aux pluies (qui sont le seul apport en eau). La lame d'eau infiltrée peut provenir de précipitations datant de x jours. Nous avons estimé le temps de transfert d'eau entre la surface et la zone saturé à 6 jours maximum. Ce dernier a été évalué à partir du K_s des limons qui est de 43.74 cm/j et aux profondeurs où se situent les lentilles aquifères perchées (0,5 à 3 m). Cette estimation est une approximation et présente des incertitudes. En effet, il est possible qu'en prenant ce temps de transfert, nous surestimions certaines infiltrations.

En fonction du S_y utilisé, certains pics semblent douteux car ils sont bien supérieurs aux pluies. Plusieurs hypothèses ont été avancées et vérifiées pour comprendre ceux-ci. Ils peuvent soit correspondre à du Lisse effect, à des problèmes d'étanchéité des piézomètres ou encore à la valeur du S_y trop élevée. Le Lisse effect est un phénomène qui entraîne une augmentation brutale des niveaux piézométriques. Plus précisément, l'eau entrant dans le sol, suite à des précipitations assez fortes pour générer une lame continue, appuie sur la lame d'air emprisonnée qui voit sa pression

augmenter en raison de la diminution de volume. A partir du moment où la surpression d'air dépasse la pression d'entrée dans l'eau, l'air remonte afin d'équilibrer les pressions. La surpression de l'air, transmise en dessous de la nappe, ne peut donc pas dépasser le poids de la lame d'eau. La lame d'eau infiltrée ne peut pas non plus être supérieure aux précipitations. L'hypothèse du Lisse effect a donc été écartée. L'hypothèse des fuites des piézomètres a été également écartée après discussions avec l'hydrogéologue sauf dans un cas exceptionnel. Les pics douteux ont donc généralement pour origine la valeur du Sy. En effet, en prenant un fort Sy, cela peut entraîner une lame d'eau infiltrée importante qui devient incohérente avec les précipitations. Cette infiltration aberrante peut à l'inverse devenir cohérente en la comparant aux pluies, avec l'utilisation d'un Sy plus faible.

Enfin, cette méthode entraîne aussi une surestimation (difficilement quantifiable) dans la valeur de la lame d'eau infiltrée comme le montre la surface entourée de noir (Figure 17 b)).

La limite principale de cette méthode réside donc dans le choix du rendement spécifique. Il existe de nombreuses estimations selon le type de sol, ce qui entraîne une gamme importante de lames d'eau infiltrées. Ce rendement reste la clé de l'estimation de l'infiltration par observations des fluctuations piézométriques. Une expérimentation sur le terrain par mesure directe de l'infiltration reste la méthode la plus fiable.

3.3.1.3. Résultats et interprétations

L'infiltration dans les formations superficielles a été calculée à partir de la moyenne des cinq piézomètres : pzA, pzB, pzC, pzD et pzI, en excluant les piézomètres E et G qui sont affectés par des activités anthropiques (Figure 19).

L'ensemble des pics et plats a été analysé sur les années 2013 et 2014 et ce à partir de la méthode décrite ci-dessus. Le Tableau 9 et le Tableau 10 répertorient les intervalles de lames d'eau infiltrées estimées pour deux valeurs de Sy extrêmes : 0.03 et 0.19 (Tableau 8) avec et sans prolongement de la courbe précédant la période d'augmentation de la piézométrie.

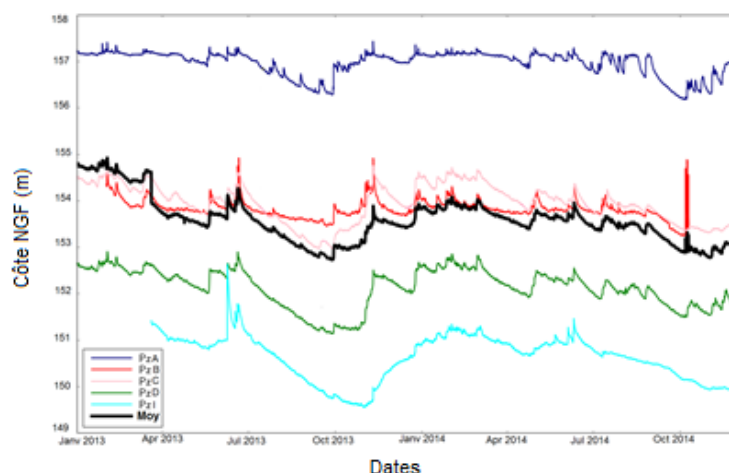


Figure 18 : Évolution des niveaux piézométriques et de la moyenne associée dans la zone du Moulon
(Source : Li Y., 2015 [13])

Lame d'eau infiltrée	Sans prolongement de la courbe	Avec prolongement de la courbe
I (mm) ₂₀₁₃	[0 - 96.9] ~ 48.45	[2.5 - 103.1] ~ 52.8
I (mm) ₂₀₁₄	[0 - 66.5] ~ 33.25	[0.4 - 69.7] ~ 35.05

Tableau 9 : Estimation de la lame d'eau infiltrée avec $Sy=0,19$

Lame d'eau infiltrée	Sans prolongement de la courbe	Avec prolongement de la courbe
I (mm) ₂₀₁₃	[0- 15.3] ~ 7.7	[0.4 - 16.3] ~ 8.4
I (mm) ₂₀₁₄	[0 - 10.5] ~ 5.25	[0.06 - 11] ~ 5.5

Tableau 10 : Estimation de la lame d'eau infiltrée avec $Sy=0,03$

Ces résultats montrent les minimums et maximums de la lame d'eau infiltrée en sub-surface qui subsistent à l'échelle de l'événement pluvieux. Les intervalles de l'infiltration à l'échelle de l'événement pluvieux pour chaque année sont les suivants :

- 2013 : [0 - 103.1] mm
- 2014 : [0 - 69.7] mm

Les résultats obtenus ne semblent pas satisfaisants au vu de la gamme des valeurs possibles trop importantes. Cette méthode est donc vraiment limitée par l'estimation du Sy . L'utilisation de valeurs aussi extrêmes ne permet pas dans notre zone d'étude d'obtenir un intervalle signifiant, si ce n'est par ses valeurs hautes : l'infiltration est probablement inférieure à 100 mm pour les événements pluvieux les plus intenses (eux-mêmes limités à 100 mm environ). Les valeurs de Sy élevées entraînent des valeurs aberrantes et beaucoup trop fortes. L'infiltration en sub-surface calculée à partir du Sy faible constitue donc une limite inférieure. D'autre part, l'infiltration calculée avec le prolongement de la courbe semble la plus crédible puisque l'ETP et le drainage sur le moment sont pris en compte.

Nous n'avons pas trouvé de travaux dans la littérature concernant l'infiltration dans les formations superficielles, mise à part un travail de modélisation à partir du modèle urbain intégré URBS (Li Y., 2015) [13]. Ce modèle distribué et à base physique pour des bassins versants urbains permet de simuler les flux hydrologiques à l'échelle annuelle [13]. Pour chaque augmentation du niveau piézométrique identifiée (pics et plats), nous avons utilisé les flux estimés par ce modèle pour l'année 2013 (seuls les calculs pour cette année ont été faits par URBS). Nous obtenons comme intervalle de lame d'eau infiltrée en sub-surface pour 2013 : [0 - 43] mm à l'échelle de l'événement pluvieux. Ce qui correspondrait à un Sy compris entre 0,07 et 0,08. L'infiltration en sub-surface serait donc plus proche des valeurs estimées à partir du Sy égal à 0.03 qu'à 0.19.

Il a cependant été identifié des artefacts sur certains des piézomètres :

- pzA : la courbe est lissée en raison du fossé à proximité du fossé,
- pzB : des fuites dans le piézomètre ont été identifiées à partir d'Octobre 2014,
- pzl : variations surprenantes en Mai et Juin 2013 reliées à des variations anthropiques qui ont affectées le pzG.

Les artefacts du pzB et pzl ont été filtrés et n'ont pas été pris en compte dans les infiltrations estimées précédemment.

L'homogénéisation spatiale par la moyenne peut donc introduire un biais à cause de l'ensemble de ces défauts. En effet, la moyenne risque de sous-estimer l'infiltration de la « nappe » superficielle en lissant légèrement la courbe ou encore de la surestimer à cause des variations anthropiques importantes. Dans le but d'étudier la variabilité spatiale et de la méthode, nous avons estimé l'infiltration sur deux périodes de deux mois (en automne et été) pour les piézomètres C et D qui semblent très cohérents et qui ne présentent aucun problème apparent. Cela permet aussi de voir l'impact que peut avoir la moyenne sur l'estimation de l'infiltration en sub-surface.

Les résultats montrent que la différence entre la moyenne et les piézomètres étudiés individuellement reste assez négligeable. Pour un même événement pluvieux, la différence maximale observée entre la moyenne et le pzD est 6.26 mm et entre la moyenne et le pzC de 4.9 mm. Ces estimations ont été faites en prenant un S_y de 0.03 avec prolongement de la courbe.

Cette méthode a donc pour principale limite l'estimation du rendement spécifique qu'il est difficile d'estimer en particulier ses variations temporelles.

3.3.2. Recharge de la nappe des Sables de Fontainebleau

3.3.2.1. Méthode

Les relevés piézométriques de cette nappe ont été relevés à l'échelle mensuelle, ce qui limite fortement la précision, lisse les variations des niveaux et peut cumuler les incertitudes. L'estimation de la recharge de la nappe des Sables de Fontainebleau s'est donc basée sur une dégénérescence (cas particulier) de la méthode WTF. Le cas de cette nappe est schématisé en Figure 20. Contrairement aux formations superficielles, la nappe des Sables est constituée de 30 m de zone non saturée et de seulement 3 m de frange capillaire. Cette frange capillaire est donc négligeable face aux 30 m désaturés. La teneur en eau résiduelle est donc rapidement atteinte. Cela signifie que le rendement spécifique équivaut approximativement à $\theta_s - \theta_r$.

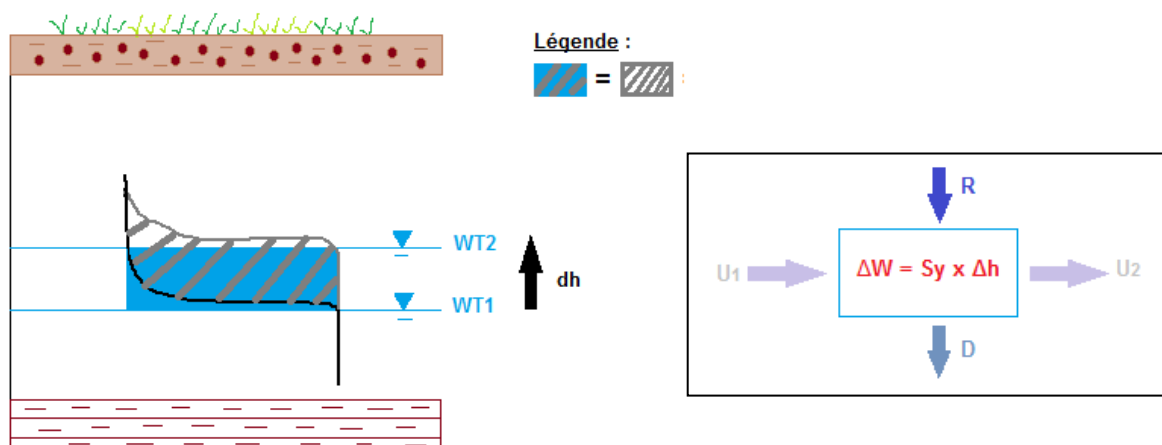


Figure 19 : Cas de la nappe des Sables de Fontainebleau

Mathématiquement, la recharge de la nappe des Sables correspond à l'étape 4 ci-dessous ($\text{div}(U)$ équivaut aux flux latéraux $U_1 - U_2$), D la drainance verticale et R l'apport en eau). A proprement parler, cela signifie en valeur absolue que la recharge de la nappe équivaut à la recharge en période de recharge (variation du stock d'eau)

à laquelle on ajoute le volume d'eau qui s'enfuit par drainance. Ce dernier est approximé à la décharge en période de non recharge. Cela reste une approximation, puisque la drainance en période de recharge est différente (voir plus élevée) que celle en période de décharge.

Bilan en période de recharge (r) : $\left(\frac{\Delta W}{\Delta t}\right) r + \text{div}(U)r = R - D$ (1)

Bilan en période de décharge (d) : $\left(\frac{\Delta W}{\Delta t}\right) d + \text{div}(U)d = -D$ (2)

Recharge de la nappe : $Re = \left(\frac{\Delta W}{\Delta t}\right) r - \left(\frac{\Delta W}{\Delta t}\right) d + (\text{div}(U)r - \text{div}(U)d)$ (3)

Si l'on considère les flux latéraux $\text{div}(U)r$ et $\text{div}(U)d$ égaux pendant la recharge et la décharge, cela se simplifie en :

$$Re = \left(\frac{\Delta W}{\Delta t}\right) r - \left(\frac{\Delta W}{\Delta t}\right) d \quad (4)$$

3.3.2.2. Incertitudes et limites de la méthode

Cette méthode comporte plusieurs incertitudes et limites.

Tout d'abord, comme énoncé précédemment dans les limites de l'infiltration en subsurface, la recharge ne peut pas être identifiée lorsque les niveaux baissent ou sont plats.

D'autre part, les relevés ont été faits à l'échelle mensuelle à relevés fixes, ce qui entraîne quelques imprécisions. Une période horaire ou journalière aurait limité ces incertitudes.

Enfin, l'approximation que la drainance en période de recharge est équivalente à la décharge en période de non recharge, peut aussi entraîner quelques variabilités.

3.3.2.3. Résultats et interprétations

L'estimation de la recharge de la nappe des Sables de Fontainebleau a été faite à partir de la moyenne des quatorze piézomètres situés autour et à l'intérieur du CEA Saclay. Cette moyenne a été ramenée à un niveau de référence afin de limiter les biais (Figure 20). Cette moyenne glissante permet d'obtenir une recharge spatialisée mais peut en contrepartie lisser quelques données et filtrer certaines variations. Ces incertitudes sont donc à prendre en compte et ne pas négliger.

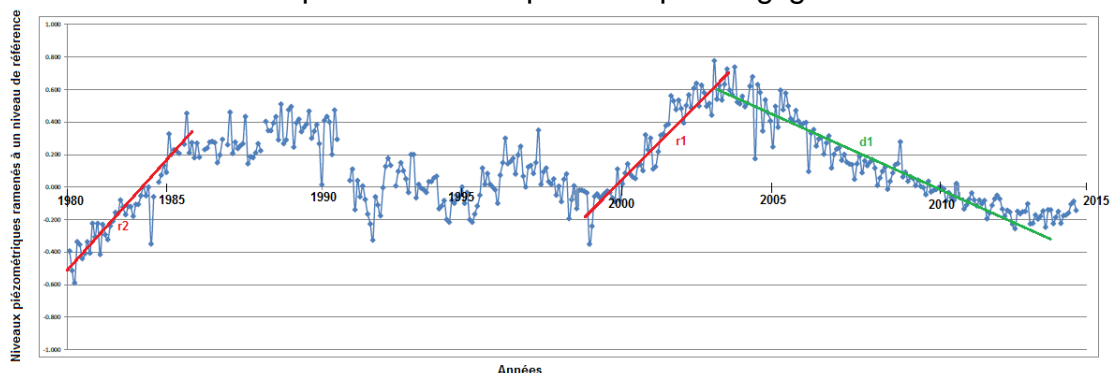


Figure 20 : Evolution des niveaux piézométriques de la nappe des Sables de Fontainebleau

Deux périodes de recharge et une de décharge ont été identifiées durant la période de 1982 à 2014. Le rendement spécifique ($S_y=0,257$) a été estimé à partir des teneurs en eau résiduelle et à saturation des limons. Ces teneurs ($\theta_s = 0,31$ et $\theta_r = 0,0501$) proviennent du logiciel HYDRUS 1D « ROSETTA » [20]. Le Tableau 11 montre que les deux événements de recharge r1 et r2 sont quasi-équivalents. Cela signifie donc que la dynamique de la nappe sur 33 ans varie peu. La recharge totale obtenue vaut donc au moins 71 +/-8 mm/an.

	Variation du niveau piézométrique (m/an)	Variation du stock d'eau pendant r1, r2 et d1 (m/an)
Recharge r1	0,234	0,0601
Recharge r2	0,17	0,0437
Drainance d1	0,074	0,019

Tableau 11 : Détails des résultats de recharge obtenus pour la nappe des Sables

Retotale ($r1 + d1$) = 79 mm/an

Retotale ($r2 + d1$) = 63 mm/an

Le modèle hydrogéologique 3D METIS (Renard, 2012) [19] a simulé une recharge annuelle à partir de la pluviométrie mensuelle du CEA Saclay, des piézomètres du centre et de l'évapotranspiration de Villacoublay. Celle-ci a été évaluée à 131 mm/an. Ce modèle est construit en régime permanent et prend en compte les écoulements 1D verticaux dans la zone non saturée ainsi que les écoulements 2D latéraux dans la zone saturée. Cela peut expliquer les différences obtenues par observations. De plus, l'ensemble des incertitudes expliquées précédemment peuvent participer à cette différence. Une revue plus large de différentes estimations (Tableau 12) indique une recharge comprise entre 0 et 220 mm/an, avec des valeurs souvent autour de 100mm/an. On a donc ici, avec 71mm/an, une estimation cohérente quoique modérée.

Méthode	Modèle	Auteur	Recharge (mm/an)
Tour Eddy Covariance	SIRTA	Cheruy	0-150
Indicateur statistique	IDPR	BRGM	220
Modèle SVAT	Orchidée	Compoy	100
Modèle hydrogéologique	METIS	Guinois	75
Modèle hydrogéologique	MOSAIC	Burgeap	67-157
Modèle hydrogéologique	METIS	Decelle	85
Modèle hydrogéologique	MODFLOW	Burgeap	160-170
Modèle hydrogéologique	METIS/THYRSIS	Renard	131
Penman-Monteith	SIM	PIREN-SEINE	50
Penman-Monteith	SIM	Explore 2070	80-100
Penman-Monteith	METIS	Renard	131
Hypothèse de travail	URBS	CETE-IF	0

Tableau 12 : Diverses estimations de la recharge de la nappe des sables

(Source : P.Maugis, 2014 [14])

4. Bilan hydrologique pluriannuel du Plateau de Saclay

L'objectif final de ce stage est l'estimation du bilan hydrologique pluriannuel du Plateau de Saclay. L'ensemble des flux nécessaires a été analysé précédemment. Cependant, seuls des flux d'ETP et non d'ETR ont été évalués. Ce bilan apporte des informations plus précises et permet donc de les en déduire.

L'ensemble des paramètres a été calculé sur des périodes annuelles calendaires. Il aurait été cependant plus judicieux de les estimer sur des années hydrologiques. Néanmoins, ayant pour but de quantifier le bilan du plateau pluri-annuellement, le concept d'année hydrologique est de moins grande importance.

Le bilan final du plateau correspond à la formule suivante :

$$P = R + ETR + \Delta S - \Delta U_{\text{industriels}}$$

$$P = R + ETR + [\Delta S(\text{sub_surface}) + \Delta S(\text{nappe_sables})] - \Delta U_{\text{industriels}}$$

R représente les écoulements qui vont rejoindre les rivières exutoires du plateau (somme du ruissellement de surface et des écoulements latéraux souterrains). Les écoulements relatifs (rapportés aux pluies) sont estimés comme la moyenne des débits de la Bièvre et de l'Yvette qui sont quasi-équivalents.

Pour pouvoir estimer les variations de stock, nous négligeons d'une part les variations de stock en surface (flaques, mares) et dans les zones non saturées du sol. D'autre part, les variations dans les zones saturées sont estimées par différences des niveaux piézométriques multipliées par le Sy. Au vu des résultats obtenus précédemment et à l'incohérence qu'entraîne l'utilisation de valeurs maximum, nous avons utilisés des Sy moyens correspondant aux sables fins (pour la nappe des Sables de Fontainebleau) et aux limons. Ceux-ci sont respectivement de 0.21 et 0.08 (Tableau 8). Les variations de la nappe des Sables et des eaux en sub-surface restent aussi en moyenne assez faibles. Elles varient peu pluri-annuellement. Les usages industriels sont limités à ceux connus : ceux du CEA Saclay. $\Delta U_{\text{industriels}}$ est le bilan des rejets opérés sur le Plateau.

Le bilan écrit suppose aussi une drainance nulle (ou négligeable) des sables vers les calcaires de Brie sous-jacents.

Les flux ont été estimés en fonction de 4 critères (Tableau 13) : moyennement, à l'extrême (minimum et maximum) et pour la seule année en commun entre tous les paramètres (2013). Pour obtenir des ETR minimum, il est nécessaire de déterminer les maximums des autres flux (écoulements, ΔS (nappe superficielle), ΔS (nappe des Sables) sauf les ΔU industriels qui doivent être minimum. Et inversement pour l'ETR maximum.

Le tableau 13 répertorie l'ensemble des flux du bilan hydrologique du plateau.

Les ΔU industriels correspondent aux valeurs du tableau 2. Les écoulements correspondent, quant à eux, aux coefficients d'écoulement moyens de la Bièvre (à la station Cambacérés) et de l'Yvette (puisque les débits de ces rivières sont rapportés aux pluies). Il a été effectué la moyenne des coefficients d'écoulement de ces deux rivières et en est ressorti un coefficient d'écoulement maximal de 27.9 %, minimal de 21.2 % et en 2013 de 26.9 %. L'écoulement moyen peut être justifié par la Figure 13

où le coefficient d'écoulement de la Bièvre est de 24 % et celui de l'Yvette de 25 %. Concernant la variation moyenne du stock de la nappe des Sables de Fontainebleau (Figure 20), il a été utilisé le maximum d'années (1982-2014). Nous trouvons une augmentation à long terme de ΔS de 53.13 mm en 32 ans (soit 1.66 mm/an) pour une pluie moyenne de 681.8 mm, ce qui correspond à 0.24 %. Pour les extrêmes, nous avons utilisé les pentes maximale (r1) et minimale (d1) afin d'avoir une vision des variations de stock culminante et minime qui existent sur le plateau. Pour r1 (0.234 m/an soit 49 mm/an de variation de stock avec un Sy de 0.21), la pluie moyenne est de 805.6 mm. Pour d1 (0.074 m/an soit 15.5 mm/an de variation de stock avec un Sy de 0.21), la pluie est de 668.2 mm. Enfin, pour la variation de stock des niveaux locaux non connectés en sub-surface (« nappe » superficielle), il a été employé la même méthode (Figure 19).

En moyenne, cette variation de stock est égale à 0 %, ce qui est naturel puisque la faible puissance de ces formations n'autorise pas un effet mémoire à long-terme. Pour l'année 2013, celle-ci vaut -11.7 % (72.8 mm/an pour une pluie de 652 mm). N'ayant qu'une seule année entière à notre disposition, nous avons estimé que cette valeur de -11.7 % équivaut au minimum pouvant exister dans la « nappe » superficielle et qu'inversement 11.7 % est le maximum. Cela reste une forte approximation puisque cette année n'est pas forcément représentative. Cette valeur est légèrement plus élevée que celle estimée par Li Y. en [13] (43 mm maximum) mais reste dans la gamme donnée par la méthode du Sy (103 mm max).

Les flux principaux de ce bilan sont donc les écoulements vers les rivières et l'évapotranspiration. Cette dernière reste majeure et varie entre 53 et 91 % de la pluie. L'ETR pluri-annuelle qui subsiste sur le plateau, quant à elle, est de 74 % de la pluie. En la comparant à celle obtenue en 2013, nous pouvons en déduire une variabilité non négligeable de l'ETR d'environ 13 %. La contribution nette du CEA Saclay reste marginale. A l'échelle pluri-annuelle, les variations de stock en zone saturée doivent être aussi faibles. A l'échelle d'une année, les variations des niveaux de sub-surface pourraient avoir un rôle sur le bilan hydrologique.

	Moyen	Minimum	Maximum	2013
Ecoulement (%)	24.5	27.9	21.2	26.9
S (formations superficielles) (%)	0	11.7	-11.7	-11.7
ΔS (nappe des Sables) (%)	0.24	6.1	-2.3	-3.2
ΔU industriels (%)	1.53	1.48	1.57	1.48
ETR (%)	73.7	52.8	91.2	86.5

Tableau 13 : Estimation des flux du bilan hydrologique du plateau

Conclusion et perspectives

Ce stage de fin d'études au sein du Cerema a permis de répondre à l'ensemble des objectifs fixés en amont et portant sur l'hydrologie du Plateau de Saclay, sujet au cœur des actualités du moment. Consacré dans un premier temps à un état des lieux des connaissances acquises sur le plateau, à des sorties terrain et à une phase de rencontres auprès de professionnels publics et industriels, cela a permis de faire une synthèse des données hydrologiques et existantes sur le plateau, et compléter ainsi les synthèses partielles qui avaient été faites jusqu'alors.

L'estimation d'un bilan hydrologique qu'il soit pluriannuel, annuel ou encore mensuel peut paraître simple d'un premier abord mais ne l'est pas. En effet, l'ensemble des flux et stocks nécessaires à son évaluation est difficilement observable et donc quantifiable. De plus, le Plateau péri-urbain de Saclay n'est pas purement « naturel » et implique la prise en compte de flux supplémentaires. En raison de la difficulté de l'obtention d'un certain nombre de données, l'estimation d'un bilan hydrologique à une telle échelle (68 km²) implique l'instauration d'hypothèses, pas toujours vérifiables. Cela entraîne ainsi un certain nombre d'incertitudes qu'il ne faut pas négliger.

A partir d'une analyse approfondie et croisée de l'ensemble des données, il a été noté que la dynamique du Plateau de Saclay est fortement dépendante de la climatologie (pluviométrie, évapotranspiration), de l'urbanisation, de la présence et de la gestion des étangs de Saclay ainsi que de la topographie. D'autre part, le bilan hydrologique a montré l'influence importante de l'évapotranspiration réelle qui est de l'ordre de 74 % des pluies par an (soit 491 mm/an). Les variations des stocks d'eau dans les formations superficielles et dans la nappe des sables ainsi que les usages industriels semblent donc négligeables en comparaison.

Les perspectives de cette étude restent multiples. Tout d'abord, il a été remarqué un manque non négligeable de données débitométriques dans certaines rigoles du plateau ou encore de données piézométriques en dehors de la zone limitée du Moulon, de Polytechnique et Satory. Des mesures supplémentaires permettraient ainsi de valider ou de corriger les informations qui ont été apportées par cette étude et d'apporter une fiabilité supplémentaire.

L'actualisation des plans de drainage des agriculteurs serait aussi un élément important à apporter pour de futures études.

L'estimation de l'évaporation des étangs de Saclay, qui sont primordiaux dans la dynamique du plateau, a été réalisée approximativement afin d'avoir un ordre de grandeur des volumes évaporés par an. Cependant, comme il a été énoncé précédemment, l'évaporation des étendues d'eau est assez locale. Il serait donc judicieux d'évaluer ces évaporations à partir de méthodes plus concrètes telles que des méthodes directes (bacs évaporatoires par exemple) ou encore des mesures chimiques à partir d'isotopes stables.

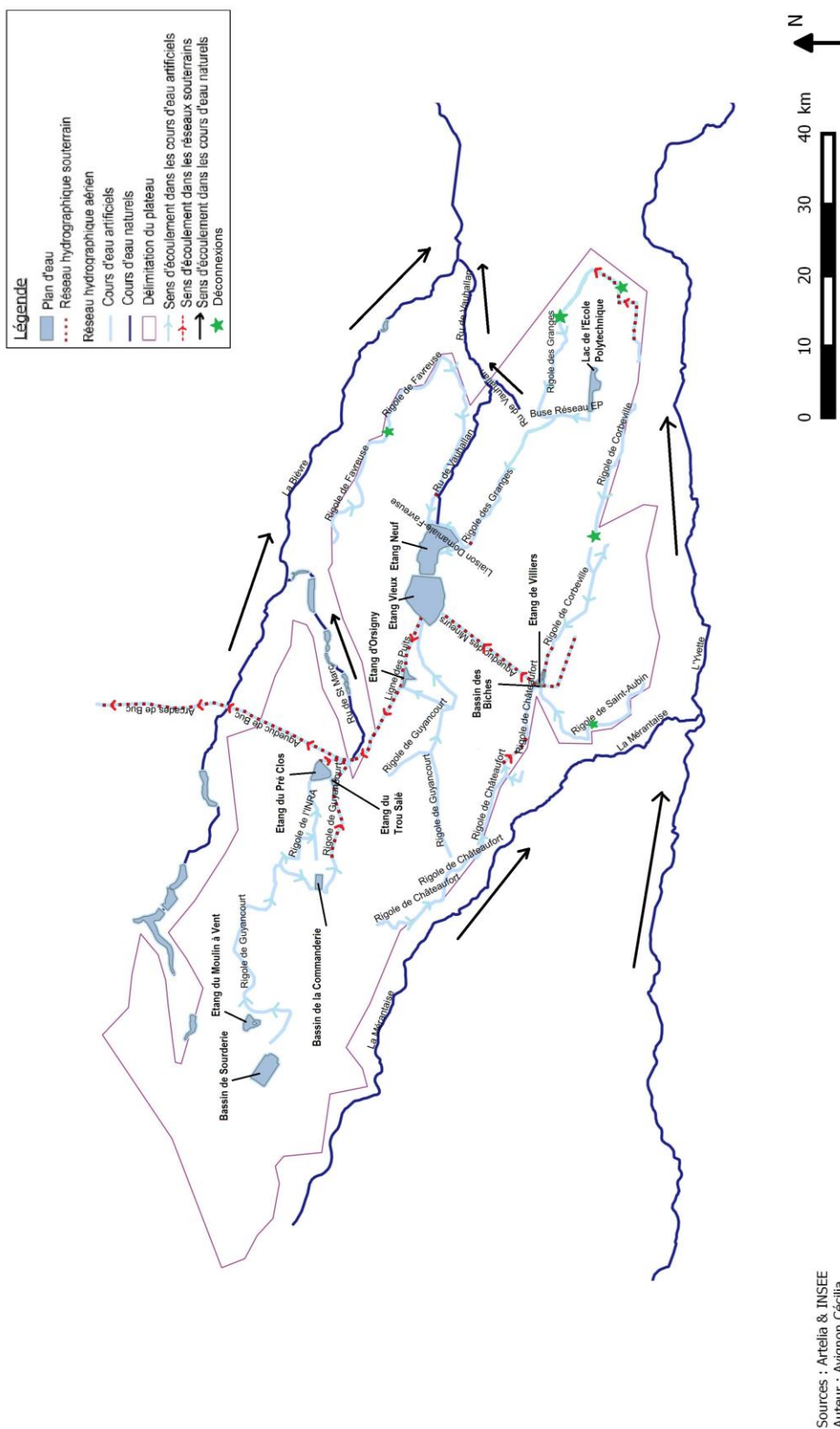
L'évaluation du bilan hydrologique a été l'occasion d'étudier le comportement hydrologique et hydrogéologique à plusieurs échelles. Il serait intéressant d'estimer des coefficients d'écoulement à l'échelle de l'événement pluvieux afin de comprendre plus précisément la dynamique du plateau.

Enfin, notre étude a permis de voir les limites qu'il existe dans l'évaluation de l'infiltration, de la recharge et variations de stock en sub-surface et en profondeur sur le plateau. La méthode WTF repose sur une estimation quelque peu arbitraire d'un rendement spécifique dont nous ne sommes pas sûrs de l'existence sur le terrain, en raison des hypothèses contraignantes associées. Il paraît donc nécessaire de quantifier expérimentalement sur le terrain le devenir de la lame d'eau qui s'infiltré en sub-surface, est reprise par évapotranspiration, modifie le stock dans le sol ou s'infiltré en profondeur. Un ambitieux programme scientifique s'élabore en ce sens avec des dispositifs expérimentaux dédiés (infiltromètre, suivi de la teneur en eau et de la température, mesures en chambre à transpiration, géophysique, modélisation détaillée, etc.) sur la plateforme expérimentale du SIRTa, à Polytechnique. Ces travaux devraient préciser davantage les différents termes du bilan au niveau de cette parcelle, et donner des indications quantitatives critiques par rapports aux termes du bilan que nous avons calculés à l'échelle du Plateau.

Références bibliographiques

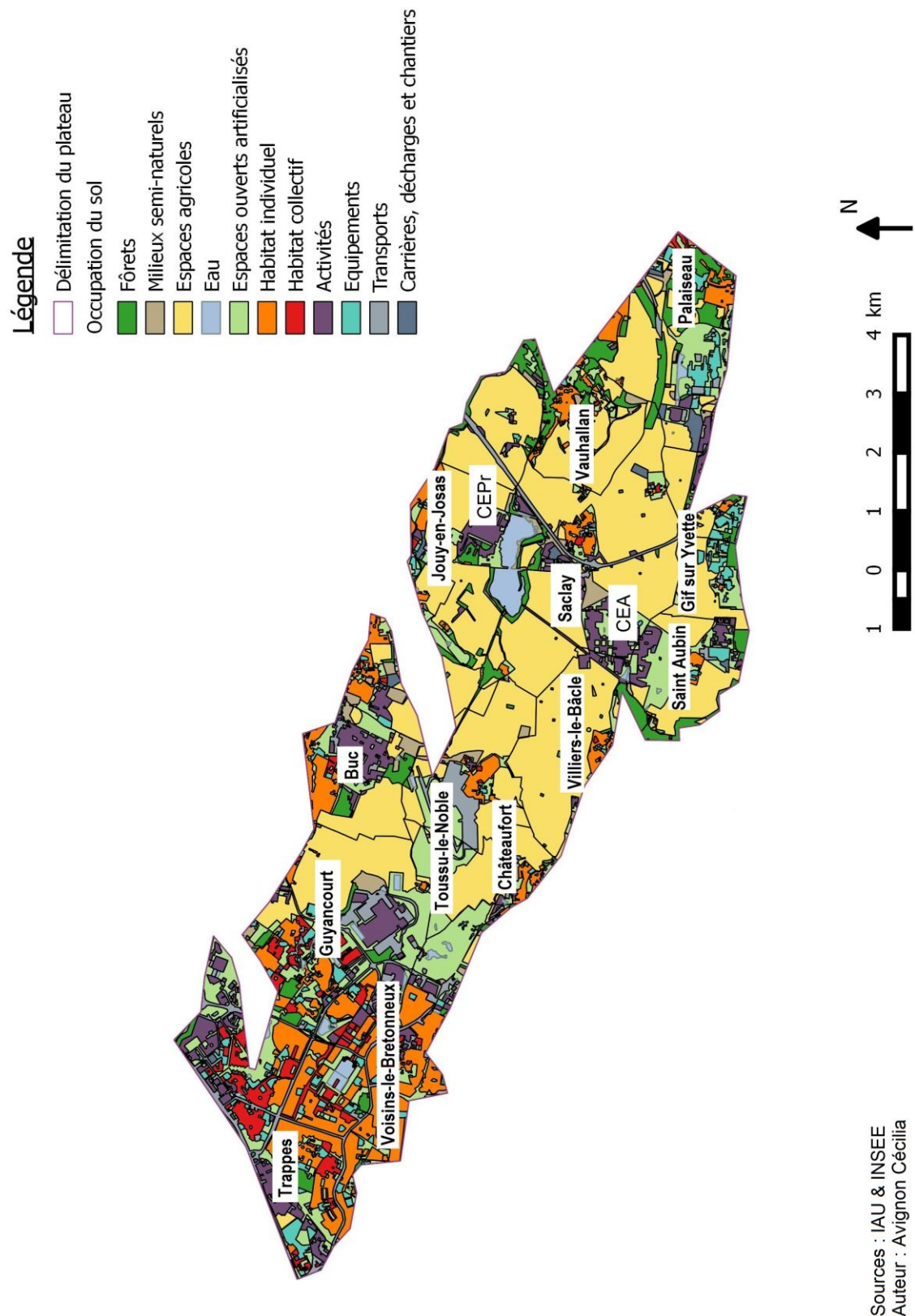
- [1] Artelia, l'union de Coteba et Sogreah. « Modélisation des écoulements du réseau hydrologique du Plateau de Saclay : étude de modélisation ». Rapport de phase 1 : construction du modèle. Arcueil. 2013, 88 pages.
- [2] Bazin M. et al. « De l'eau du Plateau de Saclay aux Fontaines de Versailles : un patrimoine exceptionnel digne de figurer au patrimoine mondial de l'humanité ». Vauhallan, ADER, 2003, 64 pages.
- [3] Boré D. et al « Paris-Saclay, une opération urbaine pour un cluster scientifique et industriel ». Orsay. EPPS, 2015, 83 pages.
- [4] Borell Estupina V. *Le cycle de l'eau et le bilan hydrologique [en ligne]*. Disponible sur : <http://mon.univ-montp2.fr/claroline/backends/download.php>. Consulté le 17/08/2015.
- [5] Bouchev R.J. *Evapotranspiration réelle et potentielle signification climatique [en ligne]*. Disponible sur : http://iahs.info/uploads/dms/iahs_062_0134.pdf. Consulté le 22/08/2015.
- [6] CEA Saclay. (2014). Cycle de l'eau du site CEA/Saclay, données 2014 (en m³). 1 page.
- [7] Cosandey C. *Réserve hydrique – Réserve hydrologique [en ligne]*. Disponible sur : <http://hydrologie.org/glu/FRDIC/DICRESHH.HTM>. Consulté le 17/08/2015.
- [8] Crosbie R.S et al. (2005). « A time series approach to inferring groundwater recharge using the water table fluctuation method ». – Water Resources Research, vol. 41, 9 pages.
- [9] Davoust P. *Bilan hydrique – Bilan hydrologique [en ligne]*. Disponible sur : http://www.ecosociosystemes.fr/bilan_hydrique_hydrologique.html. Consulté le 17/08/2015.
- [10] Dumont E. et al. « Projet scientifique Saclay (91) : synthèse géologique et hydrogéologique ». Numéro de dossier 111000651. Trappes. CETE-IF, 2013, 36 pages.
- [11] Healy W.R., Cook G.P. (2002). « Using groundwater levels to estimate recharge ». – Hydrogeology Journal, 18 pages.
- [12] Johnson et al. (1967). « Specific yield – compilation of specific yields for various materials. US Geological Survey. Water-Supply Papers 1662-D, 74 pages.
- [13] Li Y. « Modeling of hydrological processes of an urban catchment ». Terre et enveloppes fluides. Orsay : Etablissement Public Paris Saclay, 2015, 242 pages.
- [14] Maugis P. (2014). *Hydrologie Plateau de Saclay : Estimation de l'infiltration pour le bilan en eau*. 28 diapositives.
- [15] Météo France. *Données climatiques de la station de Trappes [en ligne]*. Disponible sur : <http://www.meteofrance.com/climat/france/trappes/78621001/normales>. Consulté le 17/08/2015.
- [16] Musy A. *Cycles et bilans hydrologique [en ligne]*. Disponible sur : <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre1/main.html>. Consulté le 17/08/2015.
- [17] Natural Resources Management and Environment Department. *Chapter 6 -Etc-Single Crop coefficient (Kc) [en ligne]*. Disponible sur : <http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e0b.htm#chapter%206%20%2020etc%20%20%20single%20crop%20coefficient%20%28kc%29>. Consulté le 18/08/2015.
- [18] Parissier J. « Rapport de stage : bilan physico-chimique sur le cycle de l'eau du CEA/Saclay ». 2^{ème} année cycle ingénieur Physique-Chimie. Compiègne : Université de Technologie de Compiègne, 2008, 49 pages.
- [19] Renard F. et Tognelli A. « Modèle hydrogéologique du Plateau de Saclay » VAL CEACI RBC DET 12000693A. CEA DASE. 2012, 99 pages.
- [20] Schaap M.G (1999). Rosetta. Release 1.Q.U.S Salinity Laboratory, Rivercade, CA, USA.
- [21] Vernoux J.F. et al. « Etude hydrogéologique du Plateau de Saclay (Essonne) ». Rapport BRGM SGR/IDF R 40840. Massy. 1999, 112 pages.

Annexes



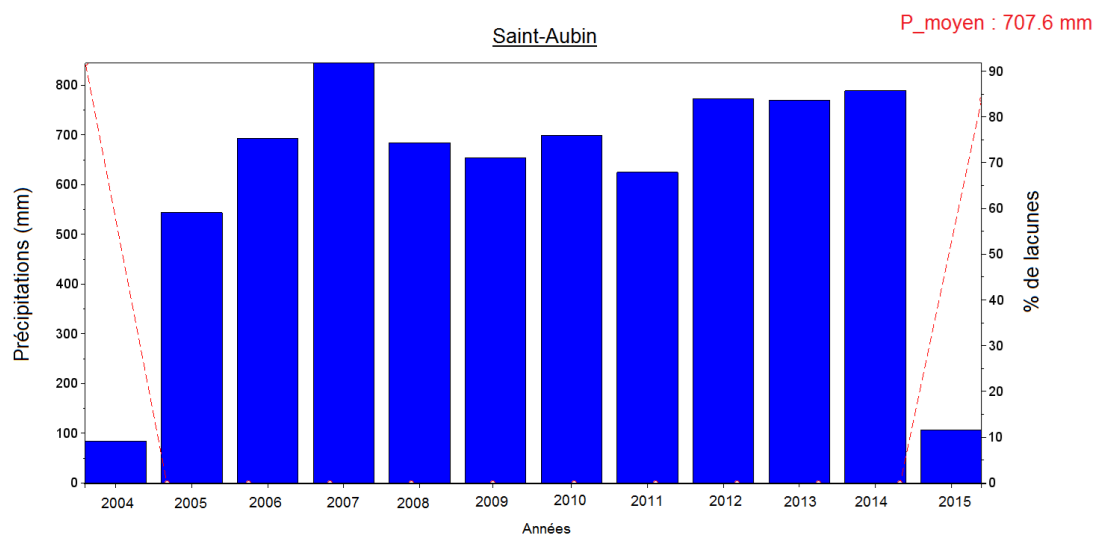
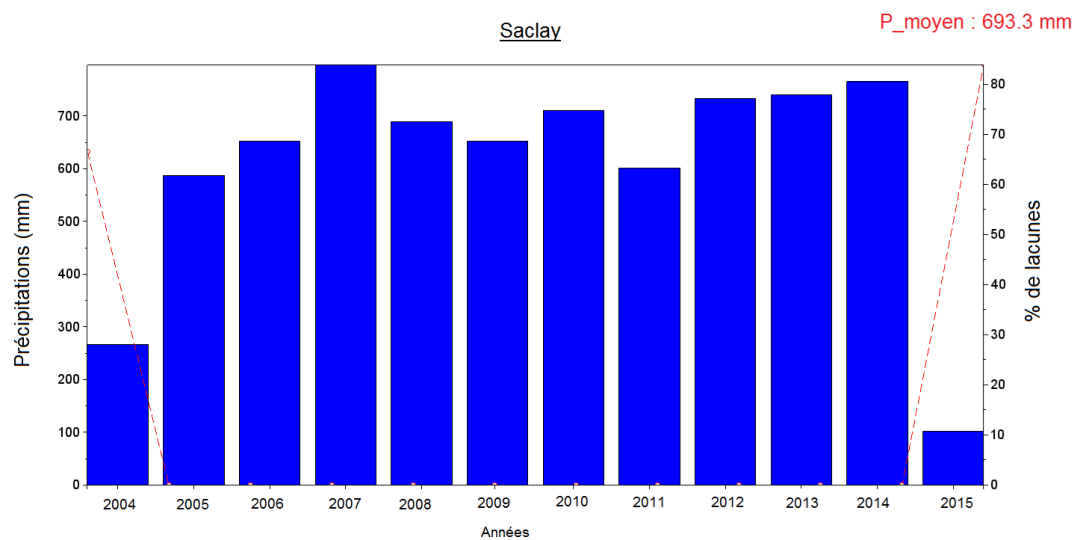
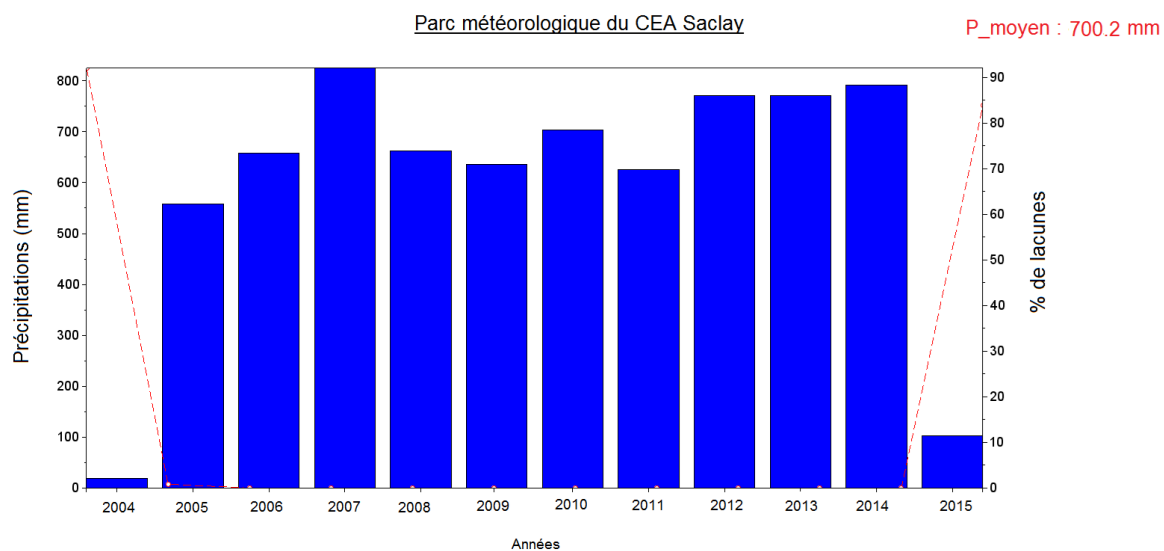
Annexe 1 : Représentation schématique du réseau hydrographique du Plateau de Saclay

Annexe 2 : Représentation schématique de l'occupation du sol du Plateau de Saclay et localisation des principales villes

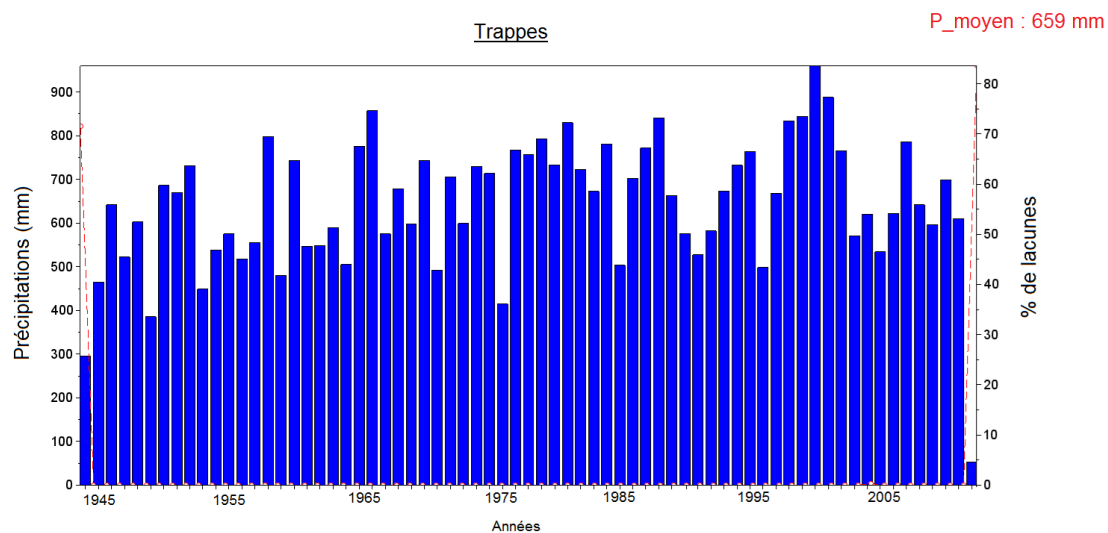
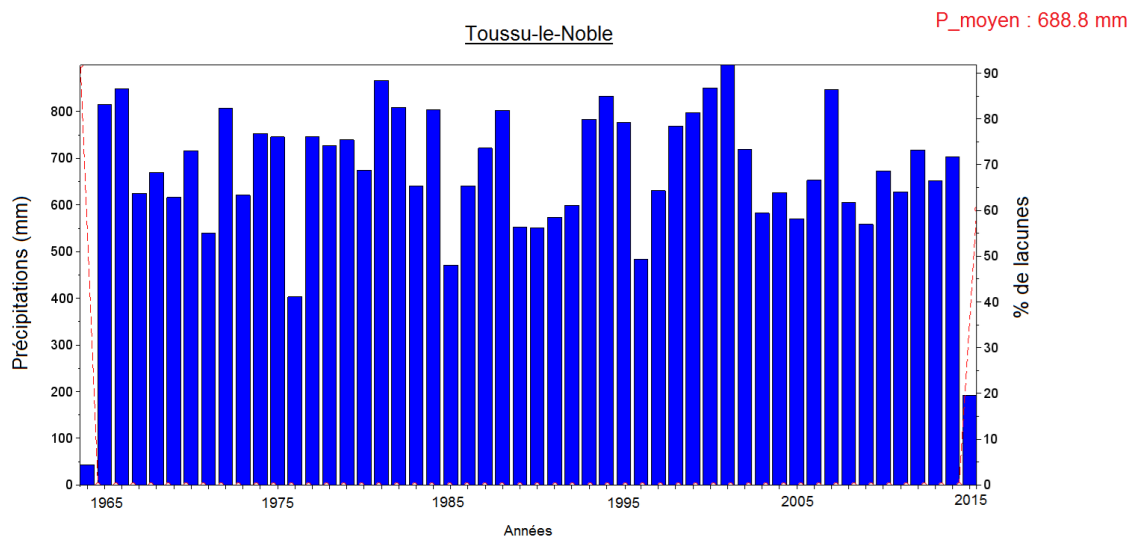


Organisme fournisseur	Propriétaire	Acquisiteur	Type de données	Echelle spatiale	Echelle temporelle	Types de relevés
Météo France (Trappes)	Météo-France	Public	Evapotranspiration potentielle	Trappes	08/04/1949 - 25/05/2015	Journalier (1 fois par jour : horaire non indiqué)
CEA Saclay	CEA Saclay	Groupe de travail attaché à l'étude du plateau de Saclay	Pluies	Saint-Aubin	01/08/2004 - 28/02/2015	Journalier (1 fois par jour : horaire non indiqué)
				Saclay	01/07/2004 - 28/02/2015	
				Parc Météorologique du CEA	01/09/2004 - 28/02/2015	
Cerema (Trappes)	Météo-France	Cerema		Trappes	18/09/1944 - 01/03/2012	Journalier (1 fois par jour : horaire non indiqué)
				Météo-France	01/12/1964 - 25/05/2015	Journalier (1 fois par jour : horaire non indiqué)
Cerema (Trappes)	Banque HYDRO	Public		Débits	Toussu-le-noble	1983-2013
		Public	Yvette		2004 - 2014	Journalier de 2004 - 2012 Horaire de 2013 -2014
		Groupe de travail attaché à l'étude du plateau de Saclay	Réseau du CEA (R1 à R8)		2000 - 2015	Minutes (toutes les 5 minutes)
SIAVB	SIAVB	Public		5 points de mesures sur la Bièvre 1 point de mesure sur le ru Saint-Marc 3 points de mesures sur le ru de Vauhallan	F41 à F45 : 03/1982 à 12/2014 F46 à F47 : 03/1998 à 12/2014 F48 à F49 : 04/2002 à 12/2014 F30 à F31 : 05/2001 à 12/2014 F50 à F52 : 06/2010 à 12/2014	Moyenne mensuelle à relevé fixe
CEA Saclay	CEA Saclay	Groupe de travail attaché à l'étude du plateau de Saclay		Nappe des Sables de Fontainebleau autour du CEA Saclay	PzA : 06/06/2012 au 03/12/2014	
Cerema (Le Bourget)	Cerema	Cerema & EPPS	Piézométries	Nappe superficielle dans la zone du Moulon		
					PzB : 06/06/2012 au 10/10/2014	
					PzC : 07/06/2012 au 03/12/2014	
					PzD : 26/07/2012 au 16/10/2012 & 29/11/2012 au 03/12/2014	
					PzE : 26/07/2012 au 03/12/2014	
					PzG : 20/03/2013 au 18/09/2013 & 21/11/2013 au 03/12/2014	
					PzI : 20/03/2013 au 03/12/2014	

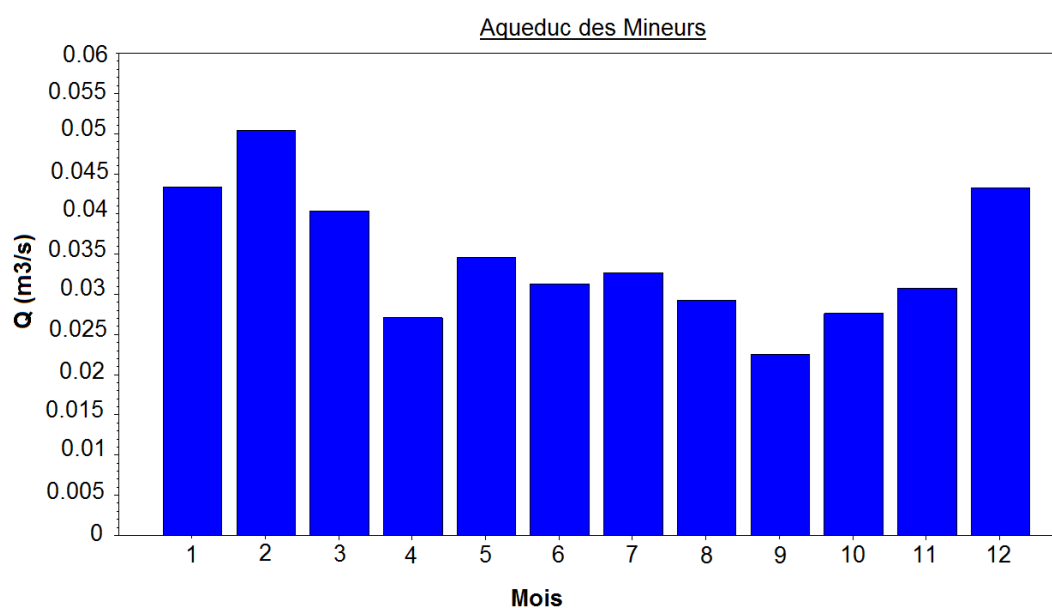
Annexe 3 : Répertoire de l'ensemble des données obtenues



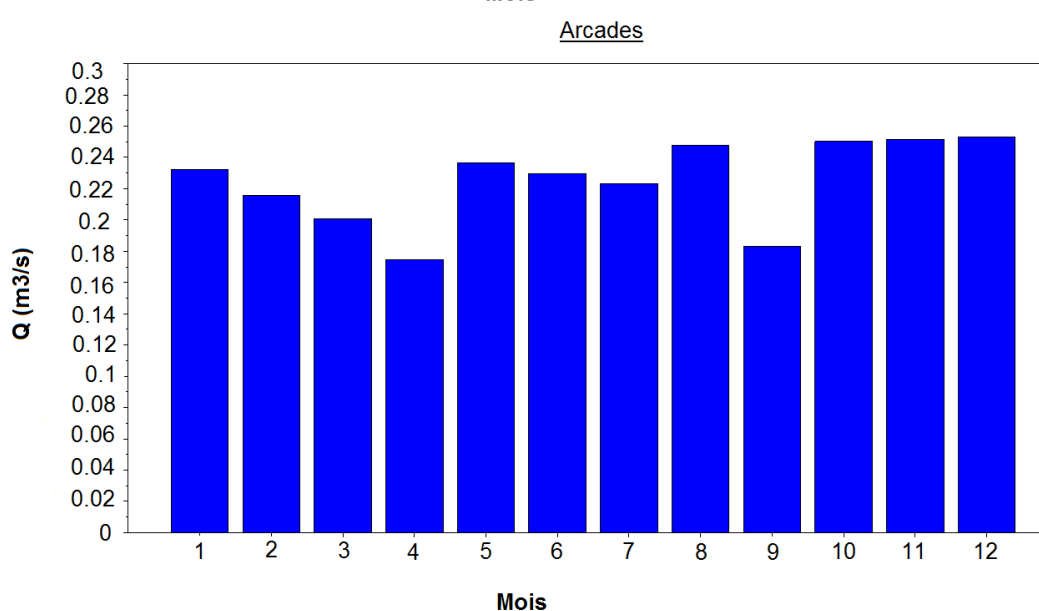
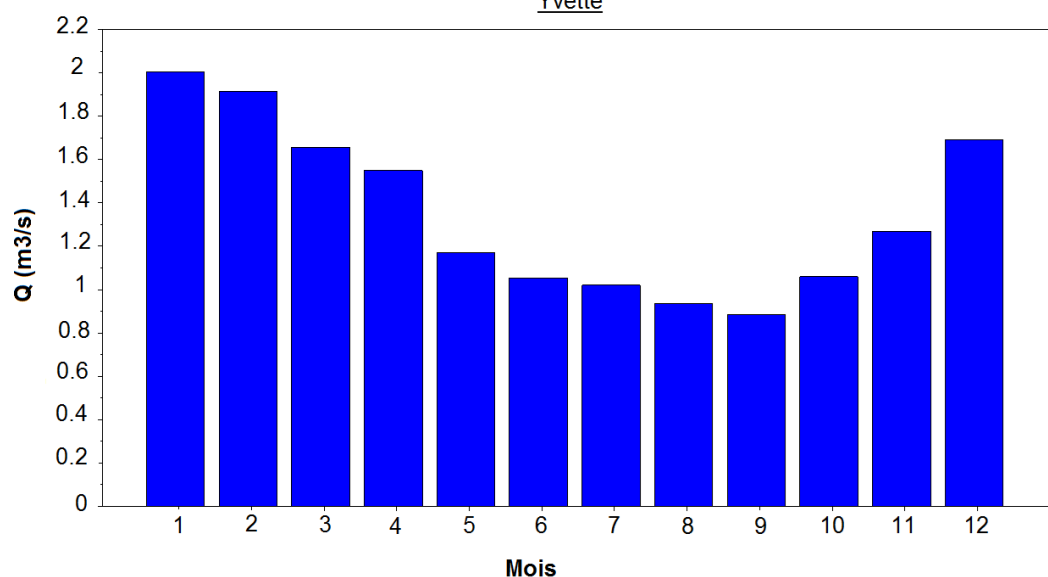
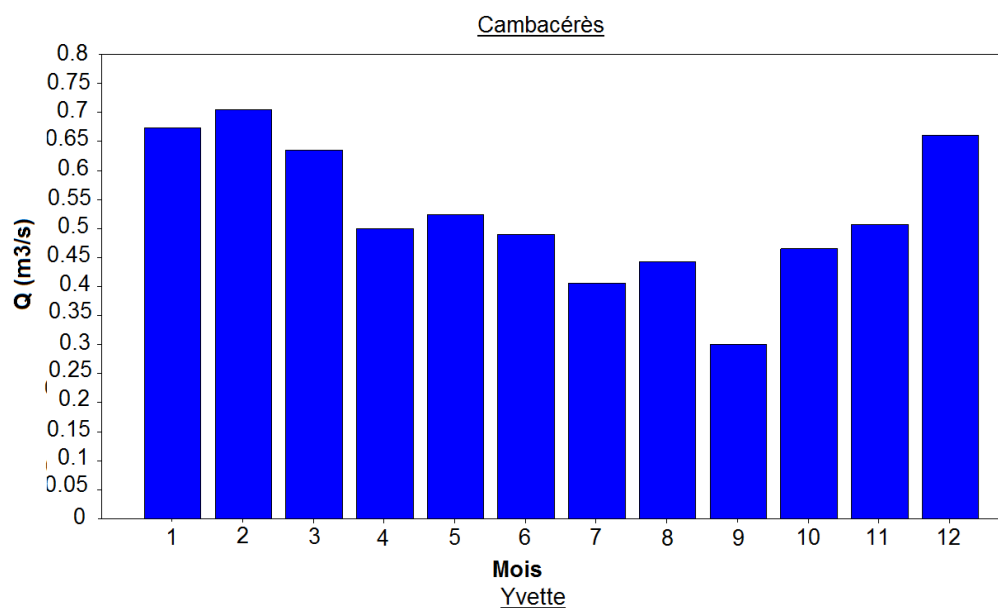
Annexe 4 : a) Variations pluviométriques annuelles des pluviomètres du centre du plateau (par météorologique du CEA Saclay, Saclay et Saint-Aubin)



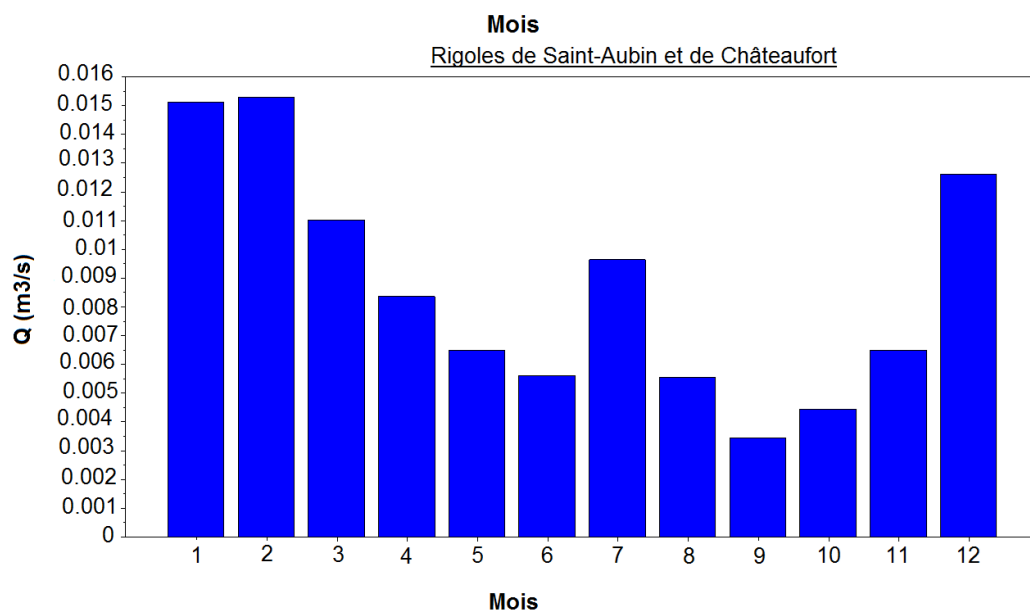
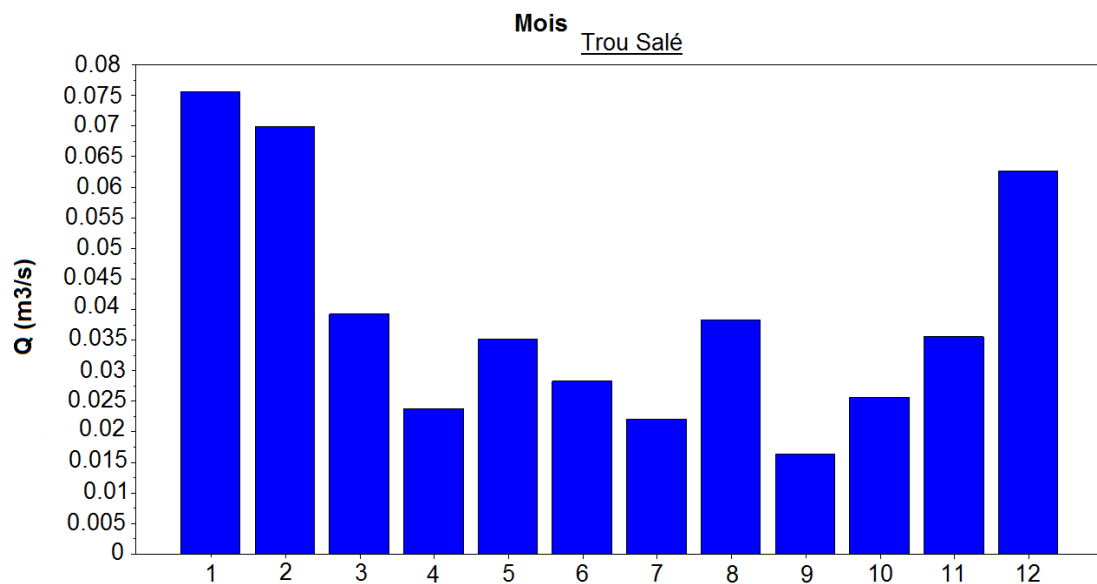
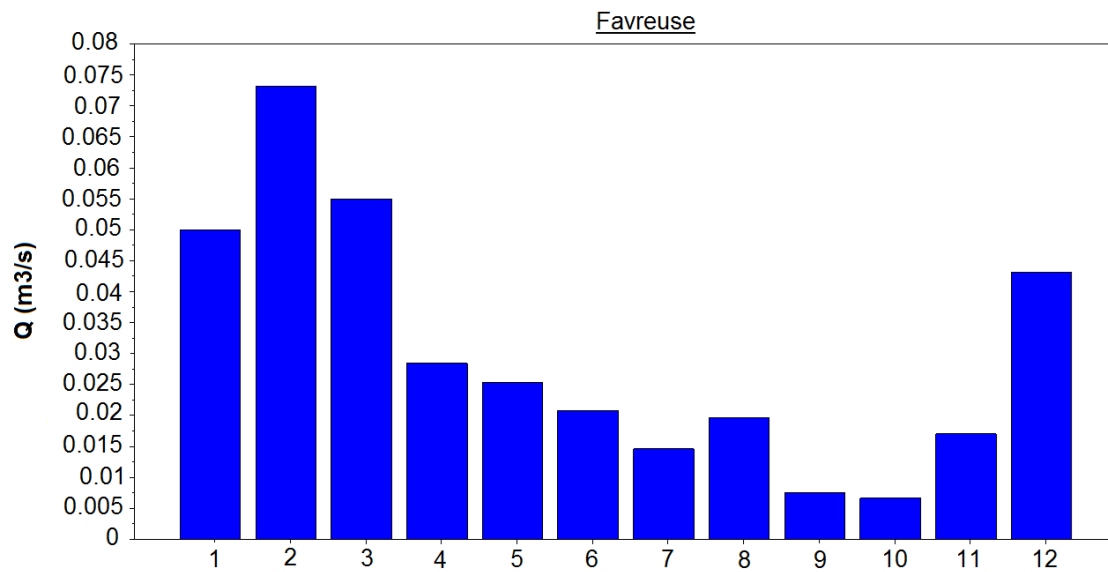
Annexe 4 : b) Variations pluviométriques annuelles des pluviomètres à l'Ouest du plateau



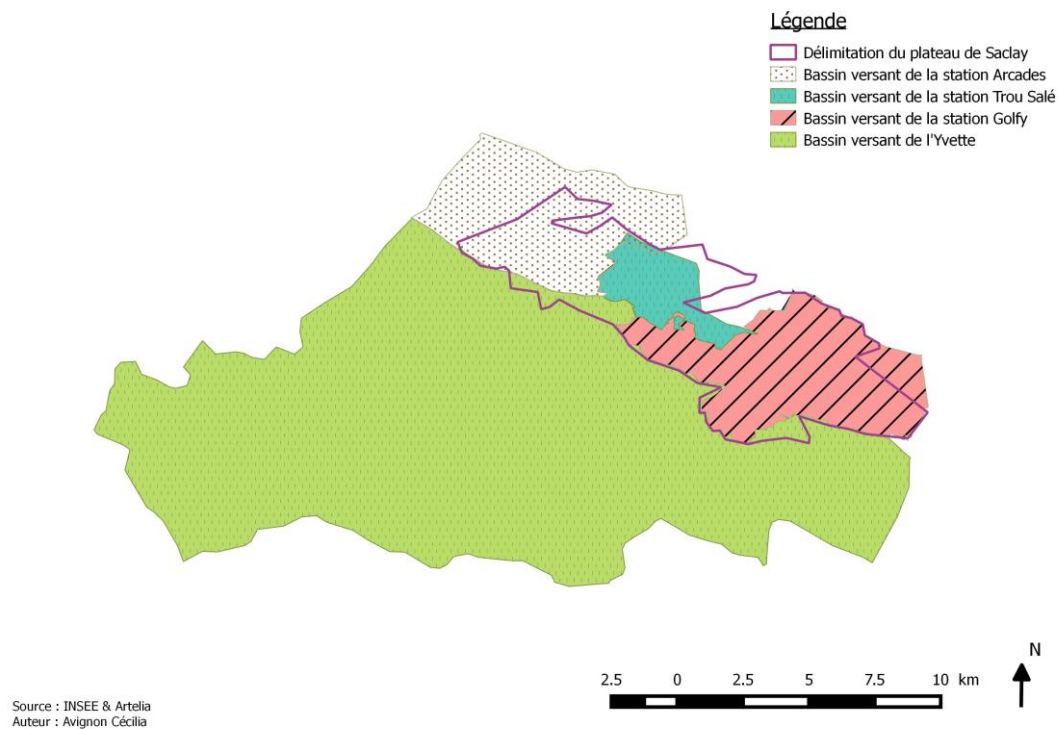
Annexe 5 : a) Evolution mensuelle des débits dans l'aqueduc des Mineurs



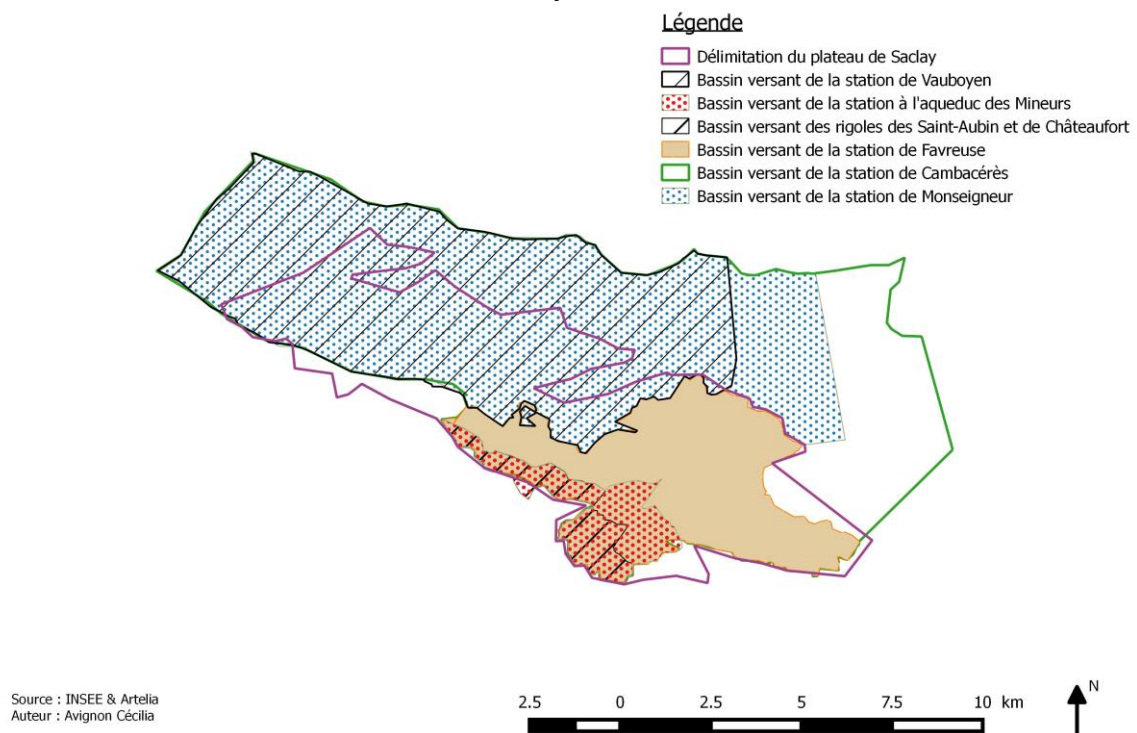
Annexe 5 : b) Evolution mensuelle des débits des rivières adjacentes au plateau



Annexe 5 : c) Evolution mensuelle des débits des rigoles et rus du plateau



Annexe 6 : a) Délimitation des bassins versants des stations d'Arcades, de Trou Salé, de Golfy et de l'Yvette



Annexe 6 : b) Délimitation des bassins versants de la station de Vauboyen, de l'aqueduc des Mineurs, des rigoles de Saint-Aubin et de Châteaufort, de Favreuse, de Monseigneur et de Cambacérès

	Evènement de recharge	Date	h2	h1	l (mm)	Somme pluies	Dh (m)	Dh (mm)	Sy	l (mm)	Commentaires	Commentaires	URBS
	1	01/01 1h au 01/01 16h	154.73	154.80	2.10	0.6	0.11	109.09	0.03	3.27		Incohérence en Sy=0.19 n'existe plus en Sy=0.03	5.031
	2	03/01 1h au 03/01 21h	154.74	154.74	0.00	1.4	0.08	81.82	0.03	2.45	Plat		0.935
	3	06/01 11h au 07/01 16h	154.73	154.73	0.00	0.1	0.02	15.91	0.03	0.48	Plat		0.000
	4	08/01 14h au 10/01 20h	154.70	154.70	0.00	3.9	0.06	63.64	0.03	1.91	Plat		0.002
	82	11/01 18h au 13/01 08h	154.67	154.69	0.60	3.9	0.02	22.73	0.03	0.68			0.401
	5	14/01 16h au 16/01 13h	154.68	154.74	1.80	8.3	0.06	63.64	0.03	1.91			8.980
	6	18/01 8h au 19/01 3h	154.70	154.71	0.30	8.8	0.01	13.64	0.03	0.41			0.302
	x1	20/01 21h au 21/01 15h	154.65	154.65	0.00	6.9	0.03	31.82	0.03	0.95	Plat		0.67
	7	22/01 12h au 24/01 6h	154.64	154.81	5.10	2	0.17	168.18	0.03	5.05		Incohérence en Sy=0.19 n'existe plus en Sy=0.03	1.28
	8	27/01 02h au 27/01 17h	154.74	154.87	3.90	2	0.14	136.36	0.03	4.09		Incohérence en Sy=0.19 n'existe plus en Sy=0.03	0.73
	9	30/01 1h au 30/01 18h	154.78	154.86	2.40	3.6	0.09	86.36	0.03	2.59		Incohérence en Sy=0.19 n'existe plus en Sy=0.03	2.40
	10	01/02 3h au 01/02 21h	154.69	154.92	6.90	8.6	0.26	263.64	0.03	7.91		Incohérence en Sy=0.19 n'existe plus en Sy=0.03	7.29
	11	04/02 21h au 06/02 15h	154.66	154.70	1.20	9.3	0.09	86.36	0.03	2.59			5.24
	12	07/02 11h au 07/02 23h	154.65	154.65	0.00	0	0.01	13.64	0.03	0.41	Plat		0.93
	13	09/02 16h au 11/02 10h	154.59	154.78	5.70	15.7	0.20	195.45	0.03	5.86		Incohérence en Sy=0.19 n'existe plus en Sy=0.03	4.65
	14	13/02 18h au 15/02 04h	154.61	154.61	0.00	4.8	0.05	50.00	0.03	1.50	Plat		1.84
	15	26/02 14h au 28/02 19h	154.39	154.44	1.50	1.4	0.09	86.36	0.03	2.59			0.62
	x2	03/03 6h au 03/03 14h	154.43	154.43	0.00	0.1	0.05	51.06	0.03	1.53	Plat		0.00
	16	03/03 14h au 05/03 8h	154.43	154.44	0.30	0.1	0.02	17.02	0.03	0.51			0.00
	17	09/03 7h au 14/03 3h	154.40	154.59	5.70	25.7	0.20	204.26	0.03	6.13		Incohérence en Sy=0.19 n'existe plus en Sy=0.03	16.43
	x3	14/03 7h au 14/03 13h	154.58	154.59	0.30	0.2	0.03	25.53	0.03	0.77			0.23
	18	14/03 14h au 15/03 5h	154.59	154.66	2.10	0.1	0.10	102.13	0.03	3.06		Cohérent avec la pluie à 6 jours	0.00
	19	15/03 12h au 16/03 15h	154.65	154.65	0.00	4.1	0.02	17.02	0.03	0.51	Plat		0.00
	20	16/03 20h au 17/03 22h	154.64	154.64	0.00	8	0.03	25.53	0.03	0.77	Plat		0.64
	21	19/03 00h au 19/03 19h	154.59	154.59	0.00	3.2	0.03	34.04	0.03	1.02	Plat		2.51
	22	19/03 19h au 20/03 6h	154.59	154.62	0.90	3.5	0.04	42.55	0.03	1.28			1.87
	23	21/03 1h au 22/03 22h	153.93	153.93	0.00	0.4	0.03	34.04	0.03	1.02	Plat		0.26
	24	29/03 3h au 30/03 3h	153.78	153.78	0.00	0	0.04	42.55	0.03	1.28	Plat à supprimer		0.00
	25	31/03 6h au 01/04 17h	153.74	153.74	0.00	0	0.05	51.06	0.03	1.53	Plat à supprimer		0.00
	26	02/04 23h au 04/04 21h	153.70	153.70	0.00	5.6	0.06	59.57	0.03	1.79	Plat		0.00
	27	06/04 15h au 07/04 8h	153.63	153.63	0.00	0.2	0.03	25.53	0.03	0.77	Plat		0.00
	28	07/04 8h au 09/04 16h	153.63	153.68	1.50	14.2	0.05	51.06	0.03	1.53			1.71
	29	10/04 16h au 12/04 15h	153.66	153.70	1.20	14.5	0.04	42.55	0.03	1.28			10.71
	30	14/04 00h au 15/04 5h	153.68	153.71	1.05	0.2	0.03	34.04	0.03	1.02			1.67
	31	15/04 8h au 16/04 10h	153.71	153.71	0.00	0	0.08	76.60	0.03	2.30	Plat		0.00
	x4	16/04 12h au 17/04 9h	153.70	153.70	0.00	0	0.04	42.55	0.03	1.28	Plat		0.00
	32	17/04 11h au 18/04 00h	153.70	153.72	0.60	0	0.03	25.53	0.03	0.77			0.00
	33	20/04 10h au 21/04 17h	153.65	153.67	0.60	0	0.04	42.55	0.03	1.28			0.00
	x5	23/04 21h au 24/04 22h	153.61	153.61	0.00	0	0.07	68.09	0.03	2.14	Plat à supprimer		0.00
	34	25/04 20h au 26/04 17h	153.60	153.62	0.60	0.6	0.02	17.02	0.03	0.51			0.00
	35	29/04 14h au 30/04 22h	153.57	153.57	0.00	4.3	0.04	42.55	0.03	1.28	Plat		0.00
	36	01/05 5h au 03/05 16h	153.57	153.57	0.00	3.6	0.03	33.33	0.03	1.00	Plat		4.55
	37	05/05 11h au 07/05 13h	153.54	153.54	0.00	2.4	0.02	20.00	0.03	0.60	Plat		0.00
	x6	07/05 23h au 08/05 17h	153.53	153.54	0.30	2.4	0.01	13.33	0.03	0.40			0.00
	x7	10/05 08h au 11/05 15h	153.49	153.49	0.00	0.3	0.04	40.00	0.03	1.20	Plat		0.00
	38	12/05 13h au 14/05 01h	153.47	153.47	0.00	1.4	0.03	26.67	0.03	0.80	Plat		0.00
	39	14/05 1h au 15/05 01h	153.47	153.50	0.90	1.2	0.03	33.33	0.03	1.00			0.00
	x8	12/05 13h au 13/05 19h	153.47	153.47	0.00	0.3	0.04	40.00	0.03	1.20	Plat		0.00
	40	18/05 00h au 19/05 2h	153.42	153.46	1.20	18.2	0.07	66.67	0.03	2.00			1.40
	41	19/05 4h au 21/05 19h	153.43	153.76	9.90	41.6	0.33	333.33	0.03	10.00		Incohérence en Sy=0.19 n'existe plus en Sy=0.03	43.30
	42	22/05 16h au 23/05 6h	153.71	153.74	0.90	5.2	0.04	40.00	0.03	1.20			7.23
	x9	23/05 16h au 24/05 12h	153.72	153.72	0.00	11.4	0.03	33.33	0.03	1.00	Plat		6.94
	x10	25/05 19h au 27/05 11h	153.70	153.70	0.00	3.9	0.06	60.00	0.03	1.80	Plat		4.32
Année 2013	43	27/05 16h au 29/05 9h	153.70	153.71	0.30	8.1	0.02	20.00	0.03	0.60			3.04
	x11	29/05 21h au 30/05 13h	153.69	153.69	0.00	9.5	0.03	26.67	0.03	0.80	Plat		0.76
	44	30/05 14h au 31/05 19h	153.69	153.72	0.90	8.9	0.03	33.33	0.03	1.00			9.14
	83	03/06 7h au 05/06 14h	153.67	153.67	0.00	0	0.04	40.00	0.03	1.20	Plat		0
	45	08/06 18h au 09/06 9h	153.61	154.12	15.30	35.7	0.52	520.00	0.03	15.60		Incohérence en Sy=0.19 n'existe plus en Sy=0.03	6.82
	84	14/06 00h au 15/06 3h	153.82	153.82	0.00	0	0.03	33.33	0.03	1.00	Plat		1.79
	46	17/06 7h au 17/06 18h	153.77	153.99	6.60	2.9	0.22	220.00	0.03	6.60		Incohérence en Sy=0.19 n'existe plus en Sy=0.03	2.5
	47	19/06 04h au 19/06 19h	153.91	154.26	10.50	19	0.37	366.67	0.03	11.00		Incohérence en Sy=0.19 n'existe plus en Sy=0.04	6.42
	48	21/06 00h au 21/06 03h	154.10	154.26	4.80	0	0.17	173.33	0.03	5.20		Incohérence en Sy=0.19 n'existe plus en Sy=0.05	2.14
	49	01/07 4h au 03/07 3h	153.70	153.70	0.00	1	0.08	83.33	0.03	2.50	Plat		0
	50	23/07 12h au 23/07 21h	153.35	153.38	0.90	2.2	0.04	41.67	0.03	1.25			1
	51	26/07 4h au 27/07 11h	153.34	153.42	2.40	17.5	0.125	125.00	0.03	3.75		Cohérent avec la pluie à 6 jours	1.82
	52	07/08 5h au 07/08 16h	153.22	153.26	1.20	1.5	0.08	83.33	0.03	2.50			0.81
	53	25/08 00h au 25/08 20h	152.99	153.06	2.10	8.4	0.08	83.33	0.03	2.50			2.72
	54	03/09 4h au 06/09 00h	152.88	152.88	0.00	2.3	0.03	26.67	0.03	0.80	Plat		0
	55	09/09 07h au 09/09 19h	152.82	152.84	0.60	5.5	0.03	26.67	0.03	0.80			0.56
	56	13/09 15h au 15/09 11h	152.79	152.87	2.40	19.3	0.09	93.33	0.03	2.80			7.21
	x12	15/09 11h au 15/09 23h	152.87	152.87	0.00	2.8	0.05	53.33	0.03	1.60	Plat		2.6
	57	15/09 23h au 16/09 18h	152.87	152.89	0.60	5	0.01	13.33	0.03	0.40			4.12
	x13	17/09 4h au 17/09 18h	152.88	152.88	0.00	5	0.05	53.33	0.03	1.60	Plat		2.650
	58	17/09 18h au 18/09 3h	152.87	152.91	1.20	5.6	0.03	26.67	0.03	0.80			1.86
	59	22/09 22h au 25/09 8h	152.77	152.77	0.00	0.6	0.05	53.33	0.03	1.60	Plat à supprimer		0
	60	26/09 9h au 28/09 12h	152.74	152.74	0.00	2.7	0.04	40.00	0.03	1.20	Plat		0
	61	28/09 20h au 30/09 9h	152.74	153.04	9.00	44.5	0.31	306.67	0.03	9.20		Cohérent avec la pluie à 6 jours	11.6
	62	03/10 22h au 05/10 8h	152.98	153.04	1.80	7.3	0.08	80.00	0.03	2.40			4.58
	x14	08/10 6h au 09/10 12h	152.96	152.96	0.00	5.2	0.05	53.33	0.03	1.60	Plat		0
	63	09/10 12h au 10/10 05h	152.96	153	1.20	6.9	0.05	53.33	0.03	1.60			0.77
	64	14/10 17h au 15/10 13h	152.94	152.98	1.20	2.7	0.04	40.00	0.03	1.20			0.31
	65	16/10 14h au 19/10 05h	152.97	153.02	1.50	70	0.05	53.33	0.03	1.60			6.39
	x15	19/10 14h au 21/10 02h	153	153	0.00	6.6	0.05	53.33	0.03	1.60			3.2
	66	21/10 23h au 23/10 3h	152.99	153.03	1.20	11.2	0.05	53.33	0.03	1.60			2.42
	67	24/10 9h au 25/10 11h	152.99	153.02	0.30	2.7	0.01	13.33	0.03	0.40			0.27
	68	26/10 14h au 28/10 19h	153	153.16	4.80	37.3	0.16	160.00	0.03	4.80		Cohérence avec la pluie de 6 jours	9.01
	69	01/11 13h au 02/11 11h	153.1	153.32	6.60	17.8	0.23	228.57	0.03	6.86		Cohérence avec la pluie de 6 jours	8.53
	70	03/11 20h au 04/11 11h	153.31	153.45	4.20	14.8	0.17	171.43	0.03	5.14		Cohérence avec la pluie de 6 jours	6.92
	71	05/11 11h au 05/11 23h	153.42										

Résumé

En raison des futurs aménagements du cluster Paris-Saclay, grand projet à intérêt national, la gestion de l'eau du plateau est devenue un enjeu primordial afin de maîtriser les risques d'inondations et les impacts sur la ressource en eau. Dans un tel contexte, il paraît nécessaire d'apporter des informations sur le fonctionnement hydrologique de cette zone d'étude. L'estimation du bilan hydrologique pluriannuel du plateau péri-urbain, à partir d'observations, semble très appropriée pour comprendre sa dynamique et répondre à plusieurs interrogations.

La récupération, la synthèse, l'analyse et la validation de l'ensemble des données utiles à l'évaluation du bilan ont permis de voir l'influence de plusieurs paramètres sur certains flux qui participent à sa détermination. En effet, les débits et les coefficients d'écoulement sont conditionnés par la pluviométrie, l'évapotranspiration, le taux et la répartition de l'urbanisation, la topographie, le fonctionnement des étangs ainsi que les prélèvements et rejets des activités anthropiques.

Cette étude a également permis d'évaluer la méthode des fluctuations des niveaux piézométriques pour estimer l'infiltration dans les formations superficielles et la recharge de la nappe des Sables de Fontainebleau et de les comparer à d'autres déterminations faites en amont du stage. Cette méthode présente des limites importantes liées à ses hypothèses simplificatrices et à l'utilisation d'un paramètre de « rendement spécifique » difficile à connaître.

L'analyse approfondie de tous les flux nécessaires ou participant au bilan hydrologique (précipitations, ETR, recharge, variation du stock d'eau souterrain et de sub-surface, coefficients d'écoulement, usages industriels etc.) ont permis de préciser la dynamique du plateau à différentes échelles. Le bilan a montré que l'évapotranspiration réelle ainsi que les écoulements dans les rivières sont prépondérants sur le plateau et que les autres flux et stocks restent assez faibles.

Cependant, l'estimation des bilans hydrologiques évolue beaucoup en fonction du volume de contrôle, de l'échelle de temps considérée ainsi que de la qualité et de la fiabilité des différents paramètres utilisés. Les incertitudes de mesures et de calculs restent non négligeables et sont à prendre en compte peu importe le cas d'étude.

Mots clés : Plateau, bilan, flux, péri-urbain, observations, volume de contrôle, échelle temporelle, gestion des ressources hydrologiques.