

ETUDE DE FAISABILITÉ

Réduction du risque inondation au droit du collège les Gâtines à Savigny- sur-Orge

**Approche sur la qualité du sol et sur le risque
inondation**

Par :

Adrien GARNIER
Emeline MONTEIL
Raphaël PIN
Hugo PINEAU

Encadré par :

M FLORENS
M GONZALEZ
M LARTAUD

M2 Sol, Eau, Environnement
Sorbonne Université
2021-2022



Résumé et objectifs

Le présent rapport s'inscrit dans le cadre de l'Unité d'Enseignement (UE) Gestion de projet dispensée par M Éric GONZALEZ. L'unité d'enseignement est divisée en 2 phases :

- Phase 1 : année 2020-2021 consacrée à la recherche d'un sujet et d'un client
- Phase 2 : année 2021-2022 consacrée à la phase opérationnelle du projet.

L'équipe Réduction Risque Inondation (RRI) constituée de 4 étudiants s'intéresse aux problématiques liées aux inondations urbaines. Un état de l'art relatif à ce sujet a notamment été réalisé lors de la phase 1 du projet. Ce rapport synthétise les actions réalisées dans le cadre de la phase 2 et répond aux interrogations qui découlent de la phase 1. Le rapport constitue l'étude de faisabilité du projet, relative à la qualité du sol, l'étude hydraulique du site étudié et aux propositions de dispositifs visant à réduire le risque inondation.

Les objectifs du projet ont été définis en collaboration avec le maître d'œuvre du projet : le Conseil départemental de l'Essonne (CD91). Un accord a été passé entre l'équipe RRI et le CD91 afin de s'engager à livrer une étude de faisabilité technique à l'issue du M2.

L'étude a permis de démontrer que réaménager la cour du collège les Gâtines permettrait de réduire le risque inondation, quels que soient les scénarios de pluie imaginés. Les aménagements proposés ont été chiffrés.

Table des matières

La réduction du risque inondation	1
I-Etat des lieux des connaissances relatives au risque inondation	2
1. Le risque inondation	2
2. Contexte réglementaire	2
II-Présentation de la zone d'étude	3
1. Collège des Gâtines	3
2. Géologie	5
3. Hydrogéologie	6
III- Etude du sol au droit du collège les Gâtines	8
1. Perméabilité du sol	9
2. Analyse du sol	12
2.1 Stratégie d'analyse	12
2.2 Réalisation et localisation des prélèvements	13
2.3 Prélèvements et conditionnements des échantillons de sols	14
2.4 Résultats d'analyses et interprétations	15
2.4.1 Précision sur les valeurs de référence	15
2.4.2 Résultats d'analyses dans les sols	15
2.5 Interprétations des résultats	17
2. Synthèse de l'étude du sol	17
IV- Propositions d'aménagements	17
1. Caractéristiques des aménagements envisageables	17
V-Modélisation hydraulique	20
1. Présentation de SWMM	20
2. Hypothèses du modèle et données d'entrées	23
3. Construction du modèle	24
3.1 Paramétrage du sol	24
3.2 Paramétrage des bassins versants	25
3.3 Paramétrage des nœuds	29
4. Conditions aux limites	30
5. Modèle hydrologique	32
6. Modèle d'évapotranspiration	33
7. Calage du modèle	34
8. Résultats du modèle	34

8.1 Modélisation du collège actuel	35
8.1.1 Scénario : pluie de PDR 1 an et durée 1h à l'état initial	35
8.1.2 Scénario : pluie de PDR 20 ans et durée 4h à l'état initial	38
8.1.3 Scénario : pluie de PDR 20 ans et durée 1h à l'état initial	40
8.1.4 Synthèse des résultats de la modélisation à l'état initial	43
8.2 Modélisation avec les LIDS proposés par le collège	44
8.2.1 Scénario : pluie de PDR 1 an et durée 1h - LIDS proposés par le collège	46
8.2.2 Scénario : pluie de PDR 20 ans et durée 4h - LIDS proposés par le collège	48
8.2.3 Scénario : pluie de PDR 20 ans et durée 1h - LIDS proposés par le collège	51
8.2.4 Synthèse des résultats de la modélisation avec les LIDS proposés par le collège	53
8.3 Proposition d'aménagements par l'équipe RRI	54
8.3.1 Scénario : pluie de PDR 1 an et durée 1h - LIDS proposés par l'équipe	55
8.3.2 Scénario : pluie de PDR 20 ans et durée 4h - LIDS proposés par l'équipe	57
8.3.3 Scénario : pluie de PDR 20 ans et durée 1h - LIDS proposés par l'équipe	59
8.3.4 Synthèse des résultats de la modélisation avec les LIDS proposés par l'équipe	61
VI- Coût des aménagements	62
1. Chiffrage des aménagements envisagés par le collège	62
2. Chiffrage des aménagements envisagés par l'équipe RRI	62
VII- Pérenniser la lutte contre le risque inondation	64
Conclusion	66
Bibliographie	67
ANNEXES	70

Table des figures

Figure 1 : Organigramme du projet Réduction Risque Inondation.....	3
Figure 2 : Carte de la cour de collège les Gâtines avant et après aménagements d'après les propositions du projet "Mon collège demain"	4
Figure 3 : Log géologique au droit du collège les Gâtines - point BSS 000RNBT	5
Figure 4 : Entités hydrogéologiques affleurantes au droit du collège les Gâtines - BDLISA	6
Figure 5 : Carte des points BSS au nord et au sud du collège les Gâtines - [Géoportail].....	7
Figure 6 : Profil en long de la topographie et de la cote de la nappe - hypothèse de non-linéarité de la cote de la nappe.....	8
Figure 7 : Profil en long de la topographie et de la cote de la nappe - hypothèse de linéarité de la cote de la nappe	8
Figure 8 : Répartition en pourcentage du temps de travail - étude du sol.....	9
Figure 9 : Emplacement des essais Porchet réalisés au sein de la cour du collège les Gâtines	9
Figure 10 : Volume d'eau ajouté au cours du temps - point n°2.....	10
Figure 11 : Volume d'eau ajouté au cours du temps - point n°3.....	11
Figure 12 : Volume d'eau ajouté au cours du temps - point n°4.....	11
Figure 13 : Carte de la localisation des sondages au droit de la cour du collège les Gâtines	14
Figure 14 : Répartition en pourcentage du temps de travail – modélisation hydraulique.....	20
Figure 15 : Schéma pour résolution explicite – [15].....	23
Figure 16 : Encrassement au niveau des réseaux de collecte d'eau pluviale du collège les Gâtines	24
Figure 17 : Calcul de l'altitude au droit du collège les Gâtines – [QGIS]	26
Figure 18 : Carte des bassins versants topographique du collège les Gâtines – [QGIS]	26
Figure 19 : Carte des sous-bassins versants urbains du collège les Gâtines – [SWMM].....	27
Figure 20 : Carte de l'imperméabilisation des sous-bassins versants urbains du collège les Gâtines – [SWMM].....	27
Figure 21 : Carte de la pente sur le collège les Gâtines – [SWMM].....	28
Figure 22 : Carte des noeuds du collège les Gâtines – [SWMM].....	30
Figure 23 : Pluie de période de retour 1 an et durée 1h	31
Figure 24 : Pluie de période de retour 20 ans et durée 1h.....	31
Figure 25 : Pluie de période de retour 20 ans et durée 4h.....	31
Figure 26 : Paramètres du sol pour le modèle Green et Ampt dans le logiciel SWMM.....	33
Figure 27 : Graphique de l'évolution de l'évapotranspiration potentielle dans l'année	33
Figure 28 : Ruissellement pour la modélisation du collège en état actuel – pluie de PDR 1 an et durée 1 heure.....	36

Figure 29 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au J20	36
Figure 30 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au O2	37
Figure 31 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J2 au O2	37
Figure 32 : Ruissellement pour la modélisation du collège en état actuel – pluie de PDR 20 ans et durée 4 heures	38
Figure 33 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au J20	39
Figure 34 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au O2	39
Figure 35 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J2 au O2	40
Figure 36 : Ruissellement pour la modélisation du collège en état actuel – pluie de PDR 20 ans et durée 1 heure.....	41
Figure 37 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au J20	41
Figure 38 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au O2	42
Figure 39 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J2 au O2	42
Figure 40 : Ruissellement pour la modélisation du collège avec les LIDS proposés par le collège – pluie de PDR 1 an et durée 1 heure.....	46
Figure 41 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au J20	47
Figure 42 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au O2	48
Figure 43 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J2 au O2	48
Figure 44 : Ruissellement pour la modélisation du collège avec les LIDS proposés par le collège – pluie de PDR 20 ans et durée 4 heures.....	49
Figure 45 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au J20	49
Figure 46 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au O2	50
Figure 47 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J2 au O2	50
Figure 48 : Ruissellement pour la modélisation du collège avec les LIDS proposés par le collège – pluie de PDR 20 ans et durée 1 heure	51
Figure 49 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au J20	52
Figure 50 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au O2	52
Figure 51 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J2 au O2	53
Figure 52 : Carte de la cour de collège les Gâtines avant et après aménagements – propositions de l'équipe	54
Figure 53 : Ruissellement pour la modélisation du collège avec les LIDS proposés par l'équipe – pluie de PDR 1 an et durée 1 heure.....	55
Figure 54 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au J20	56
Figure 55 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au O2	56
Figure 56 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J2 au O2	57
Figure 57 : Ruissellement pour la modélisation du collège avec les LIDS proposés par l'équipe – pluie de PDR 20 ans et durée 4 heures.....	57

Figure 58 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au J20	58
Figure 59 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au O2	58
Figure 60 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J2 au O2	59
Figure 61 : Ruissellement pour la modélisation du collège avec les LIDS proposés par l'équipe – pluie de PDR 20 ans et durée 1 heure	59
Figure 62 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au J20	60
Figure 63 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au O2	60
Figure 64 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J2 au O2	61

Table des tableaux

Tableau 1 : Perméabilité du sol au droit des points n°1, 2, 3 et 4	11
Tableau 2 : Grille des paramètres analysés, échantillons et objectifs	14
Tableau 3 : Synthèses des résultats d'analyses des sondages	16
Tableau 4 : Fiche descriptive de la noue végétale.....	18
Tableau 5 : Fiche descriptive de la structure réservoir	19
Tableau 6 : Propriétés hydriques de sols selon leurs textures : K, conductivité hydraulique à saturation, en mm/h : ψ , succion en mm : Φ , porosité : CC, capacité au champ : PF, point de flétrissement – [18]	25
Tableau 7 : Tableau descriptif des sous-bassins versants du collège les Gâtines	29
Tableau 8 : Coefficient de Montana estimé pour des durées de 30 minutes à 4 heures, en mm/h, avec le débit en minutes – [Christian ROUX].....	30
Tableau 9 : Synthèse des trois scénarios de pluie au niveau des sous-bassins versants de la cour– état actuel.....	43
Tableau 10 : Paramètres des LIDS utilisés – [21].....	45
Tableau 11 : Caractéristiques et paramètres des LIDS – aménagements proposés par le collège	46
Tableau 12 : Synthèse des trois scénarios de pluie au niveau des LIDS de la cour – aménagements proposés par le collège.....	53
Tableau 13 : Synthèse des trois scénarios de pluie au niveau des sous-bassins versants de la cour – aménagements proposés par le collège	54
Tableau 14 : Caractéristiques et paramètres des LIDS – aménagements proposés par l'équipe	55
Tableau 15 : Synthèse des trois scénarios de pluie au niveau des LIDS de la cour – aménagements proposés par l'équipe	61
Tableau 16 : Synthèse des trois scénarios de pluie au niveau des sous-bassins versants de la cour – aménagements proposés par l'équipe	62
Tableau 10 : Chiffrage de l'aménagement d'une noue végétalisé	63
Tableau 11 : Chiffrage de l'aménagement d'un espace végétalisé	63
Tableau 12 : Chiffrage de l'aménagement d'un amphithéâtre à pavés drainants.....	64
Tableau 13 : Chiffrage de l'aménagement d'une cour à pavés drainants.....	64
Tableau 21 : Rétroplanning de la 2 ^{ème} année de projet tuteuré	65

Abréviations

BRGM :	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
BSS :	Banque des Sous-Sol
EMH :	Éléments de modélisation hydraulique
EPA :	Environmental Protection Agency
ETM :	Éléments traces métalliques
CAUE :	Conseil d'Architecture d'Urbanisme et de l'Environnement
CD91 :	Conseil Départemental de l'Essonne
CLC :	CORINE Land Cover
CLIM :	Conditions aux limites
CFL :	Courant Friedrich-Levy (nombre de courant)
CNRS :	Centre National de la Recherche Scientifique
HT :	Hors Taxes
ISDI :	Installation de stockage de déchets inertes
LIDS :	Low Impact Development System
LQ :	Limite de Quantification
MNT :	Modèle Numérique de Terrain
NGF :	Nivellement Général de la France
PDR :	Période De Retour
PLU :	Plan Local d'Urbanisme
RRI :	Réduction Risque Inondation
SAGE :	Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SCS :	Soil Conservation System
SI :	Système International
SNGRI :	Stratégie Nationale de Gestion des Risques d'Inondation
SWMM :	Storm Water Management Model
UE :	Unité d'Enseignement
US :	United State

La réduction du risque inondation

L'artificialisation des sols a de nombreuses conséquences sur l'environnement. Depuis la fin du 20^{ème} siècle, l'artificialisation des sols augmente en France aux dépens des surfaces agricoles [1]. Dans ce contexte, l'État français a édicté un texte de loi visant à contrer ce phénomène. La loi Climat et résilience n° 2021-1104 fixe un objectif de « *zéro artificialisation nette* » d'ici 2050 [2].

Les principales conséquences de l'anthropisation des milieux naturels sont la création d'îlots de chaleur, la fragmentation des milieux, la disparition de la biodiversité, la pollution chimique, l'eutrophisation ou encore l'imperméabilisation des sols. Cette dernière problématique est prépondérante dans les zones fortement urbanisées. Entre autres, l'imperméabilisation des sols augmente le ruissellement de l'eau pluviale qui peut provoquer des inondations quand les réseaux de collecte d'eau pluviale sont sous-dimensionnés ou quand les intempéries sont trop importantes.

Dans le cadre de l'UE Gestion de projet, le groupe Réduction du Risque Inondation a travaillé sur ce phénomène au niveau du Collège les Gâtines à Savigny-sur-Orge avec l'appui du Conseil Départemental de l'Essonne. Le présent rapport détaille l'étude réalisée et aboutie suite aux deux années de travail effectué dans le cadre du Master Sol, Eau, Environnement.

I-Etat des lieux des connaissances relatives au risque inondation

1. Le risque inondation

Les inondations sont le premier risque naturel en France [3]. Plus de 17 millions de Français sont concernés par ce risque, dont 16,8 millions en France métropolitaine. Entre autres, les inondations peuvent provoquer des pertes de vies humaines, des déplacements de populations, des dégâts sur les infrastructures, des impacts sur l'environnement, etc. Divers phénomènes sont susceptibles de provoquer des inondations, à savoir :

- les crues ou débordements de cours d'eau ;
- les submersions marines ;
- les remontées de nappe phréatique ;
- le ruissellement.

L'inondation par ruissellement se produit quand les eaux pluviales ne peuvent pas s'infiltrent dans le sol et/ou lorsque les réseaux de collecte d'eau pluviale sont sous-dimensionnés. L'origine de ce type d'inondation est un phénomène météorologique important tel qu'une pluie de forte intensité ou un cumul de précipitations sur une courte période de temps [4]. En outre, d'après le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), "*les épisodes de précipitations extrêmes deviendront très probablement plus intenses et fréquents [...] d'ici la fin de ce siècle, en lien avec l'augmentation de la température moyenne en surface*" [5].

L'artificialisation des sols provoque entre autres une imperméabilisation et par conséquent une augmentation du ruissellement de surface. Les zones urbaines, fortement artificialisées, sont principalement touchées par ce phénomène et sont par conséquent sujettes au risque inondation.

2. Contexte réglementaire

La directive européenne 2007/60/CE (directive inondation), donne le cadre général dans lequel les États de l'Union Européenne définissent leur politique de gestion du risque inondation [6]. Dans le contexte de l'application de cette directive, la France s'est dotée d'une stratégie proactive en matière de prévention des inondations sur l'ensemble des territoires à risques [7]. Ainsi le plan d'action de la Stratégie Nationale de Gestion des Risques d'Inondation (SNGRI)

a été mis en place. L'un des objectifs prioritaires de la SNGRI est d'augmenter la sécurité des populations exposées. Pour ce faire, il est primordial d'une part d'avoir une bonne connaissance des zones soumises au risque inondation et d'autre part de proposer des actions concrètes visant à limiter ce phénomène au maximum.

II-Présentation de la zone d'étude

1. Collège des Gâtines

La zone d'étude du présent rapport est le Collège les Gâtines situé à Savigny-sur-Orge dans le département de l'Essonne (91) en région Ile-de-France. La ville de Savigny-sur-Orge est située à 15 km au sud de Paris.

Le Collège les Gâtines se situe à une altitude comprise entre 89 et 93 m NGF, sur la parcelle cadastrale BH25. Il s'étend sur environ 1,8 hectare et dispose de plusieurs bâtiments ainsi qu'une cour de récréation en grande partie bétonnée. Ce collège accueille plus de 1 000 élèves, 65 enseignants et autres personnels travaillant sur place (équipe de direction, équipe médico-sociale, équipe administrative, personnels techniques, etc.).

Le collège est soumis à des inondations lors des fortes intempéries en été. La mauvaise construction du collège semble être à l'origine de ces problématiques. Par ailleurs, la cour est recouverte d'un enrobé imperméable et est en pente avec le collège en contrebas. Dans le contexte des inondations subies en période estivale, le collège a déposé sa candidature suite à manifestation d'intérêt du CD91. L'organigramme ci-dessous présente le rôle des acteurs du projet.

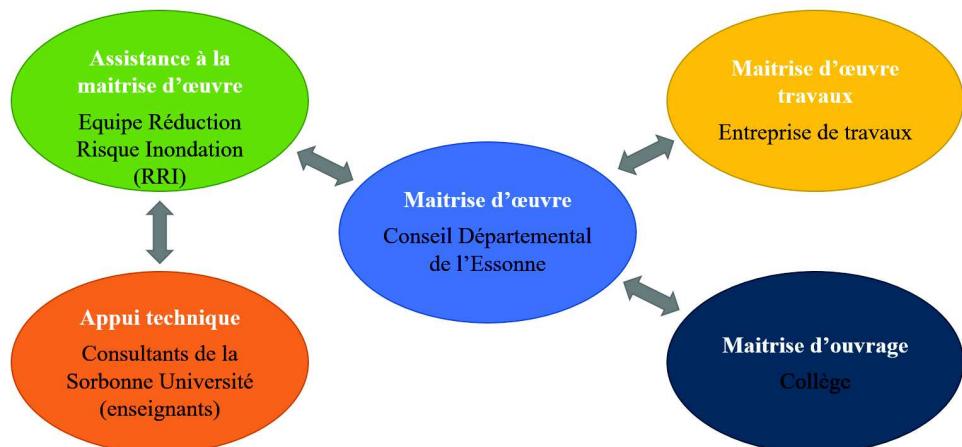


Figure 1 : Organigramme du projet Réduction Risque Inondation

La gestion des eaux pluviales au droit du collège s'inscrit dans le cadre du Plan Local d'Urbanisme de Savigny-sur-Orge. Selon le plan de zonage du PLU de Savigny-sur-Orge, le collège est situé en zone UE, à savoir une zone urbaine dédiée à l'accueil d'équipements et d'installations ou d'intérêt collectif. Le PLU stipule que le débit de ruissellement des eaux pluviales doit être limité à au plus 1 l/s par hectare de terrain aménagé, à cette fin il est stipulé que tout aménagement doit disposer d'au moins 550m³ à stocker pour un hectare aménagé (pour une pluie d'occurrence vicennale pour une durée de 4 heures) [8].

Pour lutter contre les problématiques d'inondation, le collège a proposé un projet de réaménagement de la cour. Le projet “*Mon collège demain*” propose trois idées visant à désimperméabiliser la cour de collège tout en améliorant le confort des élèves [9] :

- un espace végétalisé (structure réservoir) ;
- une noue végétale ;
- un amphithéâtre à pavés drainants (structure réservoir).

Les cartes ci-dessous présentent l'organisation de la nouvelle cour en suivant les propositions d'aménagement proposées par le projet “*Mon collège demain*”.



*Figure 2 : Carte de la cour de collège les Gâtines avant et après aménagements d'après les propositions du projet “*Mon collège demain*”*

Nota Bene : L'aménagement proposé ne tient pas en compte de l'efficacité d'infiltration. L'étude de la réduction du ruissellement et du risque inondation permettra de statuer sur l'efficacité du prototype.

2. Géologie

Pour déterminer la composition du sous-sol au droit du Collège les Gâtines, des données ont été récupérées sur des banques de données libres de droits. La Banque du Sous-Sol (BSS) du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) présente un log géologique de la zone d'étude [10].

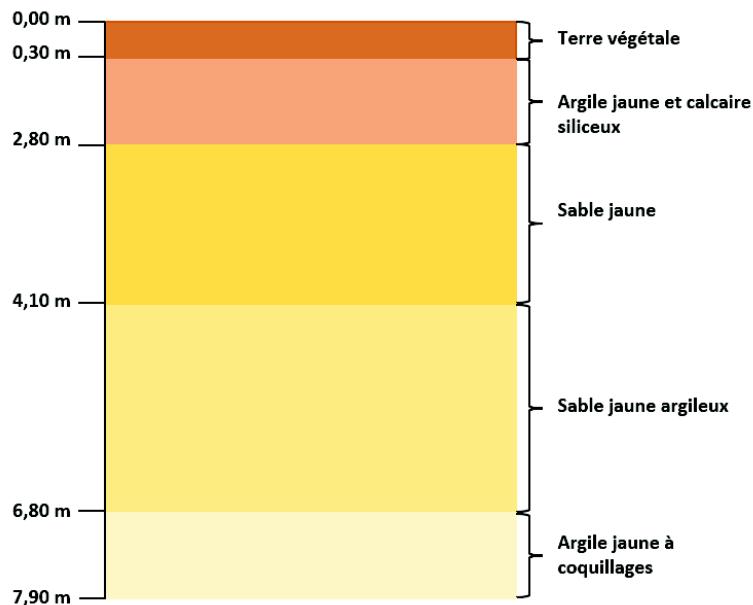


Figure 3 : Log géologique au droit du collège les Gâtines - point BSS 000RNBT

Le log géologique au droit du Collège les Gâtines (point BSS 000RNBT) indique les couches suivantes du haut vers le bas :

- **Terre végétale** : 0 à 0,3 m de profondeur ;
- **Argile jaune et calcaire siliceux** : 0,3 à 2,8 m de profondeur ;
- **Sable jaune** : 2,8 à 4,1 m de profondeur ;
- **Sable jaune argileux** : 4,1 à 6,8 m de profondeur ;
- **Argile jaune à coquillages** : 6,8 à 7,9 m de profondeur ;

Nota Bene : Lors de la construction du collège, le sol a peut-être été excavé par endroits, entraînant un mélange des couches du sol. En outre, des remblais ont également pu modifier la composition du sous-sol.

Les données BSS indiquent la présence de différentes formations géologiques de porosité et de perméabilité variables, au droit du collège les Gâtines.

3. Hydrogéologie

Les données hydrogéologiques sont importantes pour la réalisation d'un tel projet. D'une part, cela sert à vérifier les risques de contaminations de la nappe et d'autre part cela sert pour réaliser un modèle de la zone d'étude, comme il sera présenté par la suite. Pour ce faire, des données ont été récupérées sur des banques de données libres de droits.

D'après la Base de Donnée des Limites des Systèmes Aquifères (BDLISA), il y a deux entités hydrogéologiques affleurantes au droit du collège les Gâtines [11].

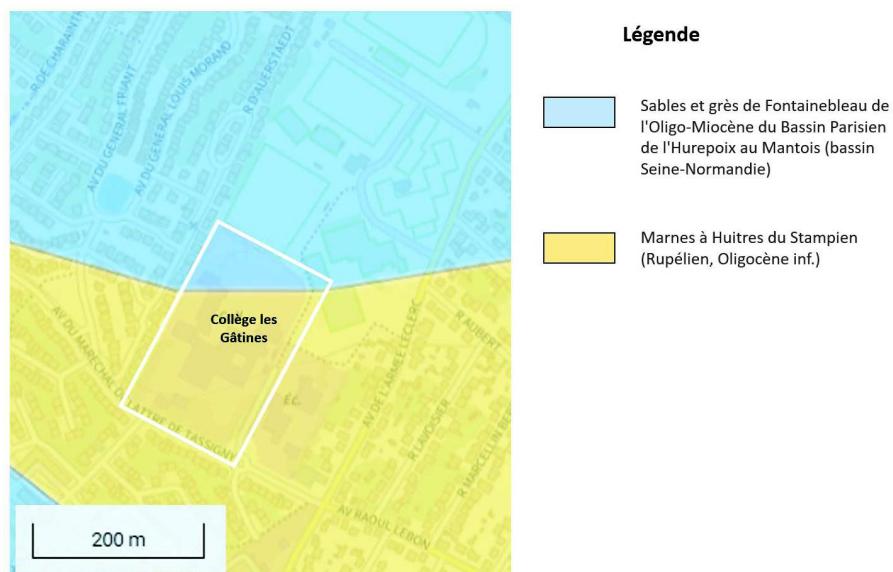


Figure 4 : Entités hydrogéologiques affleurantes au droit du collège les Gâtines - BDLISA

À noter que la cour du collège se situe au niveau de l'aquifère des sables de Fontainebleau, au nord du collège.

Le collège est situé entre deux points BSS, la carte ci-dessous présente les points BBS en question.



Figure 5 : Carte des points BSS au nord et au sud du collège les Gâtines - [Géoportail]

Les documents associés aux points BSS (cf. Annexe 2 et 3) présentent les caractéristiques des sondages réalisés. La cote de la nappe est à :

- 91,18 m au sondage nord (BSS 000RKQV) ;
- 83 m au sondage sud (BSS 000RNBT).

D'autre part, un Modèle Numérique de Terrain (MNT) issu de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) a été récupéré. La résolution de ce MNT est de 30 m. À partir de ces données, un profil altimétrique a été extrait sur ArcGIS et superpose la cote de la nappe. Grâce à ces données, la cote de la nappe libre a été estimée à une profondeur d'au minimum 3m sous la surface du sol. Cette profondeur est déterminée pour le niveau statique. Les documents indiquent que la profondeur de la nappe est à 5,5 m au point BSS nord et à 1,45 m au point BSS Sud. Des profils en long ont été tracés entre les deux points BSS selon deux hypothèses : non-linéarité de la cote de la nappe ; linéarité de la cote de la nappe.

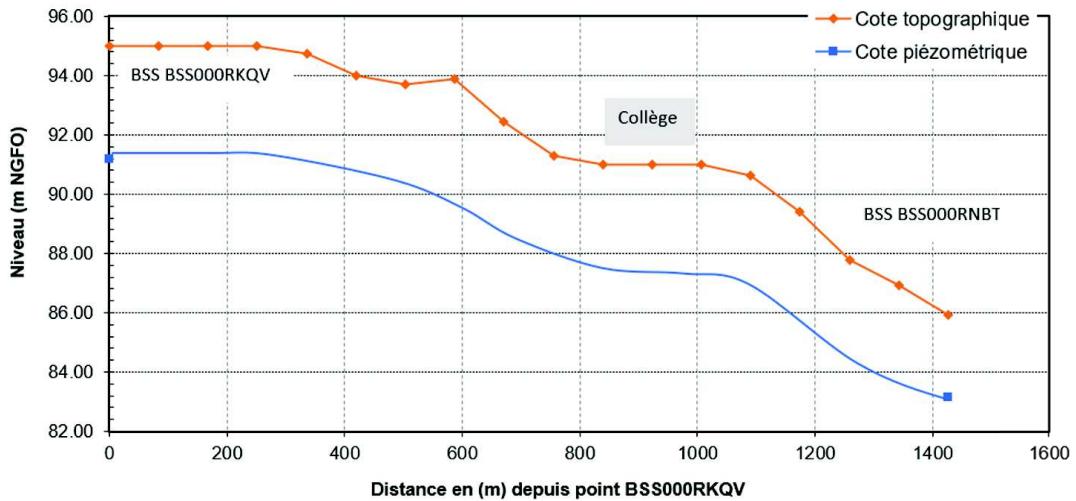


Figure 6 : Profil en long de la topographie et de la cote de la nappe - hypothèse de non-linéarité de la cote de la nappe

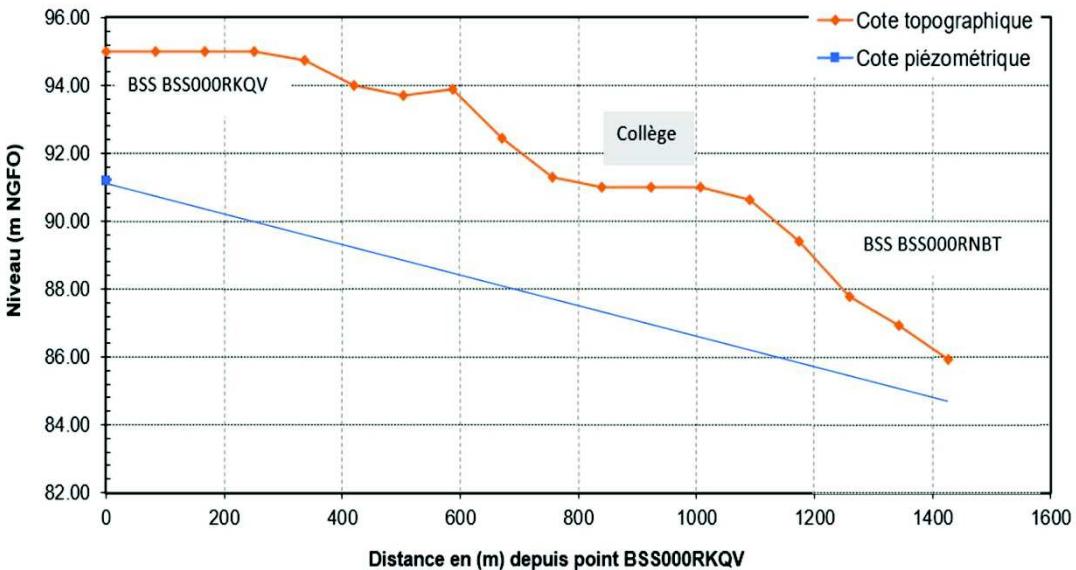


Figure 7 : Profil en long de la topographie et de la cote de la nappe - hypothèse de linéarité de la cote de la nappe

Après consultation avec l’hydrogéologue, Danielle VALDÈS, l’hypothèse de la nappe représentant une fonction linéaire sera retenue.

III- Etude du sol au droit du collège les Gâtines

Avant la réalisation de travaux d’aménagement de cour de collège dans l’optique de réduire le ruissellement et le risque inondation, une étude des sols (perméabilité et analyse du sol) a été réalisée. La figure ci-dessous présente la répartition en pourcentage du temps de travail par sous-thème pour la partie sur la qualité du sol.

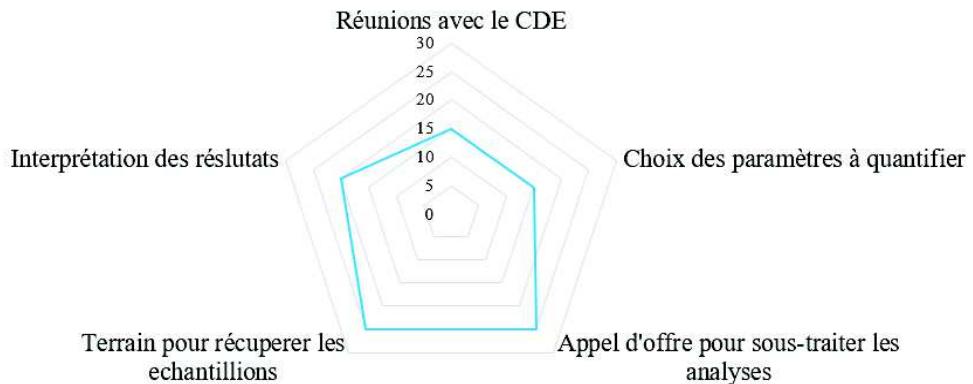
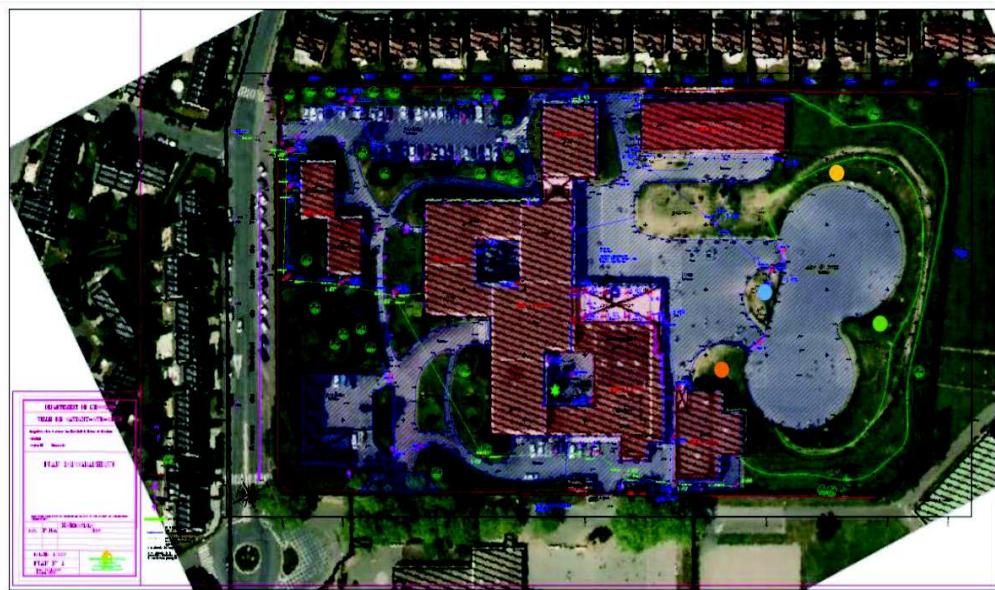


Figure 8 : Répartition en pourcentage du temps de travail - étude du sol

1. Perméabilité du sol

Une visite terrain a été réalisée le 17 novembre 2021 au collège les Gâtines à Savigny-sur-Orge. Le but de cette journée a été de réaliser trois nouveaux essais Porchet dans la cour du collège ainsi que de réaliser des échantillonnages du sol en vue d'analyses. Cela permettra de comparer la perméabilité du sol à différents endroits et de confirmer les résultats obtenus lors de la 1^{ère} année du projet. En effet, il est important d'avoir plusieurs résultats pour avoir une meilleure représentativité de la perméabilité de la cour du collège. La carte des essais Porchet est présentée ci-dessous.



Emplacement des essais Porchet réalisés au niveau de la cour du collège les Gâtines

Figure 9 : Emplacement des essais Porchet réalisés au sein de la cour du collège les Gâtines

Tout comme le premier essai Porchet du 10 mars 2021 (essai n°1), les trois nouveaux essais, en date du 17 novembre 2021, (essais n°2, 3 et 4) ont été effectués alors que le sol était à saturation. Ceci est un préalable à la réalisation d'un essai Porchet. Le matériel utilisé et le protocole suivi sont présentés dans l'Annexe 6.

La perméabilité K (m/s) a été calculée en tenant compte des dix premières minutes et des dix dernières minutes du test afin de comparer l'infiltration de l'eau dans un sol plus ou moins saturé. La quantité d'eau ajoutée témoigne de la perméabilité du sol.

Les graphiques ci-dessous présentent l'évolution du volume ajouté au cours du temps au droit des points n°2, 3 et 4. Un ajustement est réalisé grâce à un modèle logarithmique proposé par Excel qui permet d'avoir une idée de l'asymptote obtenue en volume. De plus, le coefficient R² indiquant le degré de précision du modèle a été calculé. Plus le volume d'eau ajouté est grand, plus l'infiltration est importante.

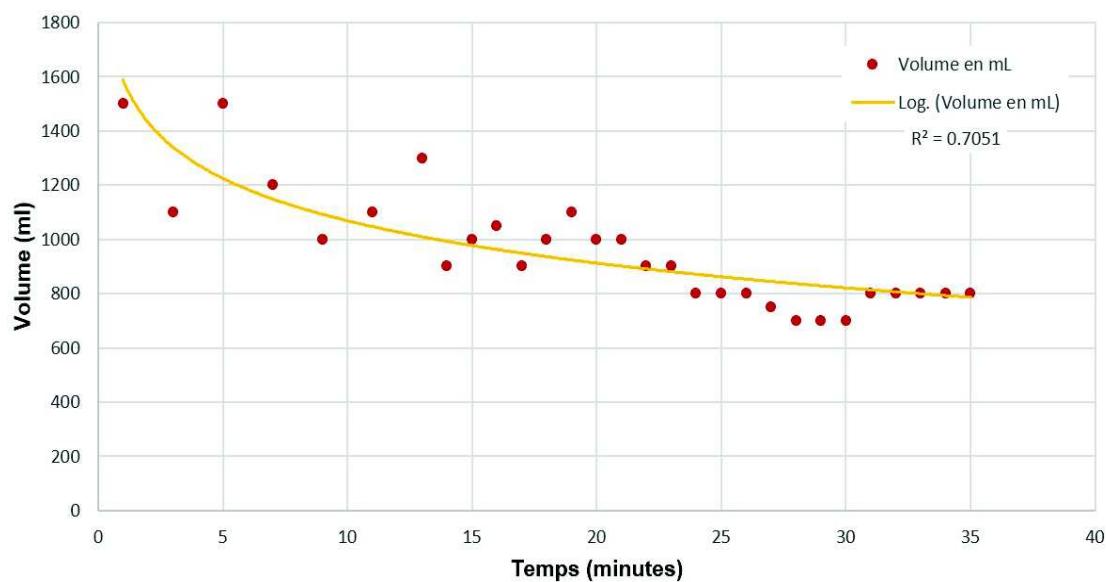


Figure 10 : Volume d'eau ajouté au cours du temps - point n°2

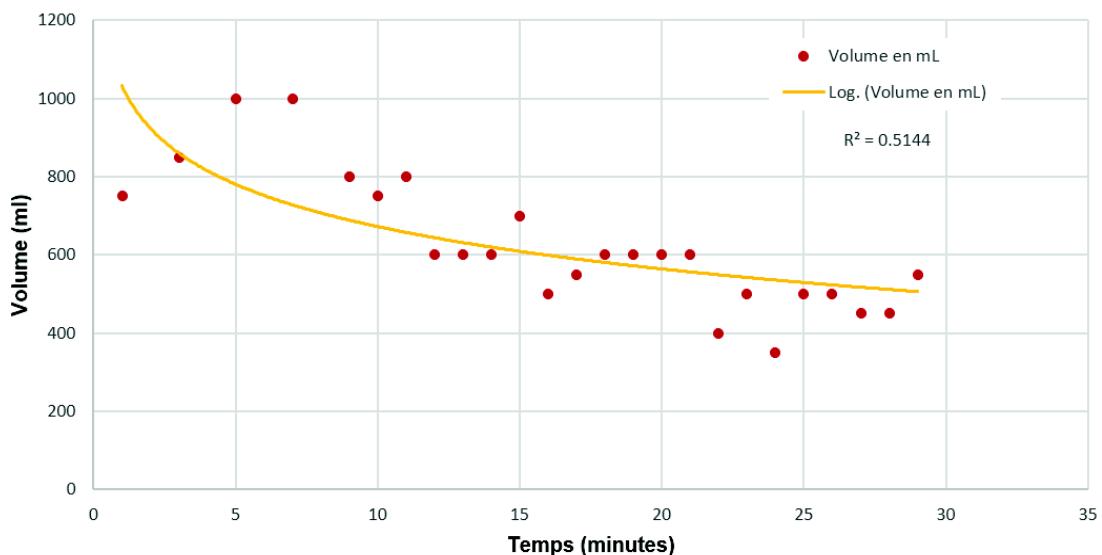


Figure 11 : Volume d'eau ajouté au cours du temps - point n°3

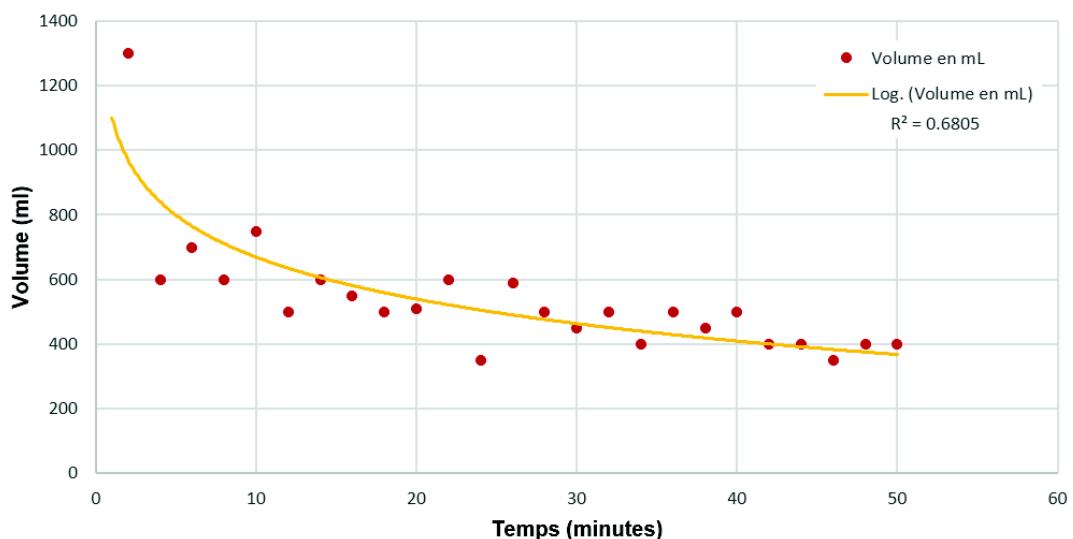


Figure 12 : Volume d'eau ajouté au cours du temps - point n°4

Les trois essais présentent des résultats similaires. La quantité d'eau ajoutée diminue au cours du temps. Les perméabilités calculées de l'ensemble des points sont indiquées dans le tableau qui suit.

	Essai n°1	Essai n°2	Essai n°3	Essai n°4
Perméabilité 10 premières minutes : K (m/s)	$1,77 \cdot 10^{-5}$	$1,54 \cdot 10^{-5}$	$8,33 \cdot 10^{-6}$	$1,17 \cdot 10^{-5}$
Perméabilité 10 dernières minutes : K (m/s)	$9,5 \cdot 10^{-6}$	$1,15 \cdot 10^{-5}$	$5,30 \cdot 10^{-6}$	$7,28 \cdot 10^{-6}$

Tableau 1 : Perméabilité du sol au droit des points n°1, 2, 3 et 4

La perméabilité est homogène pour l'ensemble des points. Les résultats indiquent donc une perméabilité moyenne de **5,55.10⁻⁶ m/s** sur l'ensemble de la cour. Les sols dont la perméabilité est comprise entre 10⁻⁵ et 10⁻⁷ sont définis comme étant peu perméables (cf. Annexe 7). Dans ce cas, l'infiltration de l'eau pluviale est envisageable mais conditionnée. Pour une perméabilité du sol supérieure à 10⁻⁶ m/s, un projet d'infiltration est envisageable mais nécessite un entretien régulier (risques de colmatage et de réduction de l'efficacité de l'ouvrage).

2. Analyse du sol

2.1 Stratégie d'analyse

Dans l'éventualité du réaménagement de la cour d'école du collège les Gâtines un diagnostic des sols est nécessaire. Ce diagnostic permet une évaluation complète de l'état des sols. Une première phase consiste à établir une étude historique à l'aide des documents disponibles sur l'état des sols (études historiques, documentaires et mémoriales, étude de vulnérabilité, etc.) [22].

Dans un second temps, une investigation initiale et détaillée de la qualité des sols doit être menée. Elle assure la prise en compte des mesures de gestion de la pollution dans la conception du projet d'aménagement.

L'investigation initiale est établie via des prélèvements et analyses du sol de la zone d'étude. Deux types de pollution ont été recherchés :

D'une part, **la pollution inorganique** engendrée par la présence de métaux lourds dans les sols. Cette pollution peut engendrer une exposition et potentiellement une contamination des collégiens par ingestion directe ou par contact cutané. Certains métaux peuvent également, à un certain seuil, causer une contamination de la nappe phréatique.

Les métaux lourds sont naturellement présents dans les sols et jouent même un rôle important dans certains processus biologiques (Exemple : le zinc, le fer et le cuivre sont des oligo-éléments essentiels dans de nombreuses fonctions de l'organisme).

Cependant, les activités anthropiques sont à l'origine d'une augmentation des teneurs en métaux lourds dans le sol (Exemple : pollution en plomb). Ces augmentations peuvent être à l'origine de déséquilibres et d'effets néfastes sur les écosystèmes ainsi que la santé humaine. En effet, de nombreux scandales sanitaires ont prouvé par le passé la toxicité engendrée par de fortes expositions à certains métaux lourds (Exemple : Saturnisme maladie causée par le plomb).

L'exposition humaine aux métaux lourds se produit via différentes voies de transfert et d'exposition.

Par conséquent, des analyses sur brut et sur lixiviation des Éléments Traces Métalliques (ETM) présents dans le sol seront réalisées. Les analyses sur brut sont nécessaires et préconisées par le Conseil d'Architecture, d'Urbanisme et de l'Environnement (CAUE) de Paris afin d'assurer la compatibilité du sol avec la présence d'enfants. Tandis que les analyses sur lixiviation permettent de mesurer la fraction biodisponible et donc mobile des métaux lourds dans le sol.

D'autre part, **des composants organiques** et persistants dans l'environnement peuvent représenter un danger pour les élèves de l'établissement. Selon les recommandations du Cahier pour la transformation des cours d'école élaborée par la Ville de Paris, les éléments suivants ont été recherchés dans les sols : hydrocarbures (HCT(C10-C40)) ; HAP ; BTEX ; PCB ; COT.

Une analyse via le pack Installation de Stockage de Déchets Inertes (ISDI) a été choisie en vue d'une potentielle excavation et évacuation des terres dans le cadre du réaménagement de la cour de l'école les Gâtines. Ce pack inclut l'analyse des ETM sur éluat et l'analyse des composés organiques sur brut.

Résumé des choix d'analyses de sol

Composés inorganiques : 12 ETM (As, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn) sur brut et sur éluat

Composés organiques :

- Sur brut : HCT, PCB, HAP, BTEX ;
- Sur éluat : COT

2.2 Réalisation et localisation des prélèvements

Les travaux de sondages ont été réalisés le 22/02/2022 par les membres de l'équipe RRI. Les sondages ont été réalisés à 50 cm de profondeur à l'aide d'une pelle manuelle. La carte ci-dessous présente la localisation des prélèvements effectués.



Figure 13 : Carte de la localisation des sondages au droit de la cour du collège les Gâtines

Les caractéristiques des sondages sont les suivantes.

Sondages	Profondeur (cm)	Analyses	Objectifs
1	50	Pack ISDI + 12 métaux sur brut	Caractériser les terres en vue de leur potentielle évacuation dans le cadre du réaménagement de la cour et identifier les risques sanitaires des terres présentes
2	50		
3	50		

Tableau 2 : Grille des paramètres analysés, échantillons et objectifs

2.3 Prélèvements et conditionnements des échantillons de sols

Tous les prélèvements de sols ont été réalisés avec des gants en nitrile à usage unique et chacun des sondages a fait l'objet d'une étude précise concernant les caractéristiques géologiques et organoleptiques.

Il est à noter que les sondages ponctuels ne permettent pas d'apporter une vision exacte et continue de l'état des terrains de la zone d'étude. Ils permettent néanmoins d'obtenir une vision représentative de l'état du sous-sol, sans que l'on puisse écarter la présence d'une anomalie.

Les échantillons ont été conditionnés dans des bocaux en verre, neufs et fermés hermétiquement envoyés par *Eurofins* [12]. Le flacon doit être réfrigéré à (4 ± 2 °C) dans l'obscurité sur le site

et pendant le transport vers le laboratoire limitant le risque d'altération où ils ont été placés en chambre froide jusqu'à l'analyse.

Les prélèvements ont été réalisés conformément à la norme NF ISO 18400-101 à 105 de décembre 2017 relative à l'échantillonnage de sol.

2.4 Résultats d'analyses et interprétations

2.4.1 Précision sur les valeurs de référence

Les résultats d'analyses sont comparés aux valeurs de fond géochimique dans différentes bases :

- **Composés organiques** : leur présence dans les sols est généralement due aux activités anthropiques. Le constat de leur présence témoigne d'une contamination même limitée. La valeur de référence est le seuil de détection ou la Limite de Quantification (LQ) du laboratoire ;
- **Eléments Traces Métalliques** : les concentrations sont comparées aux valeurs issues du programme INRA/ASPIRET définissant les gammes de valeurs couramment observées dans les sols ordinaires de toutes granulométries. Ce programme constitue le seul référentiel national reconnu.

Certaines teneurs seront également comparées aux critères des arrêtés du 12 décembre 2014 seuils ISDI. Ces valeurs s'appliquent dans le cadre du transfert des terres excavées vers les filières d'orientation des terres correspondantes et ne représentent pas des seuils de réhabilitation.

2.4.2 Résultats d'analyses dans les sols

Le tableau suivant présente une synthèse des résultats d'analyses sur les échantillons de sols prélevés. Les échantillons S1, S2 et S3 prélevés au sein de la cour du Collège les Gâtines sont conformes aux seuils ISDI, aux valeurs indicatives de la note CIRE IDF du 3 juillet 2006 (référentiel des ETM présents dans les sols franciliens) et aux gammes de valeurs issues du programme de recherche de l'INRA - ASPIRET. Le tableau complet est disponible dans l'Annexe 8.

Substances	Unité	Seuils ISDI	Note CIRE du 3 juillet 2006	ASPISET INRA gammes de valeurs dans les sols ordinaires	LQ	S1	S2	S3
Profondeur (cm)						50	50	50
Matière sèche	% P.B.				0,1	83,6	83,2	84,2
Analyses physico-chimiques								
Organique Total	mg/kg M.S.				1000	16500	23400	16300
Métaux sur brut								
Antimoine (Sb)	mg/kg M.S.				1	<1,00	1,98	2,71
Arsenic (As)	mg/kg M.S.		1,0 - 25,0		1	7,35	7,68	10,7
Baryum (Ba)	mg/kg M.S.				1	53,8	50,2	75,2
Cadmium (Cd)	mg/kg M.S.	0,51	0,05 - 0,45		0,4	<0,40	<0,40	<0,40
Chrome (Cr)	mg/kg M.S.	65,2	10,0 - 90,0		5	17,7	17,7	24
Cuivre (Cu)	mg/kg M.S.	28	2,0 - 20,0		5	12,2	14,3	20
Molybdène (Mo)	mg/kg M.S.				1	<1,00	1,16	<1,00
Nickel (Ni)	mg/kg M.S.	31,2	2,0 - 60,0		1	10,7	10,5	16,6
Plomb (Pb)	mg/kg M.S.	53,7	9,0 - 50,0		5	32,1	32,1	32,9
Sélénium (Se)	mg/kg M.S.				1	<1,00	<1,00	<1,00
Zinc (Zn)	mg/kg M.S.	88	10,0 - 100,0		5	38,6	41,1	65,9
Mercure (Hg)	mg/kg M.S.	0,32	0,02 - 10,0		0,1	<0,10	0,12	<0,10
Hydrocarbures totaux C10-C40								
totaux C10-C40	mg/kg M.S.	500				26,1	109	62,5
Composés aromatiques								
Somme des BTEX	mg/kg M.S.	6				<0,0500	<0,0500	<0,0500
Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques								
Somme des HAP	mg/kg M.S.	50				0,28	0,054	0,43
Polychlorobiphényles								
Somme PCB (7)	mg/kg M.S.	1				<0,010	<0,010	<0,010
Analyses sur éluats après lixiviation								
(Fraction soluble) sur éluat	mg/kg M.S.	4000			2000	<2000	<2000	<2000
pH (Potentiel d'Hydrogène)						8	7,4	8,1
Température de mesure du pH	°C					19	19	20
Conductivité corrigée	µS/cm				15	122	72	142
Température de mesure de la	°C					19	18,8	19,5
Métaux sur éluat								
par oxydation	mg/kg M.S.	500			50	88	140	85
Chlorures sur éluat	mg/kg M.S.	800			20	<20,0	<20,0	<20,0
Fluorures sur éluat	mg/kg M.S.	10			5	<5,00	<5,00	5,08
éluat	mg/kg M.S.	1000			50	<50,4	<50,9	<50,8
(Eluat)	mg/kg M.S.	1			0,5	<0,50	<0,51	<0,51
libérables (Eluat)	mg/kg M.S.	-			0,1	<0,10	<0,10	<0,10
(Eluat)	mg/kg M.S.	-			0,1	<0,10	<0,10	<0,10
(ICP/MS) Eluat	mg/kg M.S.	0,06			0,002	0,009	0,012	0,013
(ICP/MS) Eluat	mg/kg M.S.	0,5			0,1	<0,101	<0,102	<0,102
(ICP/MS) Eluat	mg/kg M.S.	20			0,1	0,166	0,155	0,188
(ICP/MS) Eluat	mg/kg M.S.	0,04			0,002	<0,002	<0,002	<0,002
(ICP/MS) Eluat	mg/kg M.S.	0,5			0,1	<0,10	<0,10	<0,10
(ICP/MS) Eluat	mg/kg M.S.	2			0,1	<0,101	0,113	<0,102
(ICP/MS) Eluat	mg/kg M.S.	0,5			0,01	0,022	<0,010	0,027
Eluat	mg/kg M.S.	0,4			0,1	<0,101	<0,102	<0,102
(ICP/MS) Eluat	mg/kg M.S.	0,5			0,1	<0,101	<0,102	<0,102
(ICP/MS) Eluat	mg/kg M.S.	0,1			0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Eluat	mg/kg M.S.	4			0,1	<0,101	<0,102	<0,102
éluat	mg/kg M.S.	0,01			0,001	<0,001	<0,001	<0,001

Légende :

81	Dépassement par rapport aux critères de l'Arrêté du 12/12/2014
28	Dépassement par rapport à la note CIRE et gamme de valeurs ASPISET
95	Dépassement par rapport à la note CIRE uniquement
25,1	Dépassement par rapport à la gamme de valeurs ASPISET uniquement

Tableau 3 : Synthèses des résultats d'analyses des sondages

2.5 Interprétations des résultats

Les résultats d'analyses sur les sols ont mis en évidence l'absence de tout dépassement vis-à-vis des critères des arrêtés.

Si les futurs aménagements nécessitent l'évacuation d'une partie des terres, elles pourraient être acceptées en classe ISDI. Toutefois, une investigation complémentaire pourrait être nécessaire afin d'analyser le sol à des strates plus profondes.

Les résultats des analyses sont, toutefois, satisfaisants et synonymes de faisabilité ce qui permet la poursuite de l'étude. Les analyses ont permis de démontrer qu'aucun polluant n'est susceptible de percoler dans les couches de terre. Le CD91 a été informé rapidement des résultats des analyses.

2. Synthèse de l'étude du sol

Les analyses de sols et les tests de perméabilités effectués au droit de la cour de collège ont révélé que :

- la nappe souterraine se situe à plus de 3 m de profondeur ;
- la perméabilité au droit de la cour est moyenne (10^{-5} à 10^{-7} m/s) et est suffisante pour infiltrer les eaux pluviales ;
- d'après les analyses effectuées, le sol n'est pas pollué et ne nécessitera pas de travaux de dépollution en cas d'installation de dispositifs d'infiltration de l'eau pluviale dans la cour.

À ce stade du projet, il est possible de réaliser une modélisation hydraulique des écoulements d'eaux pluviales au droit de la cour de collège.

IV- Propositions d'aménagements

1. Caractéristiques des aménagements envisageables

Afin d'augmenter la perméabilité du sol et de réduire le ruissellement d'eau pluviale, des aménagements, à mettre en place au niveau de la cour de collège, sont proposés. Les avantages, inconvénients ainsi que le coût associé à chaque dispositif sont présentés ci-dessous [13].

Noue végétale	
	
Présentation du dispositif	Il s'agit d'un dispositif permettant la collecte de l'eau par ruissellement dans une structure creusée permettant de recueillir un certain volume d'eau pluviale.
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Décantation et filtration de l'eau pluviale dans le sol - Collecte, stockage et évacuation de l'eau pluviale - Conception et réalisation simple - Réduction du débit à l'exutoire
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Entretien et nettoyage récurrents - Risque de pollution du sol si l'eau pluviale est contaminée - L'emprise foncière peut être importante
Matériaux	<ul style="list-style-type: none"> - Géomembrane, argile ou béton pour assurer l'étanchéité de la noue - Pieux, enrochement ou géotextile pour stabiliser les berges - Drain au fond de l'ouvrage pour assurer l'infiltration (sable, gravier...) - Végétation (herbe, arbuste...)

Tableau 4 : Fiche descriptive de la noue végétale

Structures réservoirs
(exemple : pavés drainants)



Présentation du dispositif	Il s'agit d'un dispositif permettant le stockage temporaire de l'eau pluviale qui sera évacuée par infiltration dans le sol ou sera restituée vers un exutoire.
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Écrêtement des débits d'eau pluviale - Aucune emprise foncière supplémentaire - Intégration paysagère - Mise en œuvre facile - Alimentation de la nappe
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Tributaire de l'encombrement du sol - Coût pouvant être important - Risque de pollution accidentelle de la nappe
Matériaux	<ul style="list-style-type: none"> - Pavé et dalle en béton poreux / engazonné - Galet, cailloux, graviers avec une porosité supérieure à 35% - Drain au fond de l'ouvrage pour favoriser l'infiltration - Géotextile recouvrant l'ensemble des matériaux

Tableau 5 : Fiche descriptive de la structure réservoir

Nota Bene : Le coût d'entretien des dispositifs d'infiltration des eaux pluviales est non négligeable. Dans l'hypothèse d'un réaménagement de la cour du collège les Gâtines, un entretien à fréquence annuelle devra être mis en place. Il est nécessaire d'anticiper à l'amont du projet les problématiques liées à l'entretien et le financement associé.

V-Modélisation hydraulique

La modélisation hydraulique permet de représenter dans l'espace et le temps des variables hydrauliques qui aident au dimensionnement, à l'entretien et à la pérennité des ouvrages. L'équipe RRI a réalisé une étude hydraulique dans l'objectif de mieux comprendre le risque inondation du collège. La figure ci-dessous présente le pourcentage du temps consacré pour chaque étape de la modélisation hydraulique.

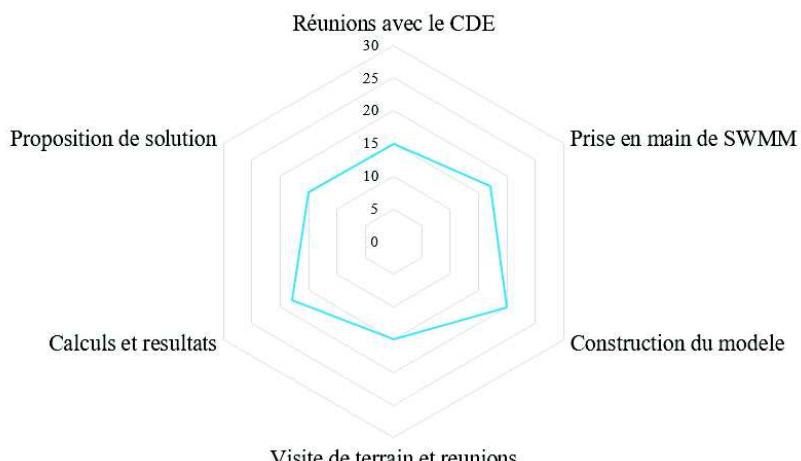


Figure 14 : Répartition en pourcentage du temps de travail – modélisation hydraulique

VII. Présentation de SWMM

Le logiciel SWMM est créé entre 1969 et 1971 par l'agence de protection de l'environnement des États-Unis (EPA) [14]. Il s'agit d'un logiciel de simulation du ruissellement de surface et de l'écoulement des eaux souterraines. SWMM est principalement utilisé pour la modélisation des zones urbaines, notamment pour évaluer l'impact des précipitations.

Le modèle de gestion des eaux pluviales (SWMM) est utilisé pour la planification, l'analyse et la conception liées au ruissellement des eaux pluviales, aux égouts unitaires et à d'autres systèmes de drainage. Il peut être utilisé pour évaluer les stratégies de contrôle des eaux pluviales des infrastructures, telles que les tuyaux et les égouts pluviaux.

Il permet entre autres de :

- gérer et entretenir les réseaux de drainages ;
- modéliser des ouvrages, tels que des unités de stockage/traitement, des diviseurs de débit, des pompes, des déversoirs et des orifices ;
- appliquer les débits externes et les apports de qualité de l'eau provenant du ruissellement de surface, de l'écoulement intermédiaire des eaux souterraines, de l'infiltration/apport d'eau dépendant des précipitations, du débit sanitaire par temps sec et des apports définis par l'utilisateur ;
- modéliser divers régimes d'écoulement, tels que les remous, les surcharges, les flux inversés.

Concernant l'aspect technique, le logiciel SWMM repose sur l'édition à partir de l'interface graphique du fichier avec l'extension “.inp” qui contient les informations géométriques et toutes les informations relatives aux calculs (pluie, paramètres numériques, etc.). Le fichier fonctionne sur un système de balises entre crochets. Par exemple, le paramètre indiquant le début des informations sur les nœuds du modèle est noté [JUNCTIONS] dans le code du logiciel. Le logiciel permet de modéliser en régime permanent ou transitoire. En régime transitoire, le modèle résout les équations de Barré de Saint Venant.

Trois routages sont disponibles :

- **Steady Flow** : Écoulement permanent et uniforme dans chaque tronçon et à chaque pas de temps (Translation simple des hydrogrammes)
- **Kinematic Wave** : Modèle de l'onde cinématique
- **Dynamic Wave** : Modèle de l'onde dynamique (Régime transitoire avec résolution des équations 1D de Barré de Saint Venant)

Pour le régime transitoire, le modèle utilise les équations monodimensionnelles de Saint-Venant qui découlent des équations de Navier Stokes par intégration sur la verticale. Ces équations, au nombre de deux, traduisent la conservation de la masse et la conservation de la quantité de mouvement le long de l'écoulement.

L'équation de base est la suivante (à l'état hydrostatique = 0) :

$$\theta = \frac{\partial p}{\partial z} - pg$$

Avec :

- **p** = pression ;
- **z** = cote ;
- **g** = accélération de la pesanteur.

Les équations de Saint Venant ne seront qu'une perturbation de cet état de base. L'équation de la conservation de la masse résolue par le cœur du code est :

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

Avec :

- **q** = débit latéral ;
- **Q** = débit ;
- **t** = temps ;
- **S** = section ;
- **x** = abscisse.

Enfin, l'équation de la continuité de mouvement :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/S)}{\partial x} + g.S.\frac{\partial h}{\partial x} = g.S.(I - J) + k.q.\frac{Q}{S}$$

Avec :

- **i** = pente ;
- **j** = charge hydraulique ;
- **k** = coefficient de Strickler.

Afin de discriminer les variables (débits, vitesses, etc.) le modèle utilise des approximations par différence finie des dérivées partielles où la fonction f est le débit ou la vitesse par exemple. Il faut que dx soit suffisamment petit afin que l'approximation de la dérivée soit réaliste.

$$\frac{df}{dx} = \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2\Delta x}$$

SWMM utilise un schéma numérique explicite. Les variables à un nouveau pas de temps sont évaluées à chaque point du maillage par des calculs à partir des valeurs déjà connues [15]. Sur

la figure ci-dessous les points représentent la variable à calculer. On calcule la variable à l'instant $n+1$ à partir des variables à l'instant $n\Delta t$. Ce schéma possède l'avantage d'être simple à mettre en œuvre, mais est moins stable qu'un schéma implicite.

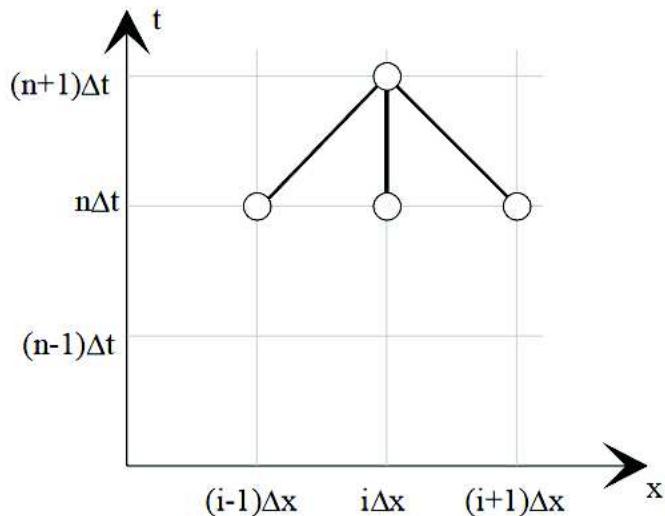


Figure 15 : Schéma pour résolution explicite – [15]

2. Hypothèses du modèle et données d'entrées

Pour modéliser la zone d'étude, diverses hypothèses seront prises en compte [16].

Hypothèse de pluviométrie :

La pluie est uniforme sur le bassin versant du collège. Cette hypothèse peut être considérée comme valable, car le bassin versant est très petit.

Hypothèses mathématiques et physiques :

La résolution mathématique induit un certain nombre d'hypothèses qui sont les suivantes :

- la pente I du canal est suffisamment faible pour faire l'approximation $\sin(I) = I$;
- la masse volumique de l'eau est considérée comme constante ;
- les effets de la viscosité interne sont négligeables par rapport aux frottements externes.

Nota Bene : Les visites de terrain du 13/03/21 et 17/11/21 ont permis de faire un état des lieux de la zone d'étude. C'est une étape indispensable à la modélisation puisqu'elle permet de reprendre certaines mesures en cas d'incertitude (diamètre de canalisation, taille de la cour, etc.). Lors de cette visite, un point important a été levé. Certaines canalisations étaient bouchées par des poussières et des déchets ce qui empêche l'écoulement de l'eau dans la conduite et

provoque une inondation. Il est difficile de déterminer si ces canalisations se sont bouchées avant l'inondation de Juillet 2018 ou après. Quoi qu'il advienne, la première des choses à faire pour limiter le risque est donc de s'assurer que les canalisations ne restent pas bouchées. L'étude hydraulique part du principe que les canalisations ne sont pas obstruées.



Figure 16 : Encrassement au niveau des réseaux de collecte d'eau pluviale du collège les Gâtines

3. Construction du modèle

La construction du modèle est une étape qui prend beaucoup de temps. Il suit une approche classique avec des Éléments de Modélisation Hydraulique (EMH), des nœuds, des canalisations et des sous-bassins versants. Grâce au plan du collège fourni par le CD91 (cf. Annexe 10) il est possible de placer précisément les canalisations à la fois en renseignant les longueurs, les diamètres, la forme, ainsi que les altitudes aux extrémités des canalisations. Les regards peuvent également être modélisés entre chaque canalisation.

Dans l'ensemble, les plans du CD91 permettent de replacer les canalisations facilement et précisément. Cependant, certaines parties du réseau ne sont pas connues, c'est le cas du sous-sol des bâtiments A et B (cf. Figure 18) pour lesquels des incertitudes sont notées. Les eaux des bâtiments A et B ont donc été connectées à différentes canalisations pour être le plus réaliste possible. Ce choix est dû à des incertitudes dans le plan du collège, mais n'impacte pas la modélisation de la zone d'intérêt à l'amont (dans la cour du collège). Un exutoire a été placé en aval du modèle (cf. Figure 21).

3.1 Paramétrage du sol

Les essais Porchet réalisés ont permis de calculer une perméabilité du sol comprise entre 10^{-5} et 10^{-6} m/s. Ces valeurs de perméabilités correspondent à un sol de nature silteuse, ou d'un

mélange de sable et d'argile selon les abaques (cf. Annexe 7). Les observations de terrains ont également permis de conclure que la nature du sol correspond à un mélange de silt argileux, comprenant des niveaux sableux sur les 30 premiers centimètres. Afin de prendre en compte le sol le plus contraignant au regard de l'infiltration, il a été considéré un sol de texture limon argileux de paramètre :

- **succion (ψ)** : 210 mm ;
- **conductivité** : 1 m/s ;
- **porosité** : 0,464.

L'abaque ci-dessous indique les caractéristiques du sol selon sa nature.

Texture	K	Ψ	Φ	CC	PF
Sable	120	49	0,437	0,062	0,024
Sable limoneux	30	61	0,437	0,105	0,047
Limon sableux	10,7	110	0,453	0,190	0,085
Limon	3,3	89	0,463	0,232	0,116
Limon silteux	6,6	170	0,501	0,284	0,135
Limon silteux et sableux	1,5	220	0,398	0,244	0,136
Limon argileux	1,0	210	0,464	0,310	0,187
Limon argileux et silteux	1,0	270	0,471	0,342	0,210
Argile sableuse	0,5	240	0,430	0,321	0,221

Tableau 6 : Propriétés hydriques de sols selon leurs textures : K, conductivité hydraulique à saturation, en mm/h : ψ , succion en mm : Φ , porosité : CC, capacité au champ : PF, point de flétrissement – [18]

3.2 Paramétrage des bassins versants

Le plan du collège issu du CD91 contient des informations topographiques précises du collège. Il est donc possible à partir des relevés réalisés dans le cadre du plan (cf. Annexe 10) de construire un raster après avoir interpellé les valeurs. Les résultats sont présentés sur la carte ci-dessous. Des isolignes ont été ajoutées de façon à mieux se rendre compte de la topographie. Les altitudes les plus hautes sont situées à droite de la carte à hauteur de 80,5 m, tandis que les points bas du collège sont situés à gauche avec des altitudes autour de 74 m.

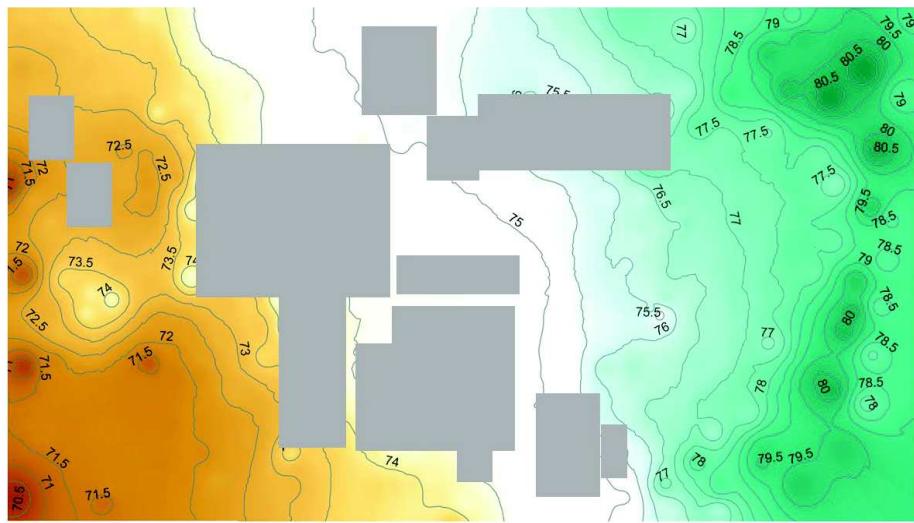


Figure 17 : Calcul de l'altitude au droit du collège les Gâtines – [QGIS]

Des algorithmes présents dans QGIS permettent de retracer les principaux bassins versants (figure ci-dessous). Ces grands bassins versants sont utilisés pour tracer des petits bassins versants sur SWMM au niveau du collège et en prenant en compte les bâtiments implantés.

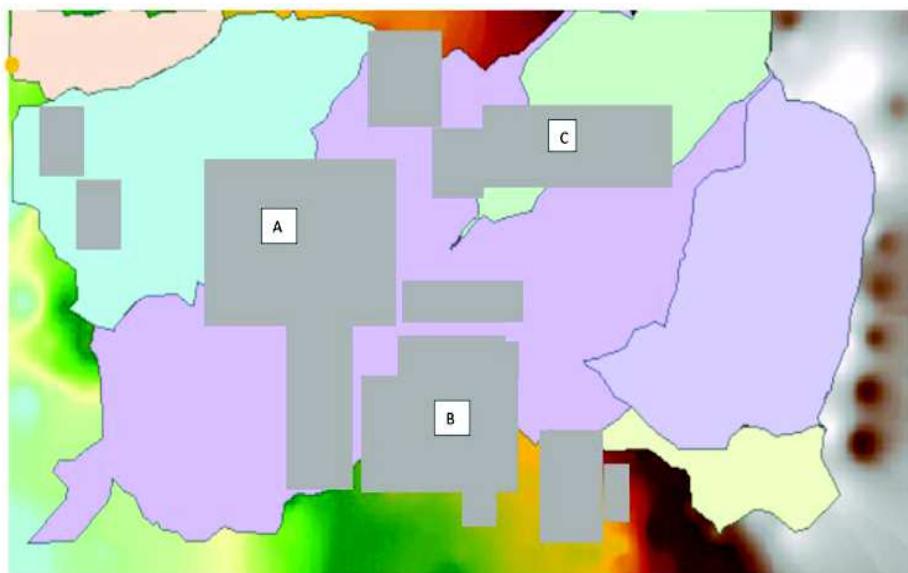


Figure 18 : Carte des bassins versants topographique du collège les Gâtines – [QGIS]

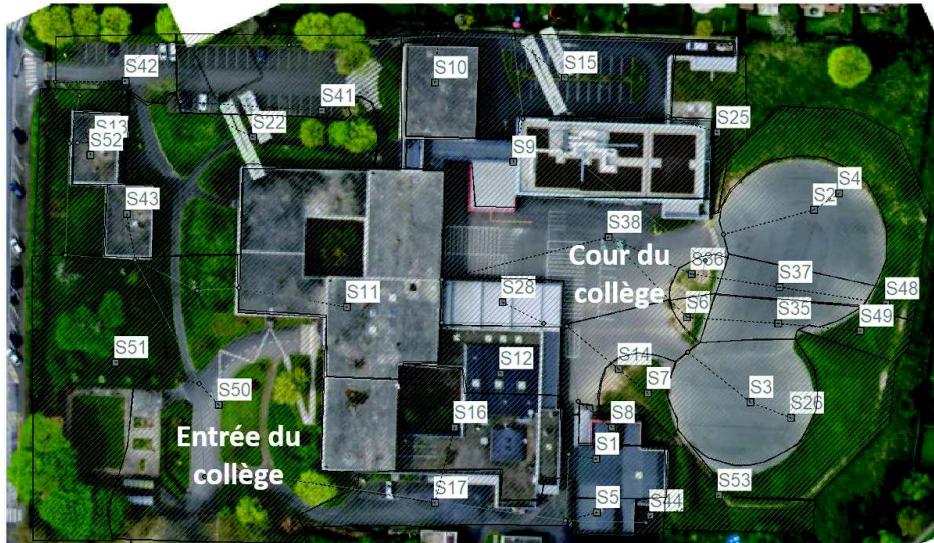


Figure 19 : Carte des sous-bassins versants urbains du collège les Gâtines – [SWMM]

La carte ci-dessous présente les bassins versants dessinés sous SWMM ainsi que le pourcentage d'imperméabilisation des bassins versants. Le taux d'imperméabilisation en rouge est le plus important (100%). Les bassins ci-dessous sont susceptibles d'être différents des bassins versants topographiques (figure 18) car il s'agit du tracé des bassins versants urbains (qui prennent en compte les exutoires du réseau de drainage des eaux pluviales).



Figure 20 : Carte de l'imperméabilisation des sous-bassins versants urbains du collège les Gâtines – [SWMM]

Toujours grâce à QGIS, il est possible de dresser la carte des pentes (donnée d'entrée du modèle). Cette étape est particulièrement importante pour la modélisation puisqu'elle va

permettre de rentrer des pentes moyennes pour chaque bassin versant. Les résultats sont présentés sur la carte ci-dessous. À noter que :

- la pente maximale est de 46 % ;
- De façon générale les pentes sont de 3% (celles-ci sont toutefois très variables).

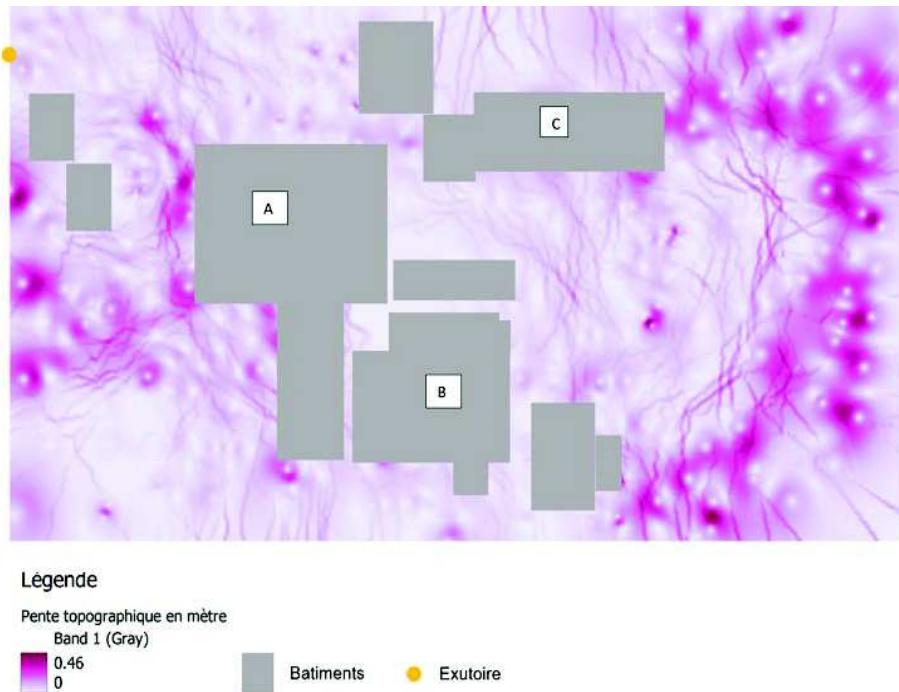


Figure 21 : Carte de la pente sur le collège les Gâtines – [SWMM]

Grâce au travail réalisé sur QGIS, les pentes des bassins versants ont été renseignées dans SWMM.

Le tableau ci-dessous reprend les bassins versants avec les aménagements de la zone d'étude. En outre, il est précisé la surface totale artificialisée et le pourcentage d'imperméabilisation de chaque bassin versant.

ID	Caractéristiques	Surface totale des sous bassin versants (m²)	Surface imperméabilisé %	Pente %
S1	Bâtiment	330	100	0,5
S2	Cour de récréation bétonnée	125	100	4
S3	Cour de récréation bétonnée	890	100	3
S4	Partie végétalisée	865	0	30
S5	Bâtiment	140	100	0,5
S6	Partie végétalisé au centre de la cour	64	0	0,5
S7	Partie végétalisé	290	0	10
S8	Bâtiment	13,5	100	0,01
S9	Bâtiment	116,98	100	0,01
S10	Bâtiment	380	100	0
S11	Bâtiment	2100	85	0,01
S12	Bâtiment	500	85	0,01
S13	Bâtiment	175	100	0
S14	Cour de récréation bétonnée	419	100	5
S15	Parking	1190	80	3
S16	Bâtiment	1500	85	0
S17	Partie bétonnée	625	90	1,5
S22	Partie végétalisée	1375	20	5
S25	Partie végétalisée	368	30	7
S26	Partie végétalisée	671	0	20
S28	Préau	330	100	0,02
S35	Cour de récréation bétonnée	290	100	2
S36	Partie végétalisé au centre de la cour	66	0	0,05
S37	Cour de récréation bétonnée	357	100	2
S38	Cour de récréation bétonnée	1520	100	2
S41	Parking	929	80	3,7
S42	Parking	235	100	3
S43	Bâtiment	200	100	0,01
S44	Partie bétonnée	10	100	0,01
S48	Partie végétalisée	40,35	0	17
S49	Partie végétalisée	167	0	25
S50	Partie végétalisée et bétonnée	170	40	10
S51	Partie végétalisée dont potager	1067	10	5
S52	Partie végétalisée	318	0	5
S53	Extérieur de la cour végétalisée	382	0	5

Totaux

Surface totale des sous bassin versants (m²) 18218,83

Moyenne d'imperméabilisation % : 63

Tableau 7 : Tableau descriptif des sous-bassins versants du collège les Gâtines

3.3 Paramétrage des nœuds

Les nœuds ont été placés sur le modèle. Ces derniers correspondent aux jonctions des canalisations du collège et aux points d'entrée de l'eau. La carte suivante présente les nœuds au droit du collège les Gâtines du modèle SWMM.



Figure 22 : Carte des nœuds du collège les Gâtines – [SWMM]

4. Conditions aux limites

Pour utiliser le modèle il faut paramétrier les données d'entrée avec lesquelles seront calculés les débits et le ruissellement (pluie brute). Il s'agit de conditions limites sous forme de pluie. Des pluies dites triangles ont été constituées (ces dernières sont les plus simples à modéliser, mais d'autres pluies plus complexes peuvent être modélisées).

Plusieurs pluies de projet ont été générées avec la méthode de Montana. La méthode consiste à calculer l'intensité de la pluie avec les paramètres a et b correspondant au temps de retour dans la région Nord de la France. Les paramètres utilisés pour créer les pluies sont ceux proposés par Christian ROUX présents ci-dessous.

Période de retour	2	5	10	20	50
a(T)	346	556	709	866	1078
b(T)	-0,712	-0,754	-0,769	-0,781	-0,793

Tableau 8 : Coefficient de Montana estimé pour des durées de 30 minutes à 4 heures, en mm/h, avec le débit en minutes – [Christian ROUX]

La fabrication de pluie suit la loi suivante :

$$I = a \cdot D^b$$

Avec :

- **D** : la durée en min qui correspond à 60 min ou 240 min selon la durée de la pluie ;
- **I** : l'intensité horaire que l'on multiplie par le nombre de minutes ;
- **a et b** : des paramètres sans unité.

Les pluies triangles suivantes (en mm) sont obtenues :

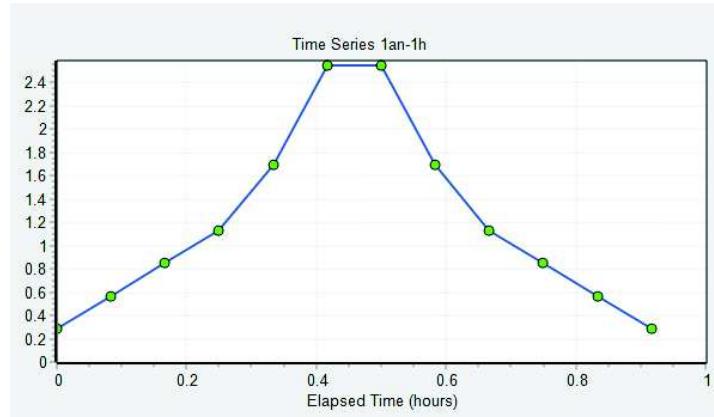


Figure 23 : Pluie de période de retour 1 an et durée 1h

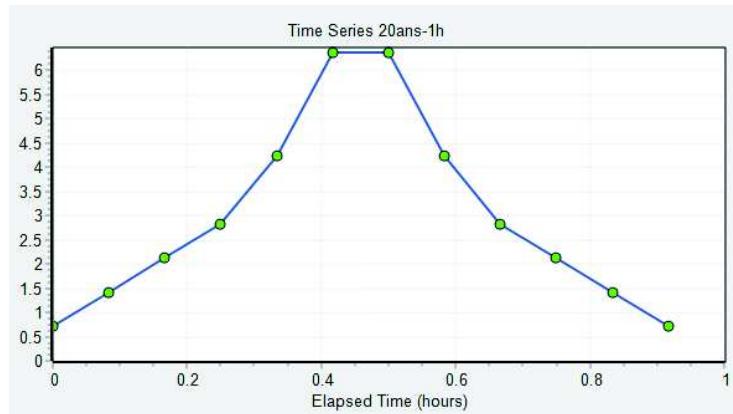


Figure 24 : Pluie de période de retour 20 ans et durée 1h

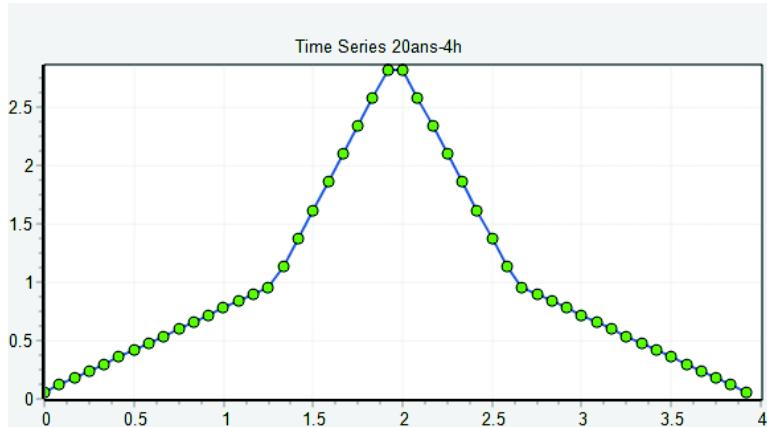


Figure 25 : Pluie de période de retour 20 ans et durée 4h

Les pas de temps sont toujours identiques (5 min). Les pluies triangles sont très rustiques, mais permettent de modéliser une “crue éclair” avec une forte intensité en peu de temps.

5. Modèle hydrologique

Les modèles hydrologiques ont pour objectif de transformer une pluie brute (lame d'eau tombée du ciel) en pluie nette (lame d'eau réellement drainée). Trois modèles hydrologiques sont disponibles :

- **Horton** ;
- **Green Ampt** ;
- **Courbes SCS**.

Le modèle choisi est celui de Green Ampt qui a l'avantage d'être simple à utiliser [17]. Les paramètres à donner dans ce modèle sont le taux de saturation initiale, la conductivité hydraulique du sol et la succion au niveau de l'interface [18]. Le modèle de Green et Ampt simule une saturation progressive du sol. L'intérêt de ce modèle est la simplicité de son utilisation. Ce modèle permet entre autres de représenter l'infiltration de l'eau pluviale dans des ouvrages d'infiltration. Il suit la loi suivante :

$$f(t) = K \cdot \left[\frac{\psi(\theta_s - \theta_i)}{F(t)} + I \right]$$

Avec :

- **f(t)** : taux d'infiltration à l'instant t (m/s) ;
- **K** : conductivité hydraulique du sol (m/s) ;
- **ψ** : succion (m) ;
- θ_s : teneur en eau du sol (m/m) ;
- θ_i : teneur initiale en eau (m/m) ;
- **F(t)** : hauteur d'eau infiltrée depuis le début de l'évènement (m).

Les paramètres du modèle de Green et Ampt utilisés pour la modélisation sur SWMM sont les suivants.

Infiltration Editor	
Infiltration Method	GREEN_AMPT
Property	Value
Suction Head	210
Conductivity	1
Initial Deficit	0.464

Figure 26 : Paramètres du sol pour le modèle Green et Ampt dans le logiciel SWMM

6. Modèle d'évapotranspiration

Dans le cadre de la modélisation, la difficulté est d'avoir un modèle le plus réaliste possible mais aussi en tenant compte d'hypothèses. Pour ce faire, une lame d'eau évapotranspirée est calculée pour être utilisée comme données d'entrée dans le modèle numérique. La méthode développée par M Ludovic OUDIN [19] a été utilisée. Cette méthode possède l'avantage de demander peu de données en entrée (la température et la latitude). Il calcule entre autres les radiations moyennes et l'ÉvapoTranspiration Potentielle (ETP).

Les données d'entrées sont :

- la température : 13,7°C (température moyenne sur l'année) ;
- la latitude de la zone d'étude : 48,52°.

Les résultats indiquent une évaporation potentielle de 710 mm/an ce qui semble assez cohérent. La figure ci-dessous présente les résultats de l'évolution de l'évapotranspiration potentielle dans l'année.

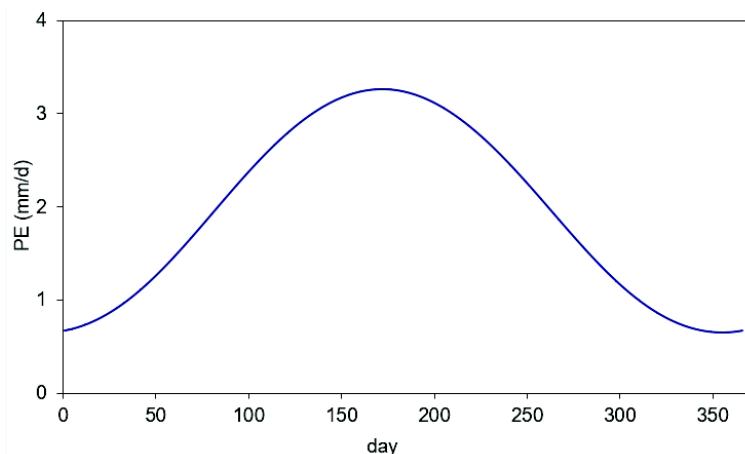


Figure 27 : Graphique de l'évolution de l'évapotranspiration potentielle dans l'année

Dans le cas du gazon, l'ÉvapoTranspiration Réelle (ETR) correspond à :

- $ETR = Kc \times ETP$; avec Kc = coefficient cultural

D'après la société d'ingénierie BRL [20] le Kc du Gazon est égal à 0,8.

L'hypothèse prise pour l'enrobé et les bâtiments est que l'ETR est égale à l'ETP car plus le sol contient d'eau, plus l'ETR se rapproche de l'ETP (Exemple : sur un lac $ETP = ETR$). La surface du béton bitumineux et bâtiment est égale à 50% de la surface du collège. La moyenne des ETR du gazon et de l'enrobé est de 1,8 mm/jour, elle sera considérée comme donnée d'entrée dans le modèle.

7. Calage du modèle

Le calage du modèle sert notamment à vérifier que les résultats obtenus par le modèle soient cohérents avec les observations. Afin de caler le modèle des démarches ont été engagées avec le CD91. La principale démarche consiste à installer des débitmètres au niveau des points d'intérêts du collège (canalisation de collecte d'eaux pluviales) afin d'enregistrer des chroniques de débits de pluies connues. Ces données doivent être comparées avec les résultats du modèle sous condition que les débitmètres soient bien calibrés. L'installation du débitmètre n'a pas pu être réalisée pour des raisons budgétaires.

Néanmoins il a été vérifié que les débordements du réseau modélisé correspondent :

- aux observations des laisses de crues de la pluie de juillet 2018 : en effet, les inondations ayant eu lieu dans le hall du collège ont laissé des marques à proximité des canalisations saturées ;
- aux débordements des regards : le personnel du collège a notifié le débordement de certains regards lors de fortes intempéries.

Dans l'objectif d'une reprise du modèle par le CD91 ou par de futurs étudiants du master, le calage du modèle pourrait être approfondi.

8. Résultats du modèle

La présentation des résultats est organisée de la manière suivante.

En première partie, un état des lieux de l'état initial est proposé. Cette partie représente le collège tel qu'il est actuellement. En deuxième partie, une analyse est présentée en considérant

les aménagements proposés au travers du projet ‘*Mon collège demain*’’. En troisième partie, une analyse est dédiée à la configuration de la cour comprenant les propositions de l’équipe RRI dans le but de limiter au maximum le ruissellement et en prenant en compte les besoins du collège.

Pour chaque configuration, nous avons considéré trois pluies de période de retour et d’intensité différente :

- une pluie de période de retour (PDR) 1 an sur une durée d’une heure, elle permet d’observer l’efficacité des aménagements qui seront proposés sous SWMM via l’ajout de Low Impact Development System (LIDS) pour une pluie commune ;
- une pluie de PDR 20 ans sur une durée de quatre heures, elle est utilisée pour comparer les résultats avec les objectifs fixés par le PLU de Savigny-sur-Orge ;
- une pluie de PDR 20 ans sur une durée d’une heure, permet de prendre en compte un scénario particulièrement pénalisant avec une intensité de pluie importante.

8.1 Modélisation du collège actuel

Cette partie présente les écoulements au droit du collège les Gâtines à l’état actuel.

8.1.1 Scénario : pluie de PDR 1 an et durée 1h à l’état initial

La carte ci-dessous présente les résultats pour la modélisation du collège en état actuel. Le pic de ruissellement en mm/h est représenté en hachures sur les bassins. Pour la pluie de PDR 1 an et de durée une heure, les bassins versants avec le plus fort pic de ruissellement sont les bassins S38 et S22. Le S38 correspond à la cour principale du collège, recouverte d’enrobé.

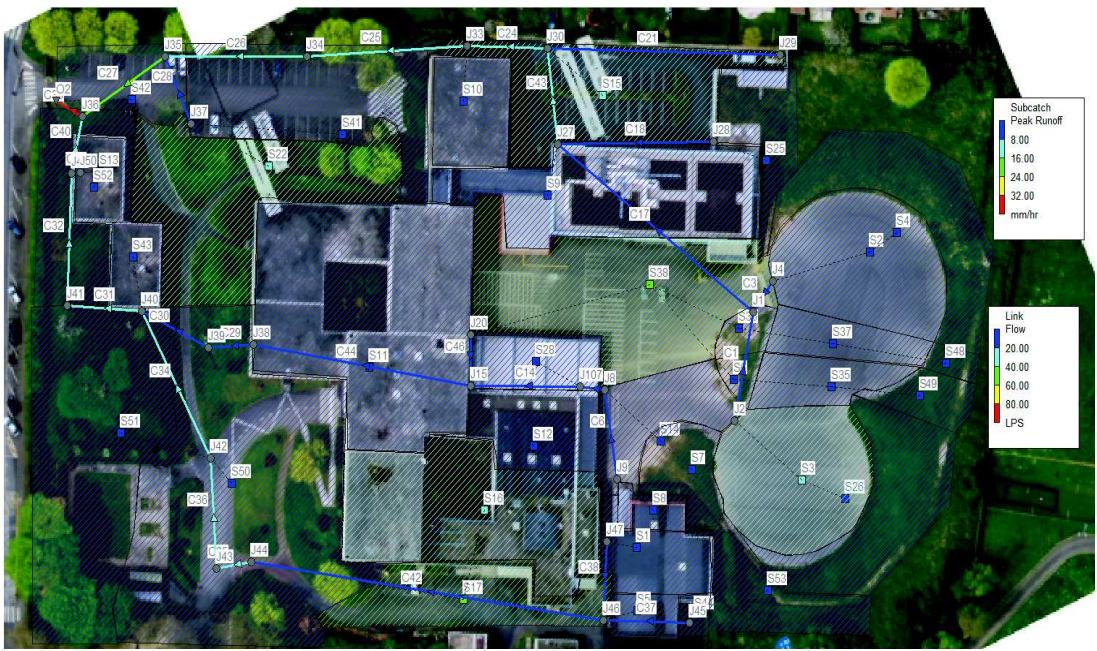


Figure 28 : Ruissellement pour la modélisation du collège en état actuel – pluie de PDR 1 an et durée 1 heure

La figure suivante présente le profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au J20. La pluie de PDR 1 an provoque un débordement au niveau du nœud J20 (point en bas de la cour là où des inondations sont en effet observées).

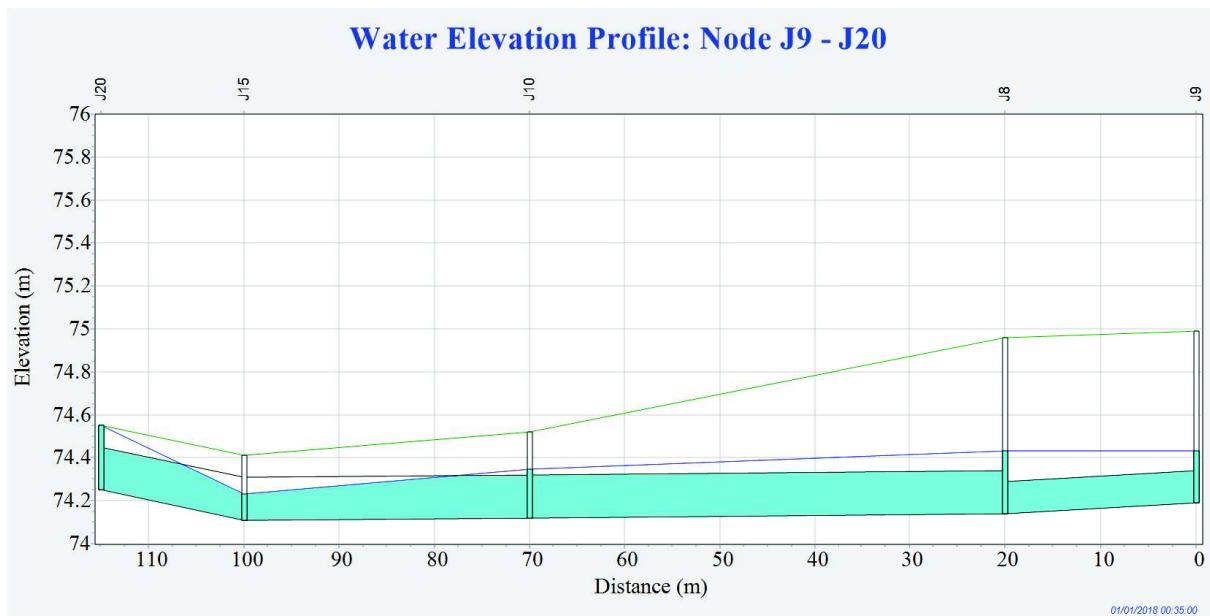


Figure 29 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au J20

La figure suivante présente le profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au O2. Les nœuds J8 et J9, en amont, et les nœuds J39, J40, J41 et J49, situés au niveau de l'entrée du collège, présentent des surcharges des conduites n'aboutissant pas à des débordements en surface.

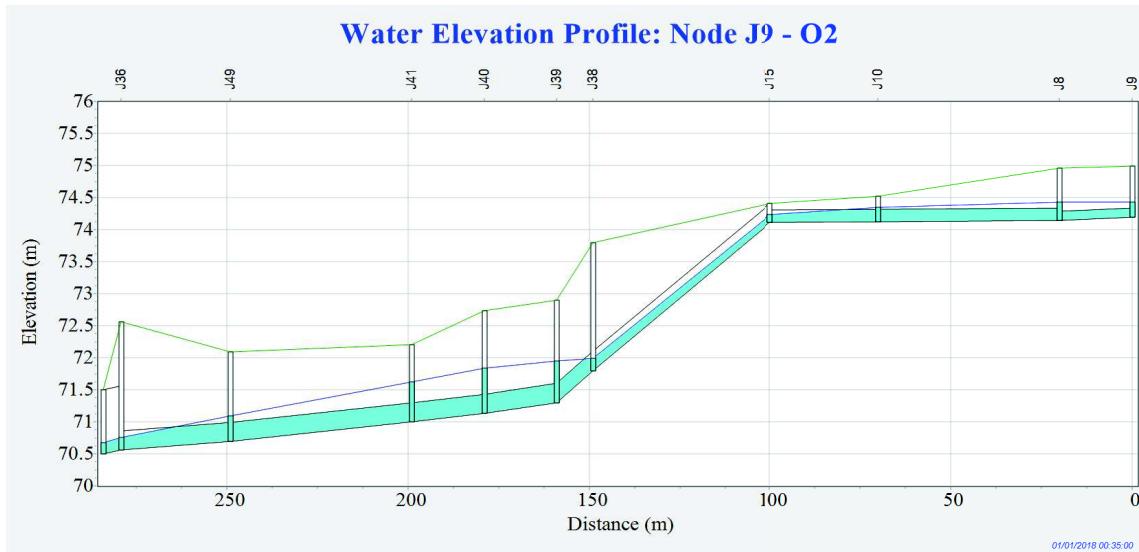


Figure 30 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au O2

La figure suivante présente le profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J2 au O2. Aucune inondation n'est observée pour le scénario d'une pluie de PDR 1 an et de précipitations d'une heure sur cette partie du collège.

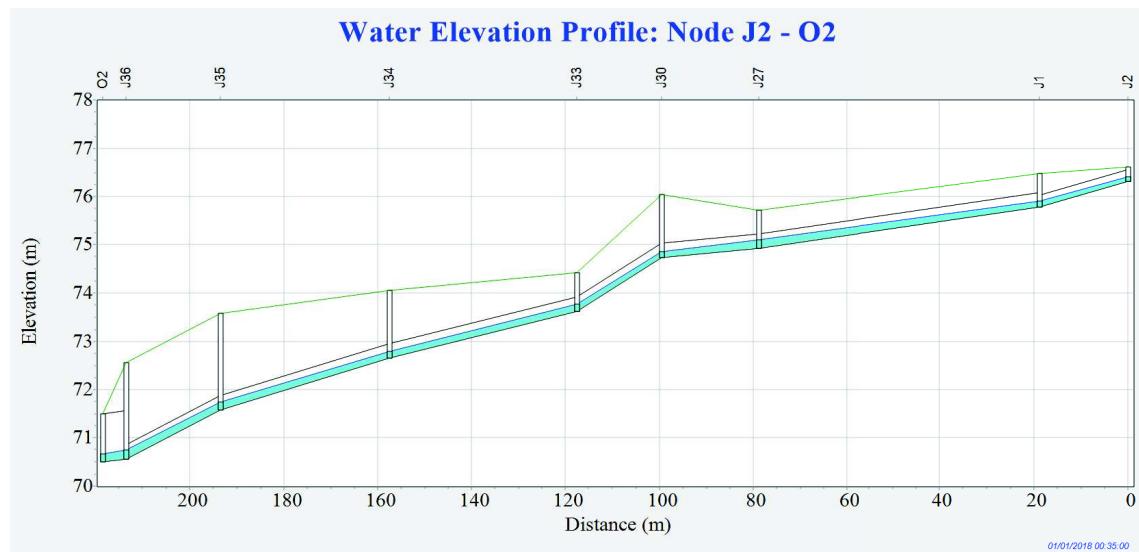


Figure 31 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J2 au O2

8.1.2 Scénario : pluie de PDR 20 ans et durée 4h à l'état initial

Les résultats pour le scénario de la pluie de PDR 20 ans en 4h sont présentés ci-dessous. Au niveau de la cour, le bassin versant S38 subit le pic de ruissellement le plus important (avec un pic compris entre 16 et 24 mm/h). Les bassins S2 et S3 situés sur la surface imperméable le plus en amont de la cour subissent également des pics de ruissellement maximum compris entre 8 et 16 mm/h. Afin de limiter les inondations au niveau du préau, l'installation de LIDS sur ces trois bassins est donc à privilégier.

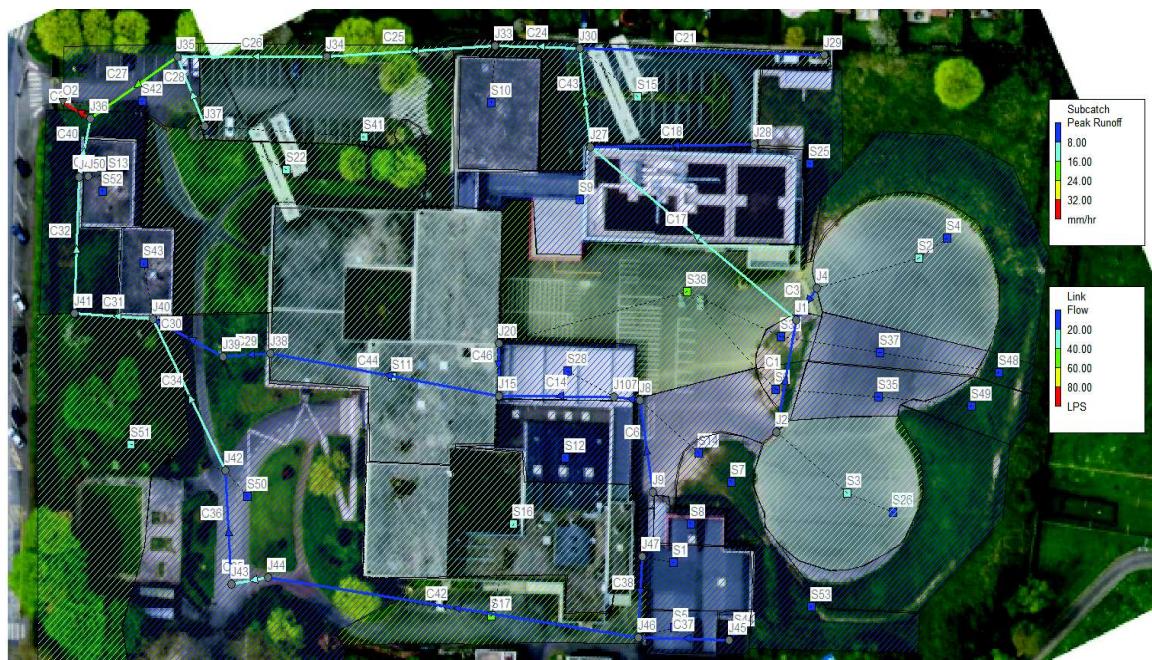


Figure 32 : Ruissellement pour la modélisation du collège en état actuel – pluie de PDR 20 ans et durée 4 heures

La figure suivante présente le profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au J20. La pluie de PDR 1 an provoque une surcharge hydraulique au niveau des nœuds J8, J9 et J10 et un débordement au niveau des nœuds J20 (point en bas de la cour là où des inondations sont en effet observées).

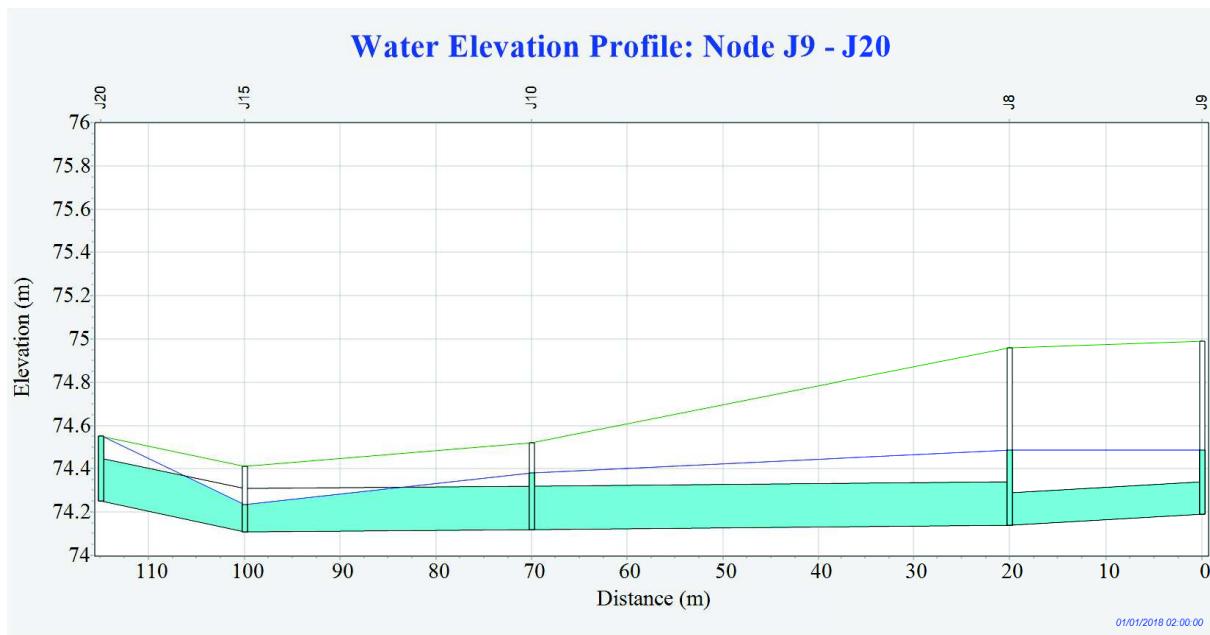


Figure 33 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au J20

La figure suivante présente le profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au O2. La pluie de PDR 1 an provoque une surcharge hydraulique au niveau des nœuds J8, J9 et J10 et un débordement au niveau des nœuds J20 (point en bas de la cour là où des inondations sont en effet observées).

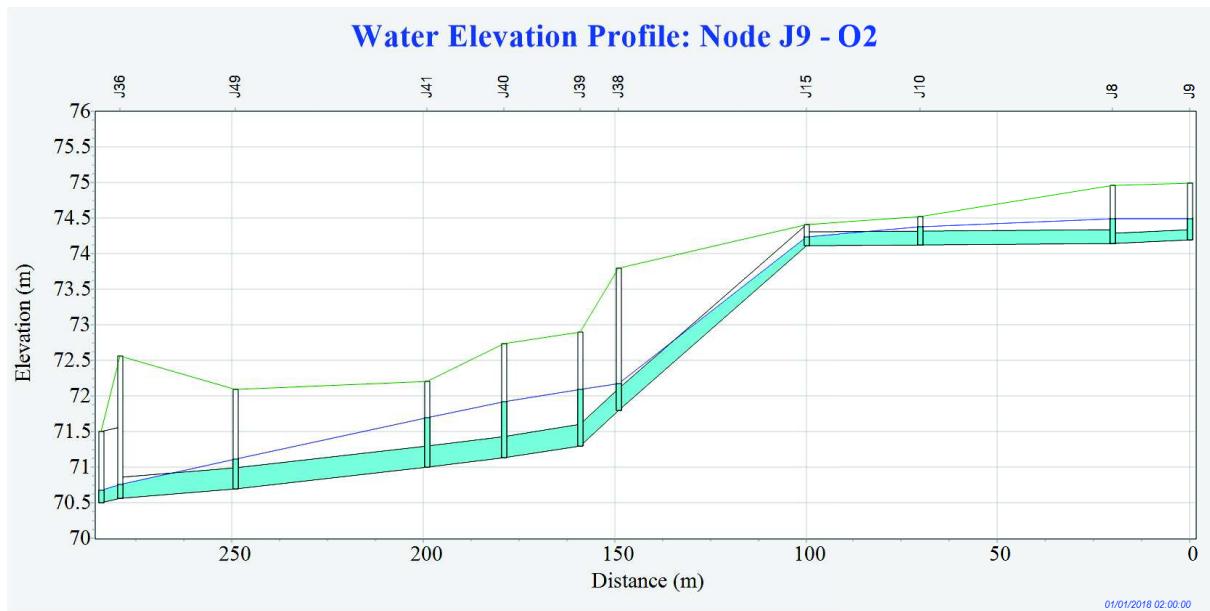


Figure 34 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au O2

La figure suivante présente le profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J2 au O2. Aucune inondation n'est observée pour le scénario d'une pluie de PDR 20 ans et de précipitations d'une heure sur cette partie du collège.

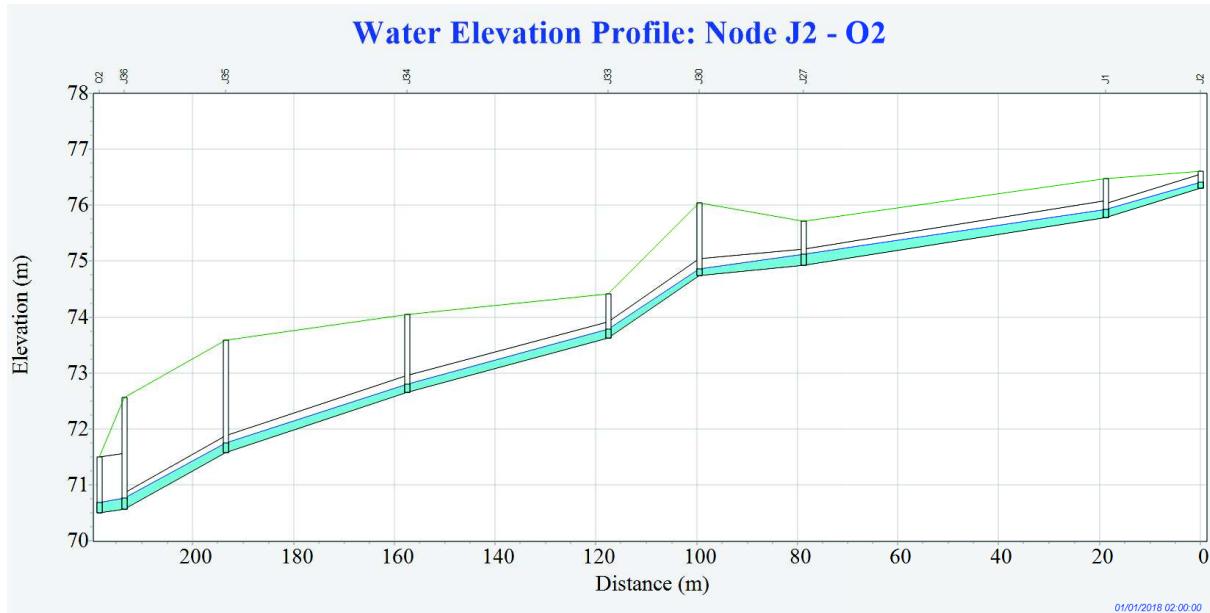


Figure 35 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J2 au O2

8.1.3 Scénario : pluie de PDR 20 ans et durée 1h à l'état initial

Ce scénario est le plus pénalisant des trois scénarios. La figure ci-dessous permet de visualiser les résultats des pics de ruissellements et des débits dans les canalisations sur tout le collège. De nombreux bassins versants ont un pic de ruissellement supérieur à 24 mm/h. La cour principale du collège a un pic à plus de 30 mm/h.



Figure 36 : Ruissellement pour la modélisation du collège en état actuel – pluie de PDR 20 ans et durée 1 heure

Le profil en long ci-dessous montre que la cote de la charge hydraulique dépasse la cote de la surface aux nœuds J20, J10 et J8, induisant un débordement en surface. L'ensemble

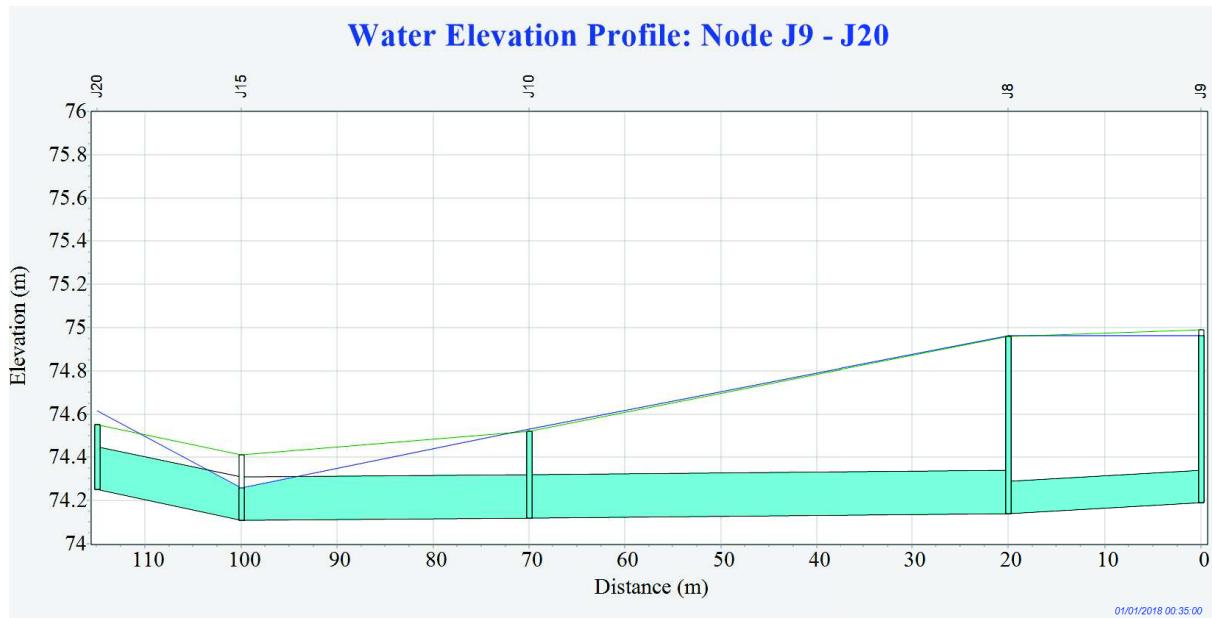


Figure 37 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au J20

Les tronçons entre le nœud J9 et O2 répondent de façon hétérogène à la pluie de PDR 20 ans et de précipitation d'une heure. À l'amont (au niveau de la cour du collège), des regards sont submergés. En aval (au niveau de l'entrée du collège), bien que les canalisations entrent en surcharge elles résistent à la pluie et aucun débordement n'a lieu.

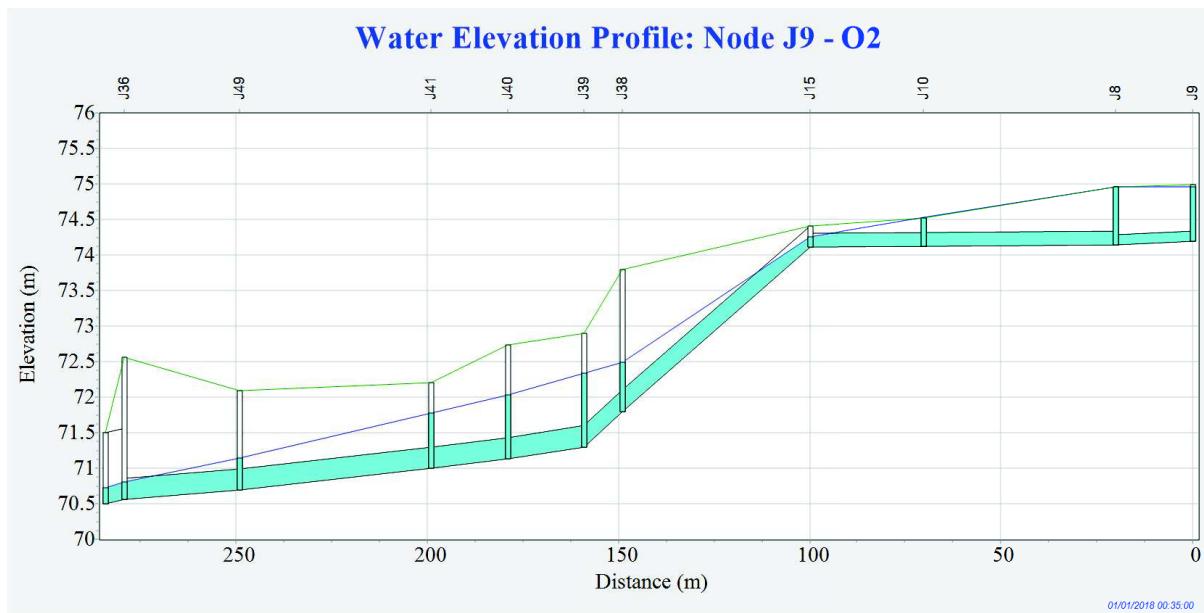


Figure 38 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au O2

La figure suivante présente le profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J2 au O2. La figure ci-dessous indique que les nœuds J33 et J2 débordent pour la pluie de plus forte intensité. Ces données confirment que le bassin versant S3, drainé par le nœud J2 et sur lequel l'aménagement de l'espace végétalisé a été proposé, est déterminant pour réduire une surcharge de réseau en condition extrême.

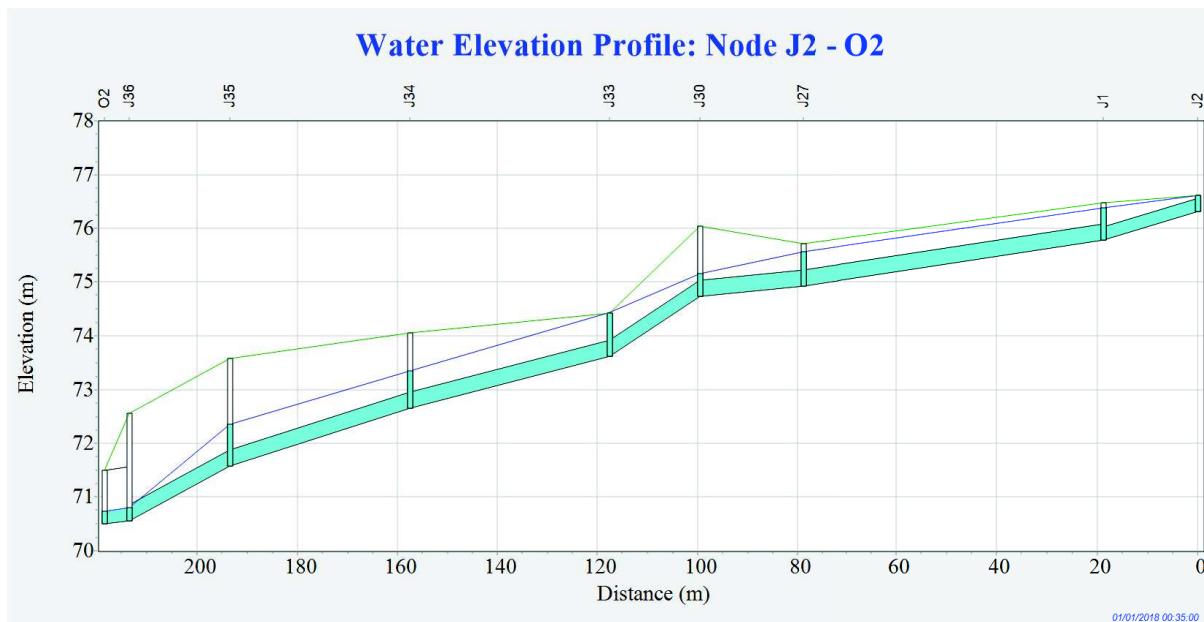


Figure 39 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J2 au O2

8.1.4 Synthèse des résultats de la modélisation à l'état initial

Le réseau d'eau pluvial semble bien représenté par le modèle. En effet, comme attendu, les zones les plus sensibles aux inondations sont situées au niveau du point bas de la cour du collège, et au niveau du point bas à l'entrée du collège. Le réseau est bien dimensionné car très peu de débordements ont lieu pour la pluie de PDR 20 ans et de précipitations d'une heure. En revanche, la partie du réseau au niveau de la cour du collège semble sous dimensionnée puisque des débordements ont lieu sur le noeud J20 pour une pluie de PDR 1 an et de durée 1 heure. Si, de surcroît, les canalisations à ce niveau-là sont bouchées, l'inondation semble inévitable. La pluie de 20 ans met à l'épreuve le réseau avec des débordements dans la cour du collège mais également dans les parties plus basses du collège. Des parties du réseau passent en charge et peuvent entraîner une remontée du niveau de l'eau en amont.

Le tableau proposé ci-dessous reprend tous les résultats des calculs numériques sur le collège sans aucun aménagement. Les précipitations totales ont été calculées grâce aux lames d'eau connues écoulées que nous avons multipliées par la surface des bassins. Le ruissellement total est un bon indicateur pour voir l'efficacité des LIDS par la suite. On voit que les bassins avec le plus de ruissellement sont les S38 avec respectivement 33, 86 et 115 m³ selon les scénarios (dans la cour principale du collège) et S3 respectivement 18, 51, 67 m³ (le terrain de foot actuel). Ces données nous permettent d'identifier les deux bassins sur lesquels les LIDS devront être en priorité installés.

ID	Surface totale des sous bassin versants (m ²)	Total précipitation (m ³)			Total ruissellement (m ³)			Pic ruissellement (LPS)		
		1an/1h	20ans/1h	20ans/4h	1an/1h	20ans/1h	20ans/4h	1an/1h	20ans/1h	20ans/4h
S2	125	1,8	4,4	6,0	8,8	30,3	37,9	7,3	20,0	8,7
S3	890	12,6	31,5	42,7	18,5	51,5	67,2	12,4	32,4	14,2
S4	865	12,2	30,6	41,5	7,8	25,9	32,0	6,3	17,4	7,5
S6	64	0,9	2,3	3,1	6,1	17,1	22,2	4,1	10,8	4,7
S7	290	4,1	10,3	13,9	2,6	8,7	10,7	2,1	5,8	2,5
S8	13,5	0,2	0,5	0,6	0,2	0,5	0,6	0,1	0,3	0,1
S12	500	7,1	17,7	24,0	6,8	17,5	23,6	3,0	9,0	4,4
S14	419	5,9	14,8	20,1	8,5	23,5	30,7	5,7	14,7	6,5
S26	671	9,5	23,7	32,2	6,0	20,1	24,8	4,9	13,5	5,8
S28	330	4,7	11,7	15,8	4,6	11,6	15,7	2,8	7,0	3,1
S35	290	4,1	10,3	13,9	5,6	15,2	20,0	3,7	9,5	4,2
S36	66	0,9	2,3	3,2	5,9	15,7	20,8	3,8	9,7	4,3
S37	357	5,0	12,6	17,1	5,4	13,8	18,5	3,3	9,4	3,7
S38	1520	21,5	53,8	72,9	33,2	86,3	115,4	20,7	8,4	23,2
S48	40,35	0,6	1,4	1,9	0,4	1,2	1,5	0,3	0,8	0,4

Tableau 9 : Synthèse des trois scénarios de pluie au niveau des sous-bassins versants de la cour- état actuel

La suite de l'étude va permettre de savoir si des aménagements peuvent améliorer le transfert de l'eau pour limiter les inondations. Le CD91 et le collège ont préalablement proposé des aménagements de la cour du collège. La partie suivante est dédiée à l'analyse de leurs propositions.

8.2 Modélisation avec les LIDS proposés par le collège

Les Low Impact Development System (LIDS) sont des structures de stockage et d'infiltration des eaux de ruissellement. Le logiciel SWMM propose d'ajouter différents LIDS pour favoriser l'infiltration et donc réduire le ruissellement de surface. Dans le cadre du projet "*Mon collège demain*" du collège les Gâtines, les structures de stockage et d'infiltration des eaux de ruissellement qui seront modélisées sur SWMM sont les suivantes :

- **une noue végétalisée** : tranchée, peu profonde et assez large, recouverte de végétation. La noue recueille et stocke les eaux pluviales ;
- **une chaussée perméable (ici, un amphithéâtre à pavés drainants)** : chaussée sous laquelle est aménagée une couche poreuse permettant l'infiltration de l'eau pluviale ;
- **une cellule de biorétention (ici, un espace végétalisé)** : dépression dans laquelle est aménagée une végétation installée sur sol artificialisé situé sur un lit drainant. Cette installation permet le stockage, l'infiltration et l'évaporation des eaux pluviales ;

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques des LIDS utilisés d'après les structures proposées dans le cadre du projet "*Mon collège demain*".

Layer	Parameters	Bioretention	Vegetative Swale	Permeable Pavement
Surface Layer	Storage Depth (mm)	300	500	30
	Vegetation Volume (Fraction)	0.2	0.2	0.0
	Surface Roughness (Manning's N)	0.0	0.24	0.15
	Surface Slope (Percent)	0.0	1.0	1.0
	Swale Side Slope (Run/Rise)	NA	1.0	NA
Pavement Layer	Thickness (mm)	NA	NA	150
	Void Ratio (voids/solids)	NA	NA	0.17
	Impervious Surface Fraction	NA	NA	0
	Permeability (mm/hr)	NA	NA	2500
	Clogging Factor	NA	NA	0
Soil Layer	Thickness (mm)	750	NA	NA
	Porosity (volume fraction)	0.45	NA	NA
	Field Capacity (volume fraction)	0.19	NA	NA
	Wilting Point (volume fraction)	0.085	NA	NA
	Conductivity (mm/hr)	11	NA	NA
	Conductivity Slope	10	NA	NA
Storage Layer	Suction Head (mm)	110	NA	NA
	Height (mm)	250	NA	250
	Void Ratio (voids/solids)	0.6	NA	0.6
	Infiltration Rate (mm /hr)	0.508	NA	0.508
	Clogging Factor	0	NA	0

NA = Not Applicable

Tableau 10 : Paramètres des LIDS utilisés – [21]

Les surfaces des LIDS installés sont les suivantes :

- espace végétalisé : 890 m² (toute la surface bassin versant n°3) ;
- noue végétalisée : 290 m² (toute la surface bassin versant n°35) ;
- amphithéâtre à pavés drainants : 300m² (une partie de la surface du bassin versant n°4).

Pour chaque LIDS, le volume minimal à retenir a été calculé pour respecter les limites fixées par le PLU (au moins 550 m³ d'eau à retenir pour 1 hectare aménagé). Le volume minimal à retenir et le volume de stockage de chaque LIDS sont présentés ci-dessous (en fonction de la surface de l'aménagement). La colonne 2 du tableau présente le volume minimal calculé en fonction de la surface des ouvrages de rétention (que sont les LIDS). La colonne 3 représente le volume réel de stockage de l'aménagement que l'on a obtenu en multipliant le volume du LIDS par la porosité (selon la matière du LIDS).

Volume minimal à retenir selon le PLU (m ³)	Volume de stockage de l'aménagement (m ³)	Surface (hectare)
Espace végétalisé	48,95	400,5

Amphithéâtre à pavés drainants	16,5	52,65	0,03
Noue végétalisée	15,95	145	0,029

Tableau 11 : Caractéristiques et paramètres des LIDS – aménagements proposés par le collège

Le volume de stockage des LIDS est supérieur au volume minimal à retenir d'après le PLU de Savigny-sur-Orge, par conséquent les aménagements proposés sont conformes à la réglementation.

8.2.1 Scénario : pluie de PDR 1 an et durée 1h – LIDS proposés par le collège

La carte ci-après montre le pic de ruissellement en mm/h sur les bassins versants. Les résultats sont difficilement interprétables par rapport à la modélisation sans aménagements.

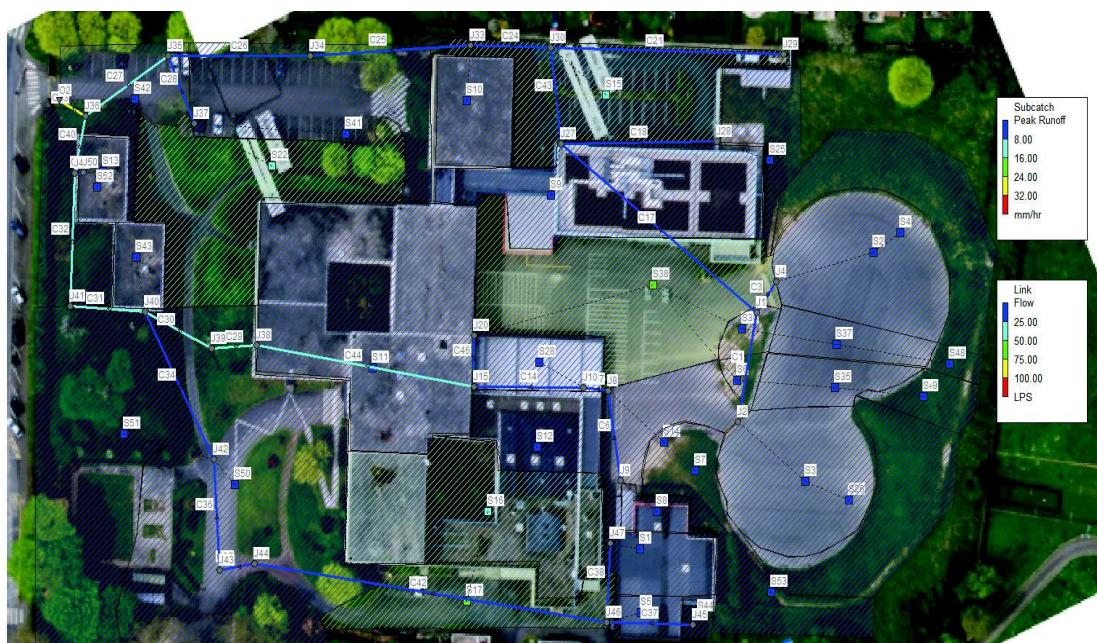


Figure 40 : Ruissellement pour la modélisation du collège avec les LIDS proposés par le collège – pluie de PDR 1 an et durée 1 heure

Comme le montre le profil en long ci-dessous, les résultats montrent une amélioration des cotes au niveau du nœud J20 par rapport à la modélisation sans les aménagements (cf. Figure 28). En effet, ici le regard n'est pas submergé ce qui était le cas dans la précédente partie sans aménagements pour le même scénario. La proposition du collège en termes de

désimperméabilisation semble donc pertinente dans cette partie de la cour pour les pluies de PDR 1 an.

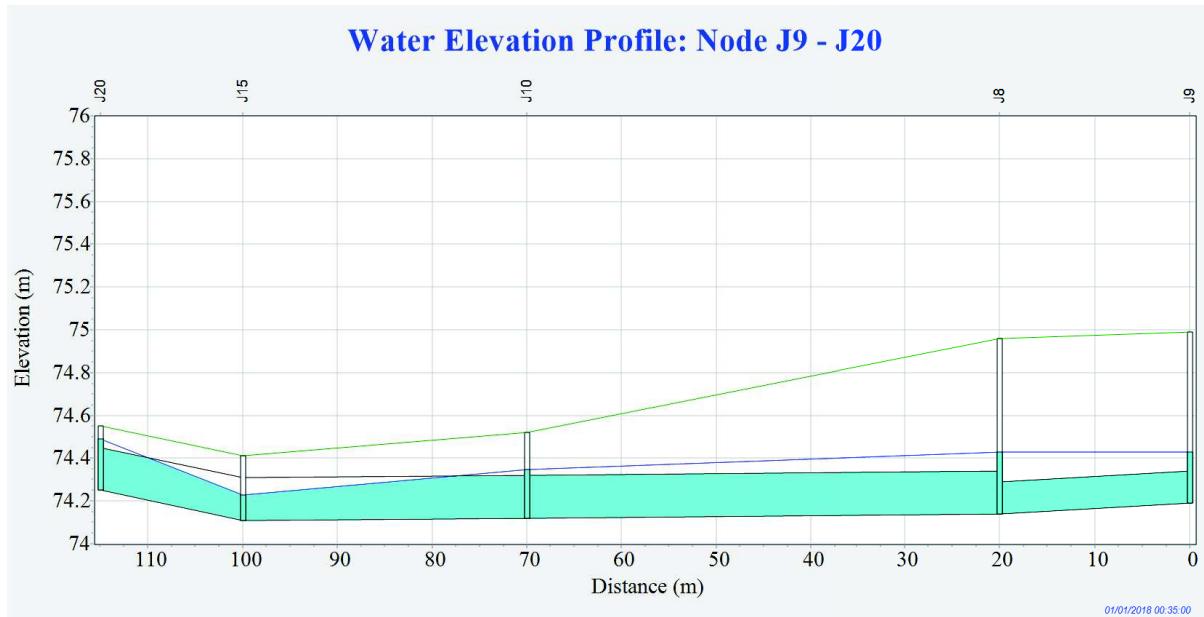


Figure 41 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au J20

La figure suivante présente le profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au O2. Les nœuds J8 et J9, en amont, et les nœuds J39, J40, J41 et J49, situés au niveau de l'entrée du collège, présentent des surcharges des conduites n'aboutissant pas à des débordements en surface.

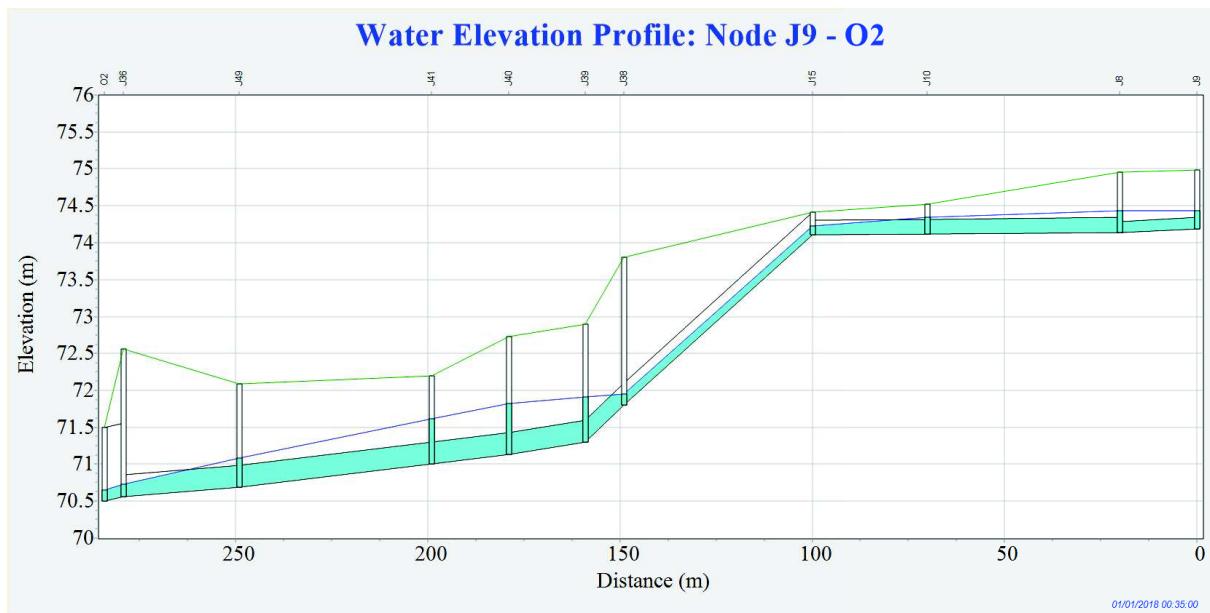


Figure 42 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au O2

Avec les aménagements proposés par le collège, une nette amélioration des cotes est observée sur le tronçon J2-O2. En effet, la noue végétale est placée en amont du nœud J2 ce qui absorbe une bonne partie des eaux superficielles.

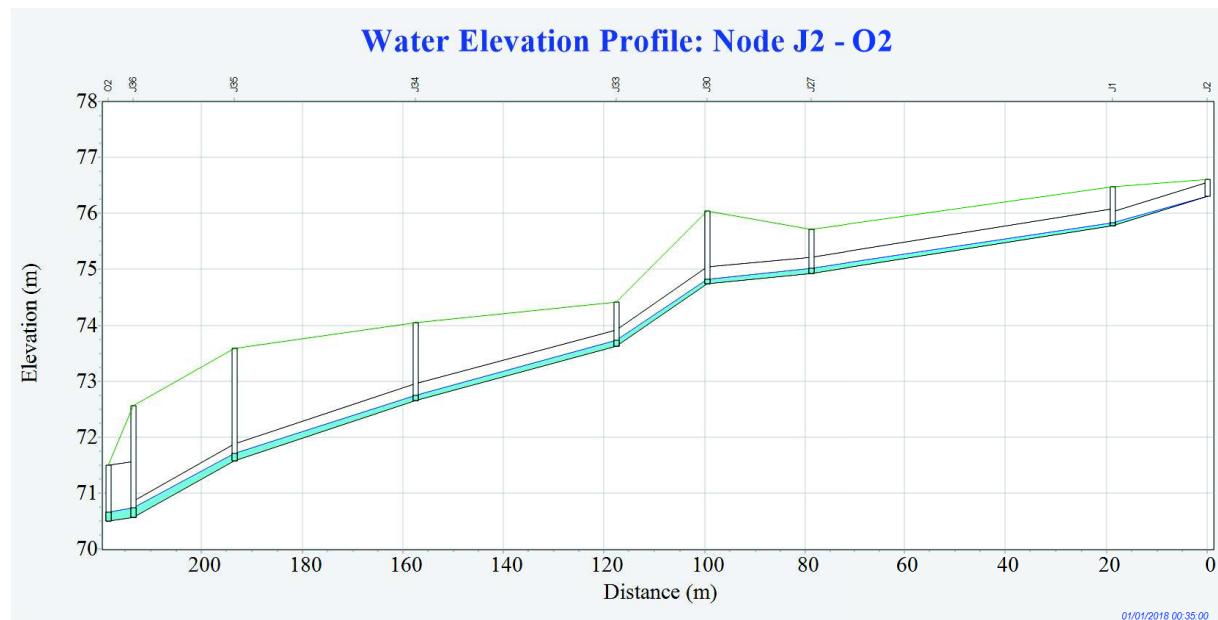


Figure 43 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J2 au O2

8.2.2 Scénario : pluie de PDR 20 ans et durée 4h – LIDS proposés par le collège

La figure ci-dessous présente les résultats des pics de ruissellement sur les bassins. Aucune différence significative par rapport à la simulation sans les LIDS du collège n'est constatée.

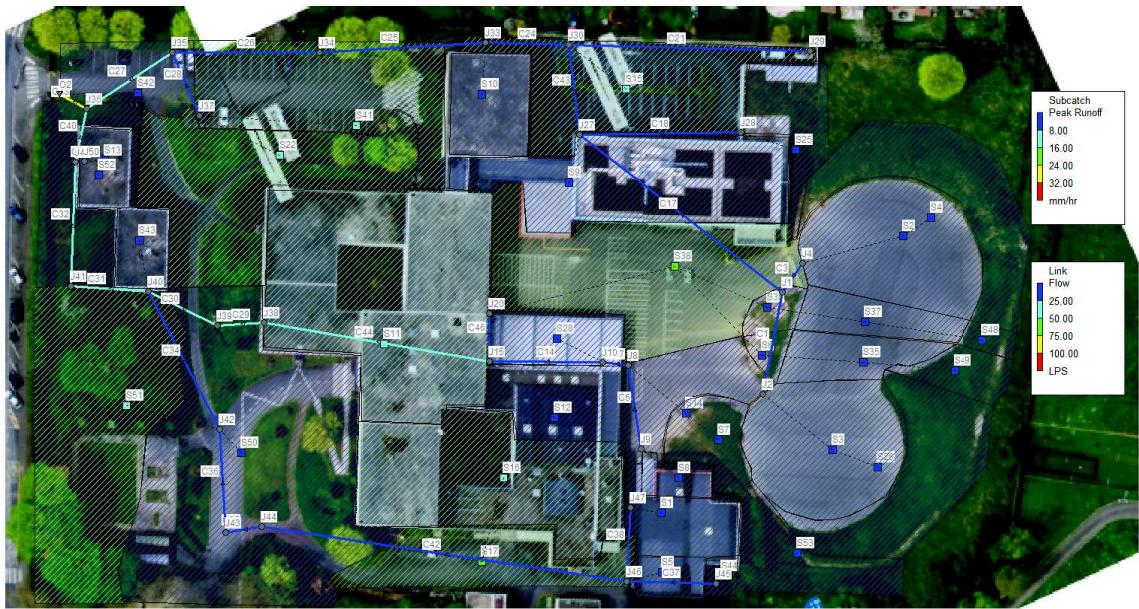


Figure 44 : Ruissellement pour la modélisation du collège avec les LIDS proposés par le collège – pluie de PDR 20 ans et durée 4 heures

Le profil ci-dessous montre l'évolution des cotes dans la cour principale du collège. Le scénario de pluie de 20 ans en 4h met en charge le réseau (ligne bleue) mais ne provoque que très peu d'inondations (seulement au nœud J20).

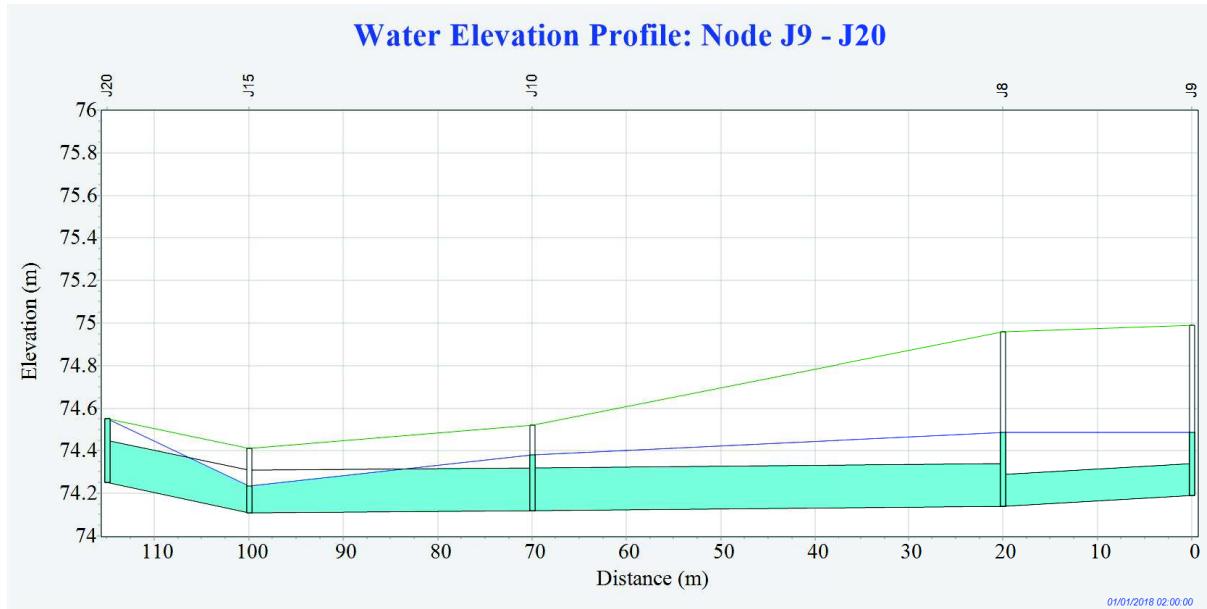


Figure 45 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au J20

Le profil en long J9-O2 est présenté ci-dessous pour le scénario avec les aménagements proposés par le collège. La partie basse du réseau monte en charge sur les nœuds J49, J41, J40, J 39, et J38.

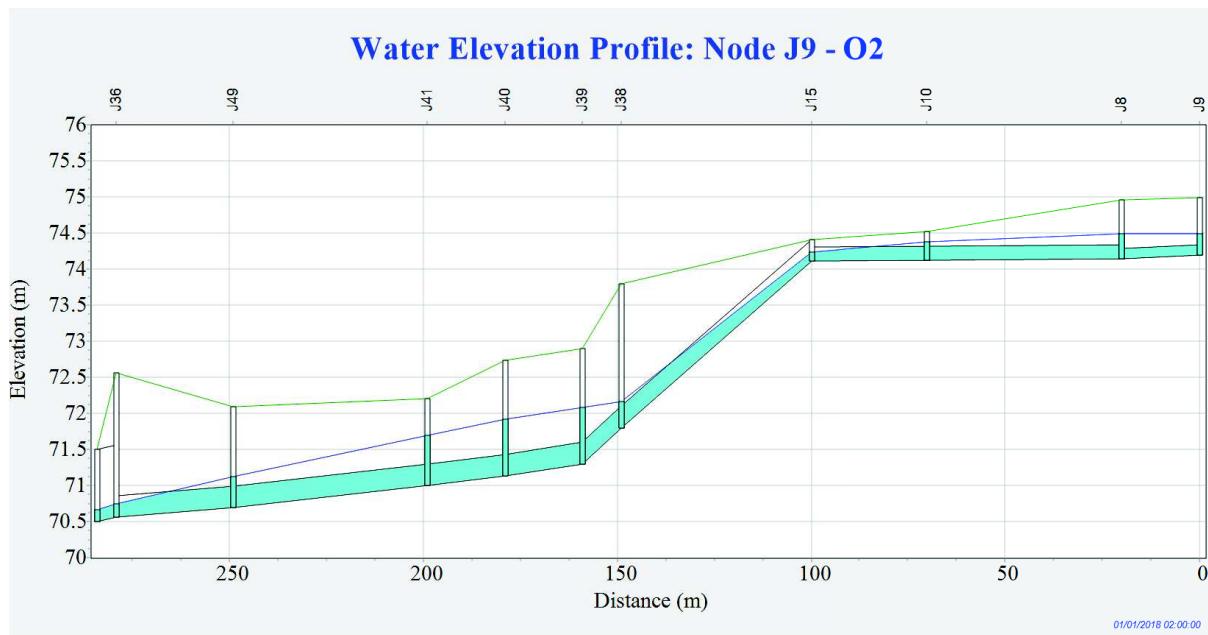


Figure 46 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au O2

Encore une fois, la partie du réseau J2-O2 n'est que très peu impactée par l'inondation. Les cotes ne dépassent pas les regards donc aucun débordement n'est observé. Ces résultats sont à priori en accord avec les observations de terrain lors de la crue de juillet 2018.

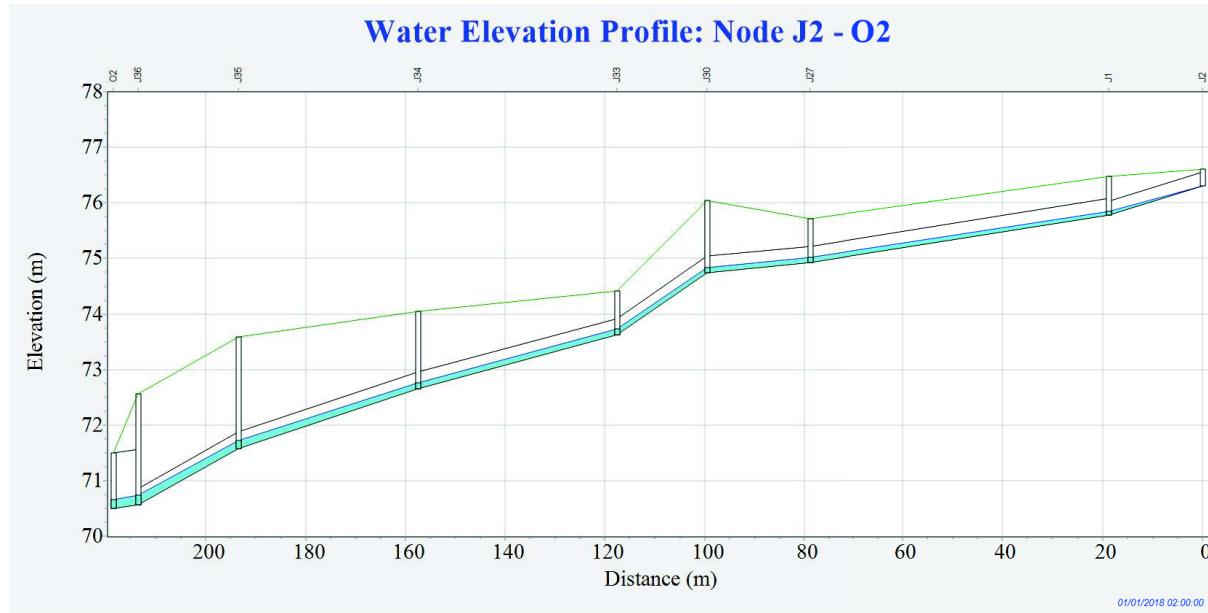


Figure 47 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J2 au O2

8.2.3 Scénario : pluie de PDR 20 ans et durée 1h – LIDS proposés par le collège

La carte ci-dessous montre les pics de ruissellements sur les bassins versants. On voit que la cour du collège est toujours une des zones les plus exposées au ruissellement malgré les aménagements ce qui est normal car les aménagements proposés par le collège ne sont pas directement sur le bassin de la cour principale.



Figure 48 : Ruissellement pour la modélisation du collège avec les LIDS proposés par le collège – pluie de PDR 20 ans et durée 1 heure

La figure ci-après présente les résultats des cotes de l'eau sur le profil en long de la zone d'étude (J20-J9) en bas de la cour du collège. Les propositions du collège ne permettent pas d'éviter le débordement des regards pour le scénario le plus pénalisant ce qui est à priori normal.

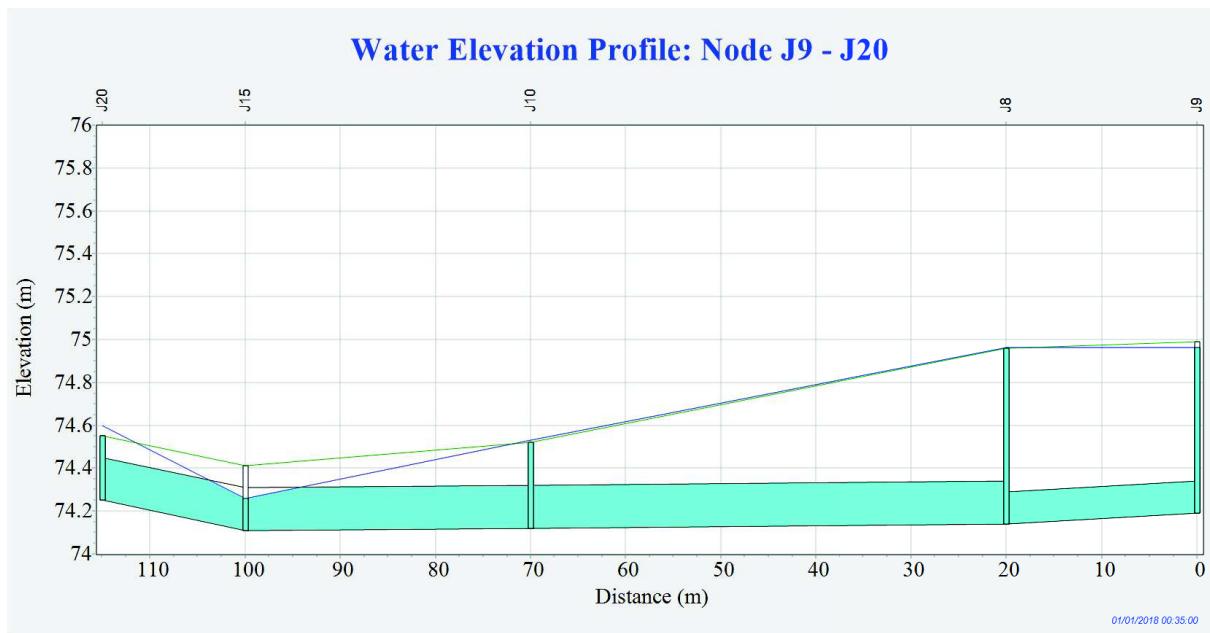


Figure 49 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au J20

La figure ci-après représente les résultats pour le profil J9-O2 du scénario 2. La zone la plus pénalisée et toujours au niveau amont (dans la cour du collège). Le reste du réseau d'eau pluvial semble supporter la pluie de PDR 20 ans en 1h.

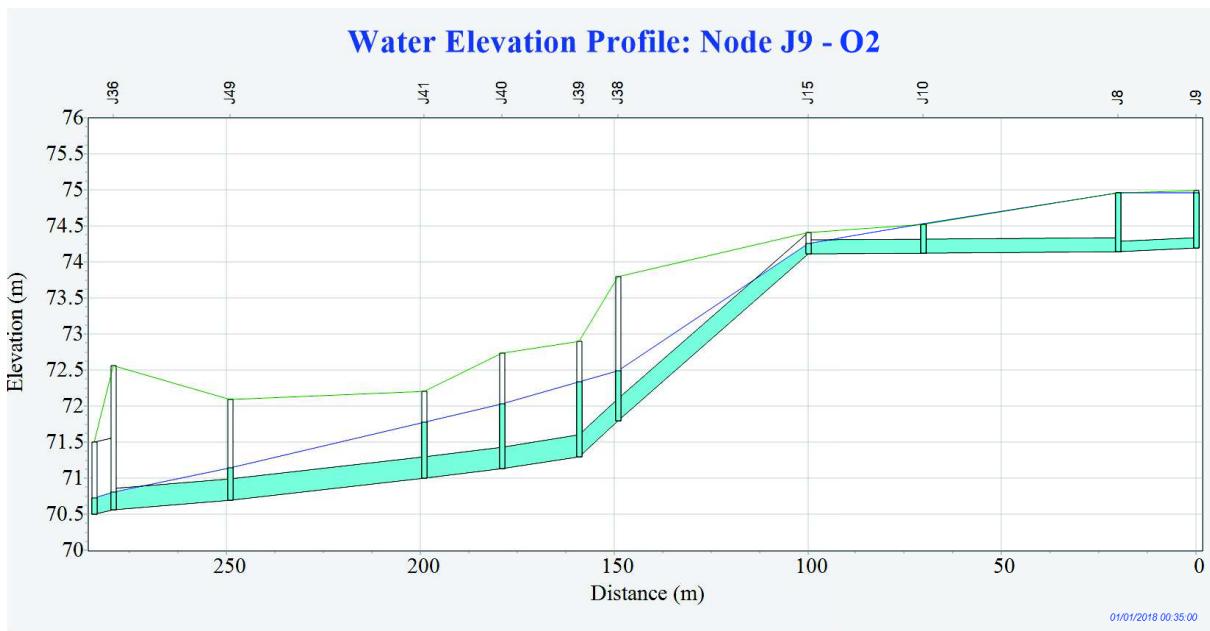


Figure 50 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au O2

Il a été observé précédemment que le profil J2-O2 résiste très bien aux différentes pluies appliquées. Ici encore on peut voir que le bon fonctionnement du réseau combiné aux aménagements proposés par le collège permet d'éviter tout débordement sur cette partie du réseau.

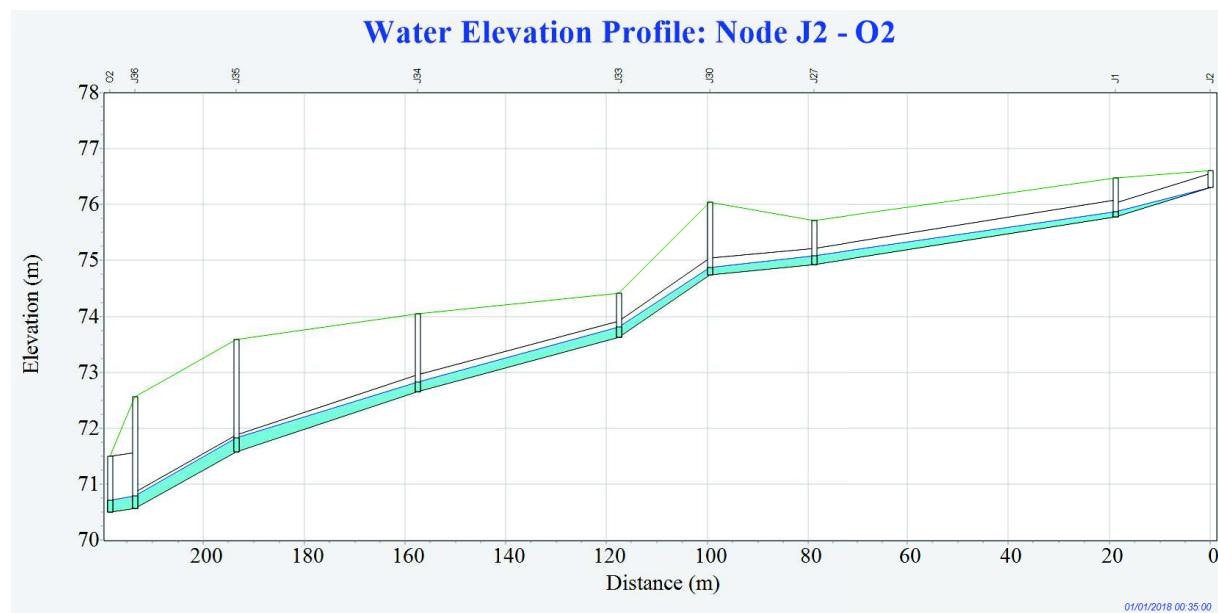


Figure 51 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J2 au O2

8.2.4 Synthèse des résultats de la modélisation avec les LIDS proposés par le collège

Le tableau ci-dessous présente les résultats sur les bassins versants ayant des aménagements proposés par le collège. 5 LIDS ont été installés sur 5 bassins. Les bassins 38, 28, 14, et 4 ont été couverts de pavés drainants. La cour principale (bassin 38) représente l'apport d'eau le plus conséquent avec $33,4 \text{ m}^3$ d'eau pour le scénario de 1 an/1h. Sur ces 33 m^3 , 2,3 sont évaporés.

ID	Surface totale des sous bassin versants (m^2)	Lids	Apport d'eau (m^3)			Perte évaporatoire (m^3)			Volume retenu (m^3)		
			1an/1h	20ans/1h	20ans/4h	1an/1h	20ans/1h	20ans/4h	1an/1h	20ans/1h	20ans/4h
S3	890	Jardin de pluie	18,6	51,6	67,4	1,3	1,3	1,2	17,4	50,3	66,3
S4	865	Pavé drainant	17,1	46,7	61,3	1,3	1,3	1,3	15,8	44,5	0,0
S35	290	Noue végétale	5,6	15,3	20,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0

Tableau 12 : Synthèse des trois scénarios de pluie au niveau des LIDS de la cour – aménagements proposés par le collège

ID	Surface totale des sous bassin versants (m ²)	Lids	Total précipitation (m ³)			Total ruissellement (m ³)			Pic ruissellement (LPS)		
			1an/1h	20ans/1h	20ans/4h	1an/1h	20ans/1h	20ans/4h	1an/1h	20ans/1h	20ans/4h
S2	125	x	1,8	4,4	6,0	5,7	5,7	21,1	3,9	10,4	4,5
S3	890	Jardin de pluie	12,6	31,5	42,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
S4	865	Amphithéâtre à pavé drainant	12,2	30,6	41,5	4,0	4,0	15,2	2,9	7,7	3,4
S6	64	x	0,9	2,3	3,1	3,6	3,6	18,6	1,5	6,4	3,8
S7	290	x	4,1	10,3	13,9	2,6	2,6	10,7	2,1	5,8	2,5
S8	13,5	x	0,2	0,5	0,6	0,2	0,2	0,6	0,1	0,3	0,1
S12	500	x	7,1	17,7	24,0	6,9	6,9	23,7	3,0	9,1	4,4
S14	419	x	5,9	14,8	20,1	8,5	8,5	30,7	5,7	14,7	6,5
S26	671	x	9,5	23,7	32,2	6,0	6,0	24,8	4,9	13,5	5,8
S28	330	x	4,7	11,7	15,8	4,6	4,6	15,7	2,8	7,0	3,1
S35	290	Noue végétale	4,1	10,3	13,9	3,2	3,2	16,4	1,3	5,7	3,4
S36	66	x	0,9	2,3	3,2	5,9	5,9	20,8	3,8	9,7	4,3
S37	357	x	5,0	12,6	17,1	5,4	5,4	18,5	3,3	8,4	3,7
S38	1520	x	21,5	53,8	72,9	30,6	30,6	111,6	17,5	47,4	21,9
S48	40,35	x	0,6	1,4	1,9	0,4	0,4	1,5	0,3	0,8	0,4

Tableau 13 : Synthèse des trois scénarios de pluie au niveau des sous-bassins versants de la cour – aménagements proposés par le collège

8.3 Proposition d'aménagements par l'équipe RRI

Cette partie présente les LIDS proposés par l'équipe RRI. Les aménagements imaginés doivent réduire au maximum le risque inondation, en prenant en compte au maximum les demandes du collège. Afin d'augmenter la lame d'eau infiltrée, plusieurs solutions ont été implémentées au modèle mathématique :

- un amphithéâtre à pavés drainants au droit du bassin versant n°4 (projet “*Mon collège demain*”);
- un espace végétalisé au niveau du bassin versant n°3 (projet “*Mon collège demain*”);
- une cour à pavés drainants sur les bassins versants n°14, 28 et 38.



Figure 52 : Carte de la cour de collège les Gâtines avant et après aménagements – propositions de l'équipe

Le tableau de stockage des volumes des LIDS proposés est présenté ci-dessous.

	Volume minimal de stockage selon le PLU (m³)	Volume de stockage de l'aménagement (m³)	Surface des LIDS (en Hectare)
Espace végétalisé	49,0	400,5	0,09
Amphithéâtre à pavés drainants	16,5	52,7	0,03
Cour à pavés drainants	124,8	408,4	0,23

Tableau 14 : Caractéristiques et paramètres des LIDS – aménagements proposés par l'équipe

8.3.1 Scénario : pluie de PDR 1 an et durée 1h – LIDS proposés par l'équipe



Figure 53 : Ruissellement pour la modélisation du collège avec les LIDS proposés par l'équipe – pluie de PDR 1 an et durée 1 heure

La figure suivante présente le profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au J2O. Aucune surcharge du réseau n'est constatée.

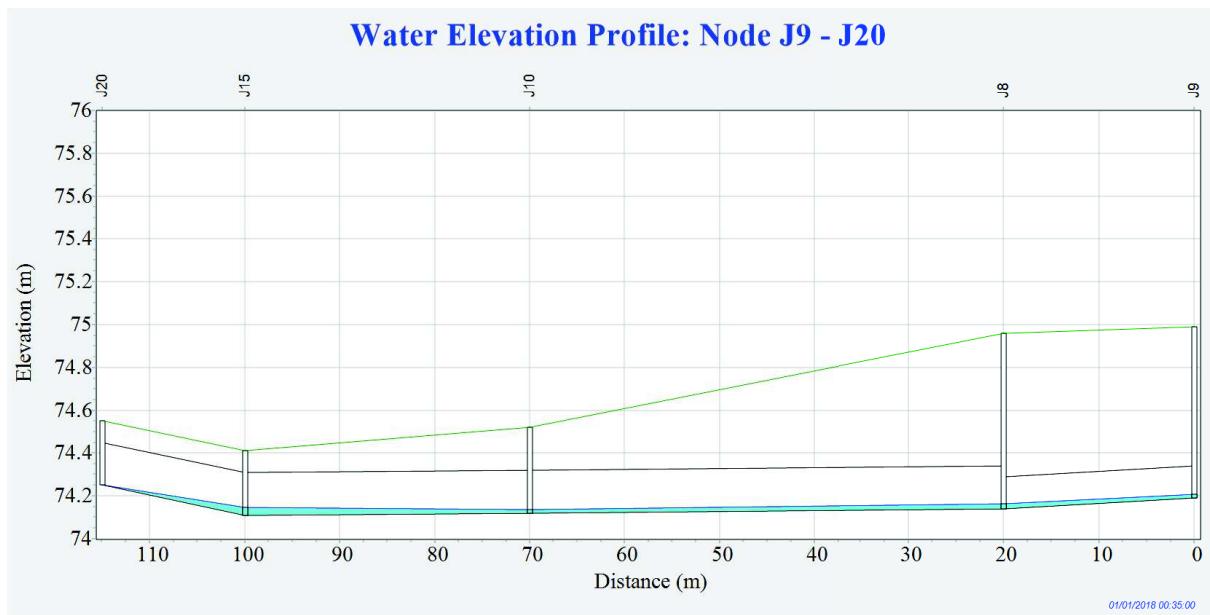


Figure 54 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au J20

La figure suivante présente le profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au O2. Aucune surcharge du réseau n'est constatée.

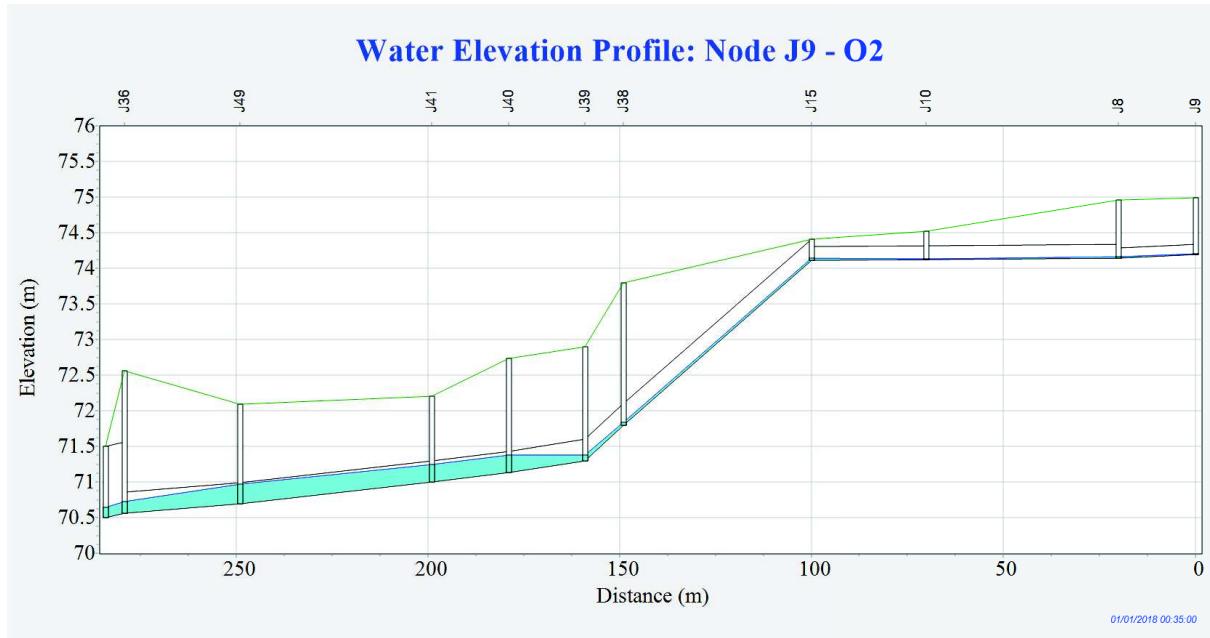


Figure 55 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au O2

La figure suivante présente le profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J2 au O2. Aucune surcharge du réseau n'est constatée.

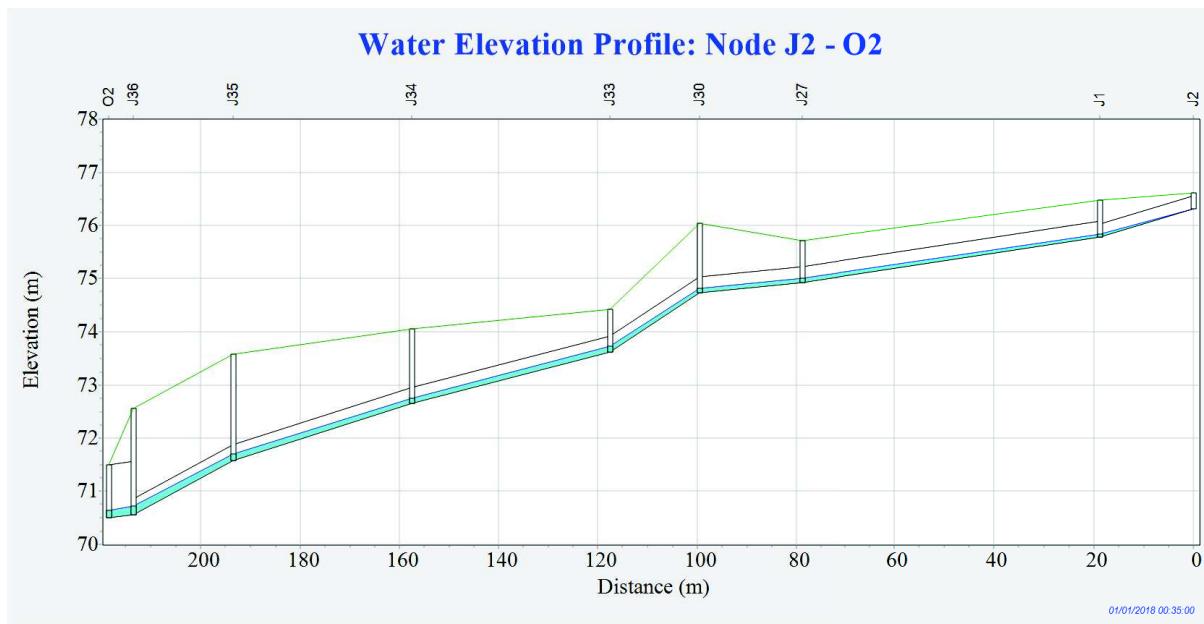


Figure 56 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J2 au O2

8.3.2 Scénario : pluie de PDR 20 ans et durée 4h – LIDS proposés par l'équipe



Figure 57 : Ruissellement pour la modélisation du collège avec les LIDS proposés par l'équipe – pluie de PDR 20 ans et durée 4 heures

La figure suivante présente le profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au J20. Aucune surcharge du réseau n'est constatée.

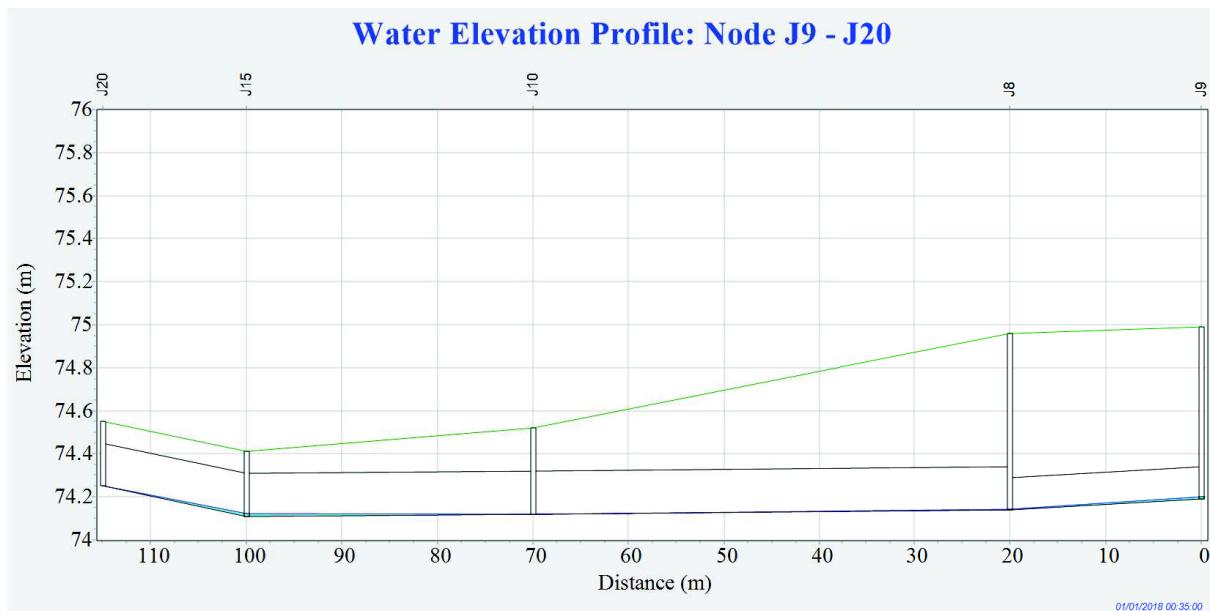


Figure 58 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au J20

La figure suivante présente le profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au O2. Les nœuds J49 et J41 et J40 entrent en surcharge sur une dizaine de centimètres, mais n'occasionnent pas de débordement.

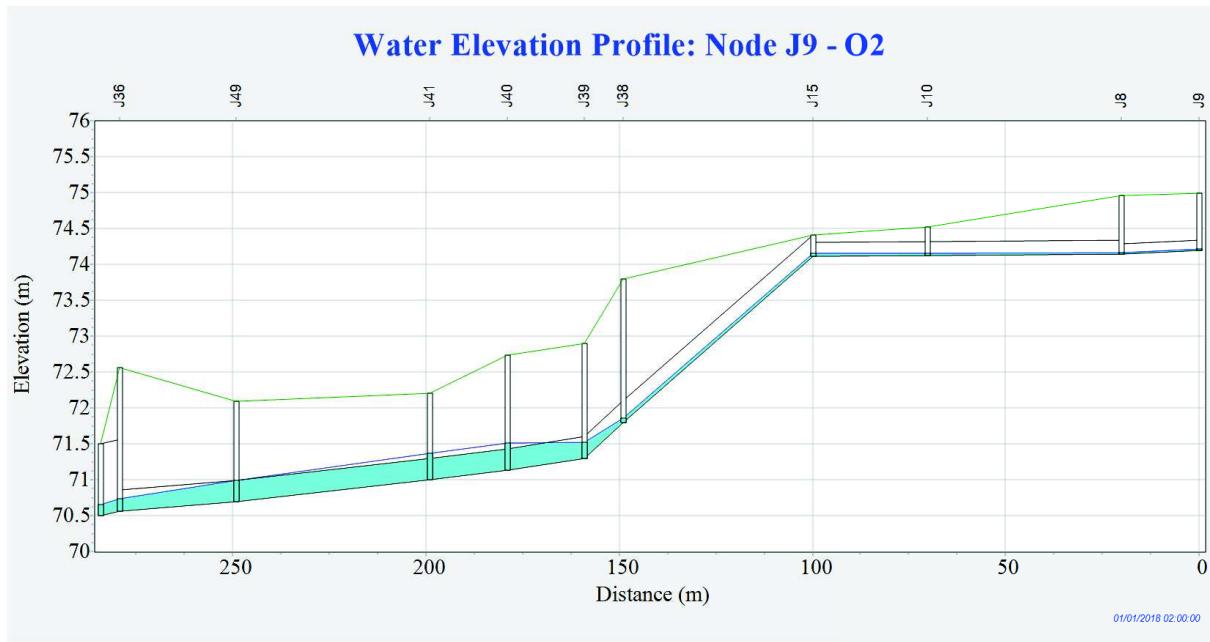


Figure 59 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au O2

La figure suivante présente le profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J2 au O2. Aucune surcharge du réseau n'est constatée.

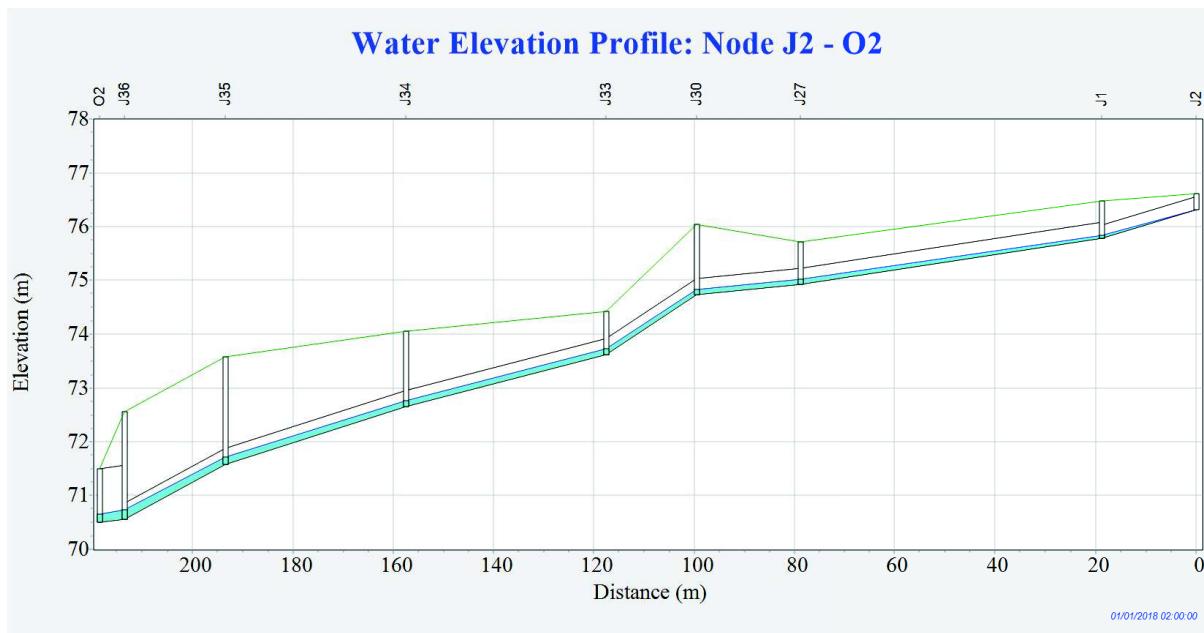


Figure 60 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J2 au O2

8.3.3 Scénario : pluie de PDR 20 ans et durée 1h – LIDS proposés par l'équipe

La figure ci-dessous présente la carte des pics de ruissellements pour la pluie de PDR 20 ans et de durée 1h. La présence des LIDS réduit fortement le pic de ruissellement. En effet, la cour du collège a un ruissellement inférieur à 6 mm/h ce qui n'était pas le cas dans les précédents scénarios (plus de 20 mm/h avec aménagement proposés par le collège et sans les aménagements).



Figure 61 : Ruissellement pour la modélisation du collège avec les LIDS proposés par l'équipe – pluie de PDR 20 ans et durée 1 heure

Les figures ci-dessous présentent les résultats des profils en long pour le scénario le plus pénalisant France la pluie de 20 ans en 1h. Les cotes sont nettement plus basses que les précédents scénarios (de l'ordre du mètre). Les aménagements semblent donc bien efficaces.

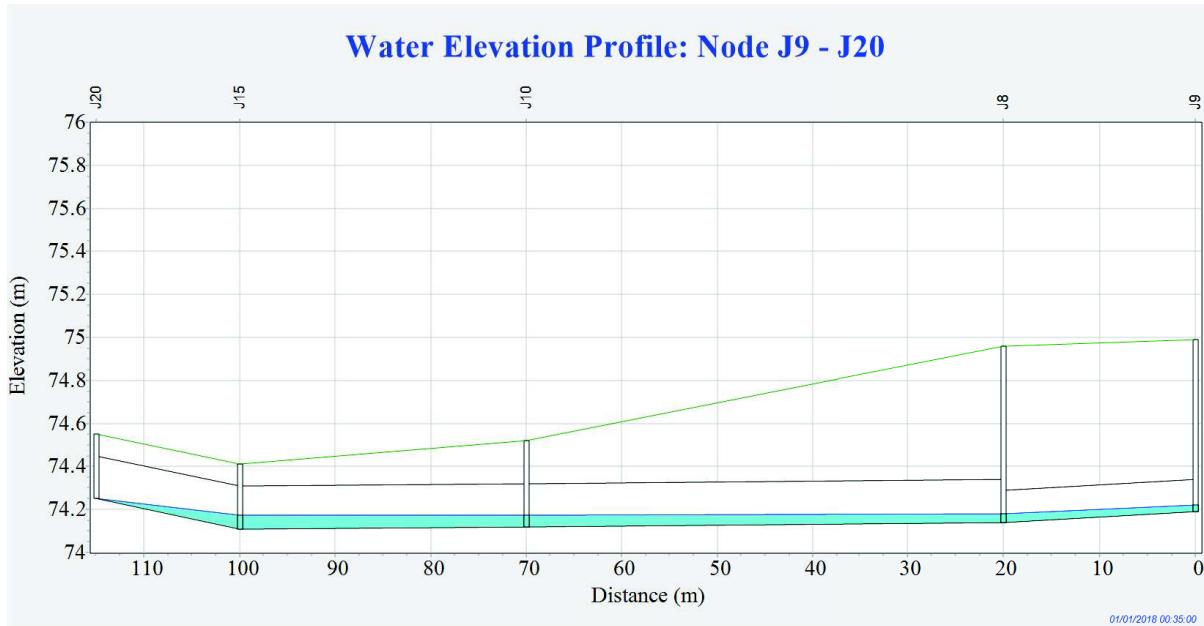


Figure 62 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au J20

Le profil en long du nœud J9 à l'exutoire (ci-dessous) confirme que les cotes sont largement acceptables.

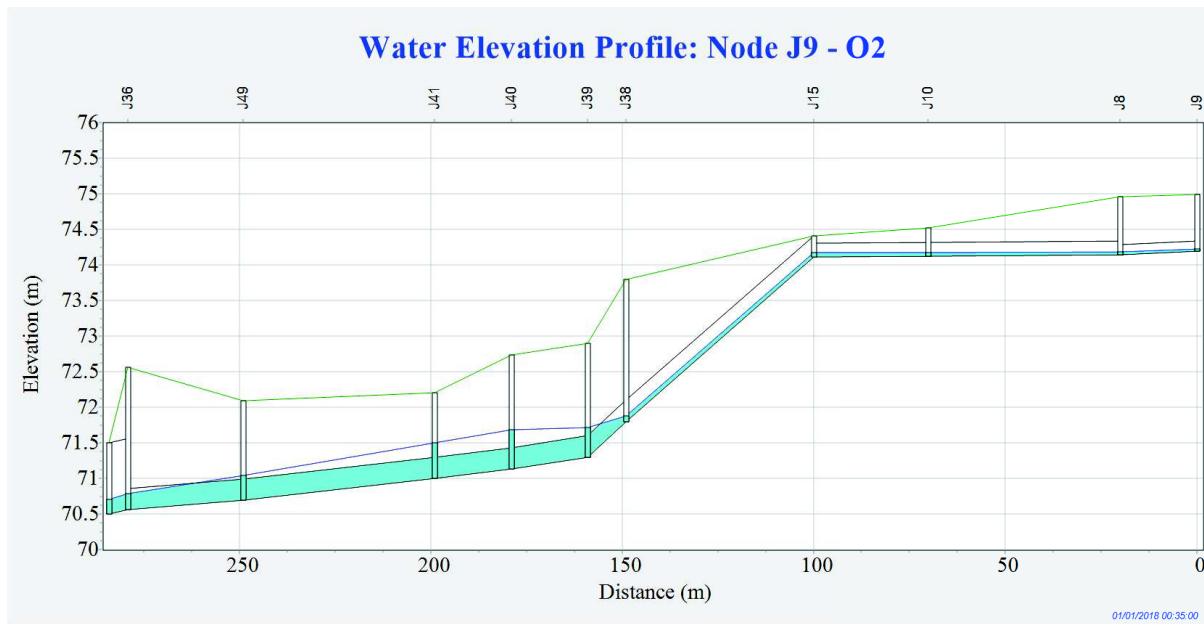


Figure 63 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J9 au O2

Le profil en long de la figure ci-dessous montre l'évolution des cotes entre les nœuds J2 et le nœud de l'exutoire du bassin. Ici aussi, les aménagements sont très performants.

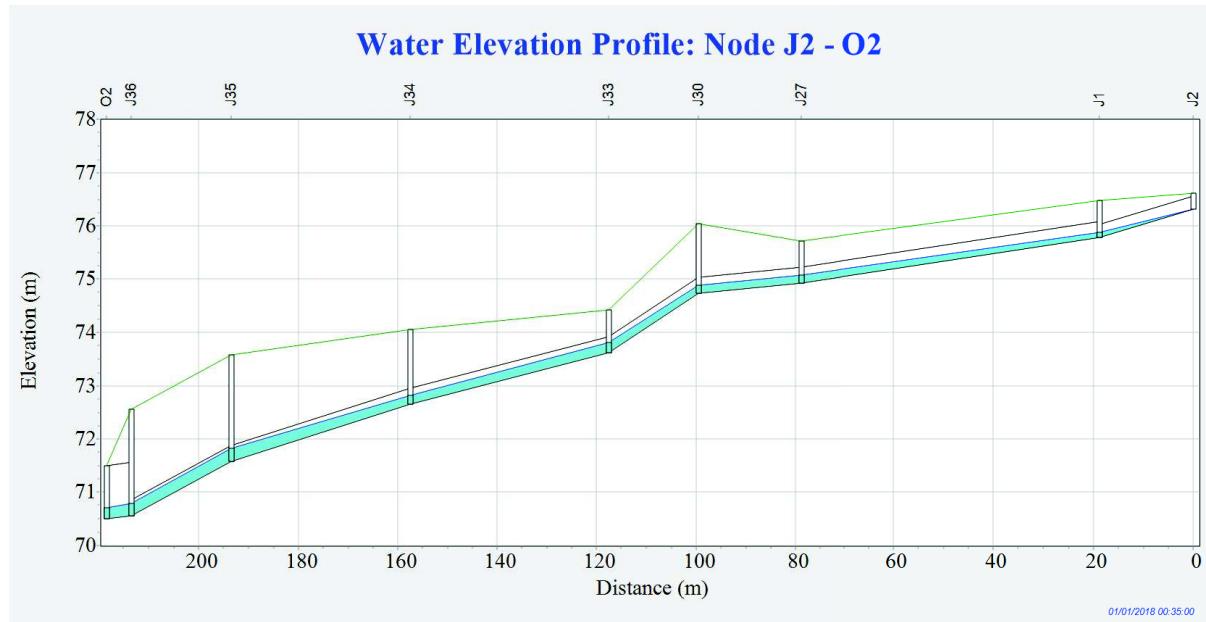


Figure 64 : Profil en long des hauteurs d'eau maximales des canalisations du J2 au O2

8.3.4 Synthèse des résultats de la modélisation avec les LIDS proposés par l'équipe

Le tableau suivant présente les résultats obtenus pour les différents scénarios de pluie sur les sous-bassins versants sur lesquels des LIDS ont été placés.

ID	Surface totale des sous bassin versants (m ²)	Lids	Apport d'eau (m ³)			Perte évaporatoire (m ³)			Volume retenu (m ³)		
			1an/1h	20ans/1h	20ans/4h	1an/1h	20ans/1h	20ans/4h	1an/1h	20ans/1h	20ans/4h
S3	890	Jardin de pluie	18,6	67,4	51,6	1,3	1,3	1,3	17,4	66,3	50,3
S4	865	Pavé drainant	17,1	61,3	46,7	1,3	1,3	1,3	15,8	58,6	44,5
S14	419	Pavé drainant	8,5	23,5	0,6	0,6	0,6	0,0	29,4	22,4	0,0
S28	330	Pavé drainant	4,7	15,8	11,7	0,5	0,5	0,5	4,2	15,1	11,0
S38	1520	Pavé drainant	33,4	115,9	86,5	2,3	2,3	2,3	31,1	110,7	82,6

Tableau 15 : Synthèse des trois scénarios de pluie au niveau des LIDS de la cour – aménagements proposés par l'équipe

Le tableau suivant présente une synthèse de l'ensemble des résultats obtenus pour les différents scénarios de pluie (PDR 1 an et durée 1h ; PDR 20 ans et durée 4h ; PDR 20 ans et durée 1h). Les LIDS permettent de favoriser l'infiltration et de réduire le ruissellement de surface. En effet, les valeurs obtenues pour le ruissellement (m³) des sous-bassins versants avec LIDS sont largement inférieures aux valeurs de ruissellement des autres sous-bassin versants. Grâce à la

mise en place du jardin de pluie, le taux de ruissellement sur le sous-bassin versant S3, S14, S28 et S38 est passé à 0 m³ pour une pluie de PDR 1 an et de durée 1 heure.

ID	Surface totale des sous bassin versants (m ²)	Lids	Total précipitation (m3)			Total ruissellement (m3)			Pic ruissellement (LPS)		
			1an/1h	20ans/1h	20ans/4h	1an/1h	20ans/1h	20ans/4h	1an/1h	20ans/1h	20ans/4h
S2	125	x	1,77	4,42	5,99	5,15	5,15	19,93	3,79	10,25	4,46
S3	890	Jardin de pluie	12,58	31,49	42,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
S4	865	Amphithéâtre à pavé drainant	12,23	30,60	41,46	3,41	3,41	13,99	2,75	7,61	3,29
S6	64	x	0,90	2,26	3,07	6,06	6,06	22,25	4,12	10,79	4,73
S7	290	x	4,10	10,26	13,90	2,61	2,61	10,72	2,11	5,83	2,52
S8	13,5	x	0,19	0,48	0,65	0,19	0,19	0,64	0,11	0,29	2,52
S12	500	x	7,07	17,69	23,97	6,86	6,86	23,65	2,96	9,05	4,35
S14	419	Pavés drainant	5,92	14,82	20,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
S26	671	x	9,49	23,74	32,16	6,03	6,03	24,79	4,88	13,50	5,84
S28	330	Pavés drainant	4,67	11,68	15,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
S35	290	Noue végétale	4,10	10,26	13,90	5,57	5,57	19,97	3,66	9,51	4,17
S36	66	x	0,93	2,34	3,16	5,87	5,87	20,82	3,79	9,71	4,27
S37	357	x	5,05	12,63	17,11	5,37	5,37	18,48	3,31	8,38	3,69
S38	1520	Pavés drainant	21,49	53,78	72,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
S48	40,35	x	0,57	1,43	1,93	0,36	0,36	1,49	0,29	0,81	0,35

Tableau 16 : Synthèse des trois scénarios de pluie au niveau des sous-bassins versants de la cour – aménagements proposés par l'équipe

VI- Coût des aménagements

1. Chiffrage des aménagements envisagés par le collège

En tenant compte des caractéristiques des aménagements enregistrés sur SWMM, une estimation des coûts (fourchette haute / fourchette basse) des aménagements proposés via le projet “Mon collège demain” a été réalisée. Une synthèse des coûts sont présentés dans les tableaux ci-dessous.

Noue végétale – 290 m ²		
Prestation	Prix -	Prix +
Terrassement (dalle béton et remblais), tri, évacuation et prise en charge en filière (€)	6 000	12 000
Apport du massif drainant (€)	1 000	4 000

Travaux paysagers (Travaux d'engazonnement comprenant, la préparation mécanique et manuelle du terrain. Fourniture de la graine, semis, enfouissement puis roulage. 1ère tonte et traitement sélectif et mise en place d'un drain) (€)	20 000	30 000
TOTAL (HT)	27 000	46 000

Tableau 17 : Chiffrage de l'aménagement d'une noue végétalisé

Espace végétalisé – 890 m²		
Prestation	Prix -	Prix +
Terrassement (dalle béton et remblais), tri, évacuation et prise en charge en filière (€)	20 000	33 000
Travaux paysagers (Travaux d'engazonnement comprenant, la préparation mécanique et manuelle du terrain. Fourniture de la graine, semis, enfouissement puis roulage. 1ère tonte et traitement sélectif et mise en place d'un drain) (€)	40 000	50 000
TOTAL (HT)	60 000	83 000

Tableau 18 : Chiffrage de l'aménagement d'un espace végétalisé

Amphithéâtre à pavés drainants – 300 m²		
Prestation	Prix -	Prix +
Terrassement (remblais/terre végétale), tri, évacuation et prise en charge en filière (€)	4 000	5 000

Conception structurale des gradins et mise en œuvre des pavés drainants (€)	100 000	130 000
TOTAL (HT)	104 000	135 000

Tableau 19 : Chiffrage de l'aménagement d'un amphithéâtre à pavés drainants

Le coût total de ces trois dispositifs est compris entre **191 000 €** et **264 000 € HT**. L'estimation globale et complète des travaux est détaillée en annexe 25.

2. Chiffrage des aménagements envisagés par l'équipe RRI

Dans cette configuration, il est proposé d'ajouter des pavés drainants au droit des sous-bassins 14, 28 et 38. Par ailleurs, l'espace végétalisé et l'amphithéâtre seront conservés dans cette proposition et la noue sera supprimée. Le coût de l'amphithéâtre à pavés drainants et de l'espace végétalisé est indiqué dans la partie précédente. Le détail des coûts (fourchette haute / fourchette basse) est présenté dans le tableau ci-dessous.

Pavé végétal – 2 270 m²		
Prestation	Prix -	Prix +
Terrassement (dalle béton et remblais), tri, évacuation et prise en charge en filière (€)	20 000	25 000
Réfection de la cour du collège avec des matériaux imperméables (apport et pose des pavés drainants) (€)	200 000	230 000
TOTAL (HT)	220 000	255 000

Tableau 20 : Chiffrage de l'aménagement d'une cour à pavés drainants

Un devis complet a été réalisé et est disponible en annexe 26. Le coût total engendré par la mise en œuvre d'un revêtement imperméable, de l'amphithéâtre à pavés drainants (cf. tableau 12) et de l'espace végétalisé (cf. tableau 11) est compris entre **384 000 €** et **473 000 € HT**.

VII- Pérenniser la lutte contre le risque inondation

L'étude d'avant-projet présentée dans ce présent rapport fait état des connaissances relatives aux problématiques d'inondation au droit du collège les Gâtines. Les études de l'hydrogéologie et de la géologie au niveau de la cour de collège ont révélé l'intérêt de mettre en place des dispositifs d'infiltration des eaux pluviales. La deuxième année de projet tuteuré s'est articulée autour de quatre thématiques qui sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tâches	Responsables	Difficulté	Etat	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai
<i>Etude du sol</i>												
Visite terrain n°2	Emeline	Faible	Fini									
Essais Porchet supplémentaires	Emeline	Modéré	Fini									
Prélèvement d'échantillons de sol	Emeline	Modéré	Fini									
Analyse des échantillons	Emeline	Modéré	Fini									
Interpretation des résultats	Emeline	Elevé	Fini									
<i>Modélisation SWMM</i>												
Paramétrage du sol (perméabilité, bassin versant)	Raphaël / Adrien	Très élevé	Fini									
Paramétrage des canalisations	Raphaël / Adrien	Très élevé	Fini									
Calcul de la pluie	Raphaël / Adrien	Elevé	Fini									
Mise en place de LID	Raphaël / Adrien	Très élevé	Fini									
Critique des résultats	Raphaël / Adrien	Modéré	Fini									
<i>Dispositifs d'infiltration</i>												
Recherche de REX	Hugo	Modéré	Fini									
Etude de l'efficacité des aménagements	Hugo	Elevé	Fini									
Recommandations relatives aux dispositifs	Hugo	Modéré	Fini									
Chiffrage des aménagements	Hugo	Très élevé	Fini									
<i>Rédaction et présentation</i>												
Rapport final de 2 ^{ème} année	Tous	Très élevé	Fini									
Soutenance – présentation du projet final	Tous	Elevé	En cours									

Légende :



Tableau 21 : Rétroplanning de la 2^{ème} année de projet tuteuré

Le collège les Gâtines et le CD91 vont disposer des informations nécessaires à la mise en place de nouveaux aménagements dans la cour. Ces deux acteurs pourront poursuivre le processus et démarrer les travaux si un accord est trouvé.

Ce projet avait pour objectif de présenter un état des lieux de l'hydrogéologie et de la géologie au droit du collège les Gâtines, ainsi que de présenter la faisabilité d'un processus de désimperméabilisation de la cour [22]. Pour pérenniser l'étude de faisabilité, de futurs étudiants du Master Sol, Eau, Environnement pourraient reprendre le présent projet afin de suivre les éventuels travaux d'aménagement au droit de la cour du collège les Gâtines. Ceci permettrait de comparer la robustesse du modèle à la réalité des dispositifs d'infiltration des eaux pluviales. En outre, le modèle pourrait être réutilisé pour affiner le réaménagement de la cour de collège.

Conclusion

Cette partie conclut l'étude de faisabilité qui s'est déroulée sur deux années.

L'étude a permis de démontrer que l'aménagement de dispositif d'infiltration des eaux pluviales était envisageable au niveau de la cour du collège les Gâtines. Les analyses de sols effectués dans le cadre de ce projet n'attestent d'aucune pollution.

Les LIDS proposés atteignent les objectifs de stockage des eaux pluviales fixés par le PLU de Savigny-sur-Orge et contribue à réduire significativement le ruissellement sur la zone d'étude d'après les résultats de la modélisation.

Le modèle hydraulique développé dans cette étude pourra être utilisé pour :

- dimensionner des espaces perméables sur le collège ;
- prévenir les débordements de réseaux de collecte d'eau pluviale sur le collège ;
- servir dans un but pédagogique pour les prochains alternants ou stagiaires du CD91.

En complément de l'installations de LIDS, la réalisation d'un curage des canalisations existantes, fortement obstrué, est préconisé.

Ces deux années de projet ont permis d'acquérir les compétences nécessaires à la gestion de projet au travers d'une thématique d'actualité. Développer les outils pour lutter contre le risque inondation est essentiel pour prévenir des dommages que provoquent ces évènements.

Bibliographie

[1] – INSEE – artificialisation des sols :

<https://www.insee.fr/fr/statistiques/3281689?sommaire=3281778>

[2] – Légifrance – Loi climat résilience

<https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043956924>

[3] – Ministère de la transition écologique, Généralités sur le risque inondation en France – jeudi 30 avril 2020.

<https://www.ecologie.gouv.fr/generalites-sur-risque-inondation-en-France>

[4] – Géorisques – Les inondations par ruissellement :

<https://www.georisques.gouv.fr/articles-risques/inondations/les-inondations-par-ruissellement>

[5] – Rapport du GIEC – Changement climatique et terres émergées :

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/06/SRCCL_SPM_fr.pdf

[6] – Directive 2007/60/CE du Parlement Européen et du Conseil du 23 octobre 2007 relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation :

<https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000523817/>

[7] – Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires – Préventions des inondations :

<https://www.ecologie.gouv.fr/prevention-des-inondations>

[8] – Guide de compatibilité des PLU au SAGE Orge-Yvette :

https://www.orge-yvette.fr/images/publications/sage/guide_compatibilite_plu_sage_oy.pdf

[9] – Projet “*Mon collège demain*” – collège les Gâtines à Savigny-sur-Orge :

<https://view.genial.ly/5fff29c5fbb1810d15725f57/presentation-mon-college-demain-college-les-gatines-91600>

[10] – Banque des Sous-Sol :

<https://infoterre.brgm.fr/page/banque-sol-bss>

[11] – Base de Donnée des Limites des Systèmes Aquifères :

<https://bdlisa.eaufrance.fr/>

[12] – Eurofins – Sites et sols pollués :

<https://www.eurofins.fr/environnement/analyses/sites-et-sols-pollues/>

[13] – Gestion des eaux pluviales – Guide pour la mise en œuvre de techniques alternatives :

https://www.gesteau.fr/sites/default/files/brochure-symasol_isbn_web.pdf

[14] – Lewis A. Rossman, STORM WATER MANAGEMENT MODEL USER'S MANUAL, Version 5.0, Water Supply and Water Resources Division National Risk Management Research Laboratory Cincinnati, OH 45268 EPA/600/R-05/040 Revised July 2010

[15] – Maher ABDALLAH, Docteur de l'Université Louis Pasteur – Strasbourg I, Sur les méthodes de discréétisation numérique de problèmes hyperboliques non linéaires appliquées aux équations de Barré de Saint-Venant pour la modélisation de l'hydraulique en réseau d'assainissement, Soutenue publiquement le 3 mai 2005

[16] – Marion Tellier EPA SWMM 5 manuel d'initiation Traduction et adaptation libres du tutoriel du manuel de l'utilisateur : »Storm Water Management Model – User's Manuel :

https://sigea.educagri.fr/fileadmin/user_upload/guerreiro/SigAppl/SWMM/manuel-init-2010.pdf

[17] – Modèle de Green et Ampt – Wikhydro :

[http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Green_et_Ampt_\(mod%C3%A8le_de\)__\(HU\)](http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Green_et_Ampt_(mod%C3%A8le_de)__(HU))

[18] – Jean-Marie Mouchel, Notes concernant le logiciel SWMM, version 5.0, M2 SEE, 2020

[19] – Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F. and Loumagne, C., 2005. Which potential evapotranspiration input for a rainfall-runoff model ? Part 2 – Towards a simple and efficient PE model for rainfall-runoff modelling. Journal of Hydrology 303(1-4), 290-306.

<https://webgr.inrae.fr/modeles/modele-devapotranspiration/>

[20] – Le coefficient cultural de quelques espèces végétales – BRL :

<https://www.brl.fr/phototheque/photos/pdf/Memento-fiche6.pdf>

[21] – Investigating effects of low impact development on surface runoff and TSS with a calibrated hydrodynamic model Sezar GÜLBAZ, Cevza Melek KAZEYILMAZ-ALHAN :
<http://seine.oieau.fr/oieau.fr/sites/www.oieau.fr.eaudoc/files/33143.pdf>

[22] – Adrien GARNIER Emeline MONTEIL Raphaël PIN Hugo PINEAU
Désimperméabiliser pour lutter contre les risques d'inondation Master Sol, Eau, Environnement
Année 2020-2021 Version finale.