

Ministère de la Communauté française

**Direction générale de l'enseignement non obligatoire et de la
recherche scientifique**

**Recherche scientifique fondamentale collective d'initiative
ministérielle (FRSFC-IM) intitulée :**

**« Etude et modélisation des impacts hydrologiques de pluies
exceptionnelles dans un environnement vallonné et boisé »**

D.O.45 – P.A. 20 – A.B.31.01

Aquapôle

Rapport final - Septembre 2009



Table des Matières

TABLE DES MATIÈRES	2
A. CONTEXTE	5
<i>Programme de travail</i>	5
<i>Equipes participantes</i>	6
B. MÉTHODOLOGIE UTILISÉE	7
<i>WP 1 Acquisition des données instrumentales et de terrain nécessaires à l'analyse et aux impacts hydrologiques de l'événement du 29 mai 2008</i>	7
<i>WP 2 Implémentation de la représentation des processus dans un modèle intégré existant ; calibration.</i>	9
<i>WP 3 Case study : résultats de la modélisation et élaboration intégrée de scénarios de simulation</i>	10
<i>Structure du rapport</i>	10
C. COLLECTE DES DONNÉES ET INTERPRÉTATION	11
1. Présentation de l'événement pluviométrique	12
1 - 1. <i>Introduction : données pluviométriques recueillies au pas de temps horaire fixe (en heure civile : TU+2)</i>	12
1 - 2. <i>Suivi spatio-temporel de l'événement pluviométrique extrême au pas de temps horaire</i>	13
1 - 3. <i>Pluviogramme et hyétogrammes détaillés au pas de temps de 5 minutes et périodes de retour des cumuls observés estimés sur 10, 20, 30 et 60 minutes</i>	16
1 - 4. <i>Conclusion</i>	22
2. Contexte géologique et hydrogéologique	23
2 - 1. <i>Introduction</i>	23
2 - 2. <i>Contexte géologique</i>	23
2 - 2 - 1. <i>Lithostratigraphie</i>	23
2 - 2 - 2. <i>Cadre structural</i>	26
2 - 3. <i>Contexte Hydrogéologique</i>	26
2 - 3 - 1. <i>Aquifère alluvial</i>	26
2 - 3 - 2. <i>Aquifère des sables oligocènes</i>	26
2 - 3 - 3. <i>Aquifères schisto-gréseux du Paléozoïque</i>	27
2 - 4. <i>Données disponibles</i>	28
2 - 4 - 1. <i>Consultation de la banque de données hydrogéologiques de la Région wallonne</i>	28
2 - 4 - 2. <i>Paramètres hydrodynamiques pour les niveaux de terrasses de la Meuse et l'Ourthe</i>	30
2 - 4 - 3. <i>Paramètres hydrodynamiques pour les sables oligocènes</i>	30
2 - 4 - 4. <i>Paramètres hydrodynamiques pour les formations du Paléozoïque</i>	30
2 - 5. <i>Contexte géologique local</i>	33
2 - 5 - 1. <i>Bassin du Renory</i>	33
2 - 5 - 2. <i>Bassin du Sordeye</i>	35
2 - 5 - 3. <i>Bassin du Blanc-Gravier</i>	37
2 - 5 - 4. <i>Bassin du Fond du Moulin</i>	39
2 - 6. <i>Conclusion</i>	41
3. Opérations topographiques	42
3 - 1. <i>Introduction</i>	42
3 - 2. <i>Implantation d'un réseau de points de contrôles</i>	43
3 - 2 - 1. <i>Matérialisation des bornes et localisation</i>	43
3 - 2 - 2. <i>Cheminement – Etablissement de la polygonale</i>	44
3 - 2 - 3. <i>Levés complémentaires</i>	48

4. Création de modèles numériques de terrain (MNT)	49
4 - 1. Sélection des sources de données	49
4 - 2. Calcul du MNT	50
4 - 3. Conclusions et perspectives	52
5. Contexte hydrodynamique et géomorphologique	53
<i>PARTIE 1 : Présentation générale</i>	53
5 - 1. Présentation générale de la problématique	53
5 - 1 - 1. L'événement du 29 mai 2008	53
5 - 1 - 2. Caractéristiques des bassins versants	54
<i>PARTIE 2 : Acquisition des données</i>	58
5 - 2. Levés topographiques	58
5 - 2 - 1. Introduction	58
5 - 2 - 2. Raccord au système Lambert belge 1972	58
5 - 2 - 3. Levés topographiques, profils transversaux et longitudinaux	58
5 - 2 - 4. Estimation des débits et des puissances	77
5 - 2 - 5. Phénomène d'incision	80
5 - 3. Aspects granulométriques et sédimentologiques	82
5 - 3 - 1. Granulométrie des dépôts	82
5 - 3 - 2. Estimation des débits et des puissances à partir des informations granulométriques	87
5 - 3 - 3. Sédimentation dans l'étang du Blanc Gravier	90
5 - 3 - 4. Estimation du volume du dépôt en amont de l'étang du Blanc Gravier	93
D. MODÉLISATION HYDROLOGIQUE	96
1. Contexte de modélisation	97
2. Pluies	97
3. Hauteurs d'eau et débits des rivières	99
4. Bassin versant du Rénory - Principe de modélisation	100
4 - 1. Modèle numérique de terrain	101
4 - 2. Orthophotoplans (PPNC)	102
4 - 3. Réseau hydrographique digitalisé	102
4 - 4. Occupation du sol	103
4 - 5. Cartographie numérique des sols (PCNSW)	110
4 - 6. Cartes de perméabilité	112
4 - 7. Détermination du bassin versant	112
4 - 8. Pentes	117
4 - 9. Ouvrages de protection existants - Bassins d'orages	118
4 - 10. Partie urbanisée aval du bassin	121
4 - 11. Modélisation hydrologique de mai 2008	124
4 - 12. Modélisation hydrologique de pluies de projet	128
4 - 13. Coefficients de production moyens	131
5. Bassin du Blanc Gravier	131
5 - 1. Topographie	131
5 - 2. Pentes	133
5 - 3. Occupation du sol	134
5 - 4. Réseau drainant	137
5 - 5. Modélisations hydrologiques - Mai 2008	137
5 - 6. Modélisations de pluies de projet - 20, 50, 100, 200 ans	138
5 - 7. Coefficients de production moyens	139
6. Bassin du Fond du Moulin	140
6 - 1. Topographie	140
6 - 2. Pentes	141
6 - 3. Particularités du bassin versant	142

6 - 4.	Réseau drainant	145
6 - 5.	Modélisations hydrologiques - mai 2008	146
6 - 6.	Modélisations de pluies de projet - 20, 50, 100, 200 ans	147
6 - 7.	Coefficients de production moyens	148

E. CONCLUSIONS 149

F. RÉFÉRENCES 152



A. Contexte

Les événements extrêmes du jeudi 29 mai 2008 en région liégeoise et leurs conséquences douloureuses (humaines et financières) amènent à chercher à comprendre le phénomène, à le reproduire et à l'anticiper. Pour rappel, un épisode pluviométrique de courte durée, mais très intense (lame d'eau d'environ 90 mm en moins de 2 heures) sur le domaine du Sart Tilman a provoqué des inondations très soudaines (communément appelées « flash-flood ») aux abords des ruisseaux descendant du Sart Tilman vers la Meuse et l'Ourthe.

Ces événements exceptionnels ont présenté une forte hétérogénéité spatiale et temporelle à l'échelle régionale. Outre la complexité de la dynamique météorologique qui les a générés, leurs conséquences ont été le fruit de la combinaison complexe d'une série de facteurs environnementaux : nature des sols, topographie locale, couverture végétale, ouvrages anthropiques et urbanisation ...

A l'initiative de la Ministre de la recherche scientifique de la Communauté Française (Marie-Dominique Simonet), l'Aquapôle a fédéré un travail multidisciplinaire visant à décrire les mécanismes de ces événements extrêmes et à reproduire les impacts hydrologiques de ces pluies exceptionnelles à l'échelle locale, dans un environnement boisé et vallonné.

Programme de travail

L'approche pluridisciplinaire exigée pour la rencontre de ces phénomènes a pu être rapidement appréhendée à l'Aquapôle de l'Université de Liège. En particulier, l'existence de modèles compartimentaux intégrés ont permis de tenir compte de la dynamique des bassins versants, de la nature hydrogéologique des sols et de la complexité des écoulements de surface et/ou sur l'axe hydraulique. Cette approche de modélisation opérationnelle et pragmatique a impliqué un noyau d'équipes composées de topo-climatologues, de topographes, d'hydrauliciens, d'hydrogéologues et d'intégrateurs numériques. Sur base de la description des processus et de leurs dynamiques spatiale et temporelle ayant abouti à ces catastrophes, l'Aquapôle a reproduit les événements grâce aux outils de simulations numériques s'appuyant sur une description fine de la météorologie et de la topographie locale, des ouvrages d'art existants et des spécificités locales de toute nature (anthropiques et naturelles).

En s'appuyant sur les expertises des équipes déjà impliquées dans des domaines en lien avec la problématique visée et sur les outils de simulation numérique dont elles possèdent la maîtrise, le consortium d'équipes fédérées à l'Aquapôle a pu expliquer, décrire la nature du flash-flood et le reproduire. Deux axes majeurs de recherche ont été abordés concernant d'une part les moyens à mettre en œuvre pour lutter efficacement contre les conséquences de ces événements et d'autre part concernant le caractère prévisionnel de l'analyse (probabilité d'occurrence, fréquence, ...).

Les événements du jeudi 29 mai 2008 ont été extrêmes dans la région du Sart Tilman (où se trouve l'Université de Liège), avec des impacts maximum aux exutoires des ruisseaux dévalant du Sart Tilman vers la Meuse (ruisseau de Renory) et vers l'Ourthe (ruisseaux du Fond du Moulin et du Blanc Gravier). D'autres événements du même type ont eu lieu dans les semaines suivantes en région Liégeoise (Remicourt, ...). Le choix du Sart Tilman comme cas d'étude s'imposait cependant vu la bonne connaissance préliminaire du site par les équipes de l'ULG et la

(relativement) bonne instrumentation du site. Le case study prévu a intégré les bassins versants du Sart Tilman (avec ses ruisseaux se rejetant dans la Meuse et l'Ourthe). La méthodologie développée lors de cette étude est naturellement transférable à d'autres applications.

La méthodologie utilisée par l'Aquapôle s'intègre dans une réflexion pluridisciplinaire et s'appuie sur un outil de simulation numérique :

- Un premier volet du projet a été consacré à la recherche intégrée des processus à modéliser, la collecte et la préparation des données nécessaires (dans les environnements cartographiques appropriés), à l'alimentation des modèles et à la création des bases de données du modèle intégré local. Ce volet a impliqué plusieurs équipes de façon à prendre en considération l'ensemble des processus et paramètres pertinents à l'atteinte de l'objectif visé.
- Le second volet a été consacré à la modélisation proprement dite, c'est-à-dire à l'implémentation de la représentation des processus dans un modèle intégré existant ainsi que sa calibration.
- Un troisième volet a été dédié à l'analyse à l'échelle locale (case study) des résultats de la modélisation et à l'élaboration intégrée de scénarios de simulation (e.g. mode de fonctionnement du bassin d'orage en amont de la campagne de Renory, écoulement en pertuis ou à surface libre dans la vallée du Fond du Moulin, mesures anthropiques, ...).

Equipes participantes

Ont participé à cette étude (outre l'unité R&D de l'Aquapôle, Dir. JF Delière, qui en a assuré la coordination), 5 services de l'Université de Liège :

- le laboratoire de Climatologie et Topoclimatologie, Prof. M. Erpicum, qui a étudié et précisé les valeurs des précipitations ayant eu lieu ;
- l'unité d'Hydrogéologie et de Géologie de l'Environnement, Prof. A. Dassargues, qui a étudié le rôle des aquifères lors de l'évènement ;
- le laboratoire de Topographie et de Géométrie, Prof. R. Billen, qui a généré un Modèle Numérique de Terrain (MNT) complet de la zone étudiée ;
- le laboratoire d'Hydrographie et de Géomorphologie Fluviale, Prof. Fr. Petit, qui a estimé les hauteurs d'eau, les débits et les transports de sédiments des ruisseaux ;
- l'unité d'Hydrologie, Hydrodynamique Appliquée et de Constructions Hydrauliques, Prof. M. Pirotton qui a développé et appliqué le modèle intégré WOLF HYDRO.



B. Méthodologie utilisée

En dehors des tâches de coordination courant sur l'entièreté de la durée de l'étude, le projet a été structuré en 3 « Work Packages » (WP) décrits ci-dessous :

WP 1 Acquisition des données instrumentales et de terrain nécessaires à l'analyse et aux impacts hydrologiques de l'événement du 29 mai 2008

Le premier volet de l'étude comportait les tâches suivantes :

1. estimation de la hauteur de la lame d'eau précipitée : analyse des différentes données climatologiques et météorologiques disponibles (pluviométrie et pluviographie traditionnelles, lidométrie laser, imagerie radar météorologique,...), caractérisation de l'événement pluviométrique et estimation de sa récurrence, mesure in situ de la lame d'eau accumulée dans des espaces restreints et fermés ;
2. reconstitution des niveaux d'eau atteints dans les thalwegs à partir des différents types de laisses de crue en zone boisée et en zone urbanisée ; évaluation des débits atteints lors de cet événement, notamment à partir des sections relevées et des sédiments transportés (taille des blocs en relation avec les tensions de cisaillement et les puissances spécifiques) ;
3. création d'un réseau de points topographiques de référence permettant de rattacher à un système cartographique cohérent les différentes données recueillies ; établissement de la topographie détaillée des bassins versants sélectionnés : rupture de pente, talus, éléments naturels et anthropiques « singuliers » susceptibles d'influencer la rugosité des surfaces d'écoulement au niveau du bassin versant ; création de modèles numériques de terrain nécessaires à la modélisation hydrodynamique, avec utilisation potentielle de données géographiques connexes ;
4. collecte des données hydrogéologiques : description des aquifères (sables oligocènes, grès et schistes dévoniens) ; collecte des données piézométriques disponibles ; collecte des paramètres hydrodynamiques caractérisant les aquifères en présence (conductivité hydraulique, coefficient d'emmagasinement).

Le schéma ci-dessous (Figure 0-1) montre l'interactivité des données collectées dans cette étude (voir chapitre C : « Collecte des données et interprétation ») et leur utilisation dans le processus de modélisation.

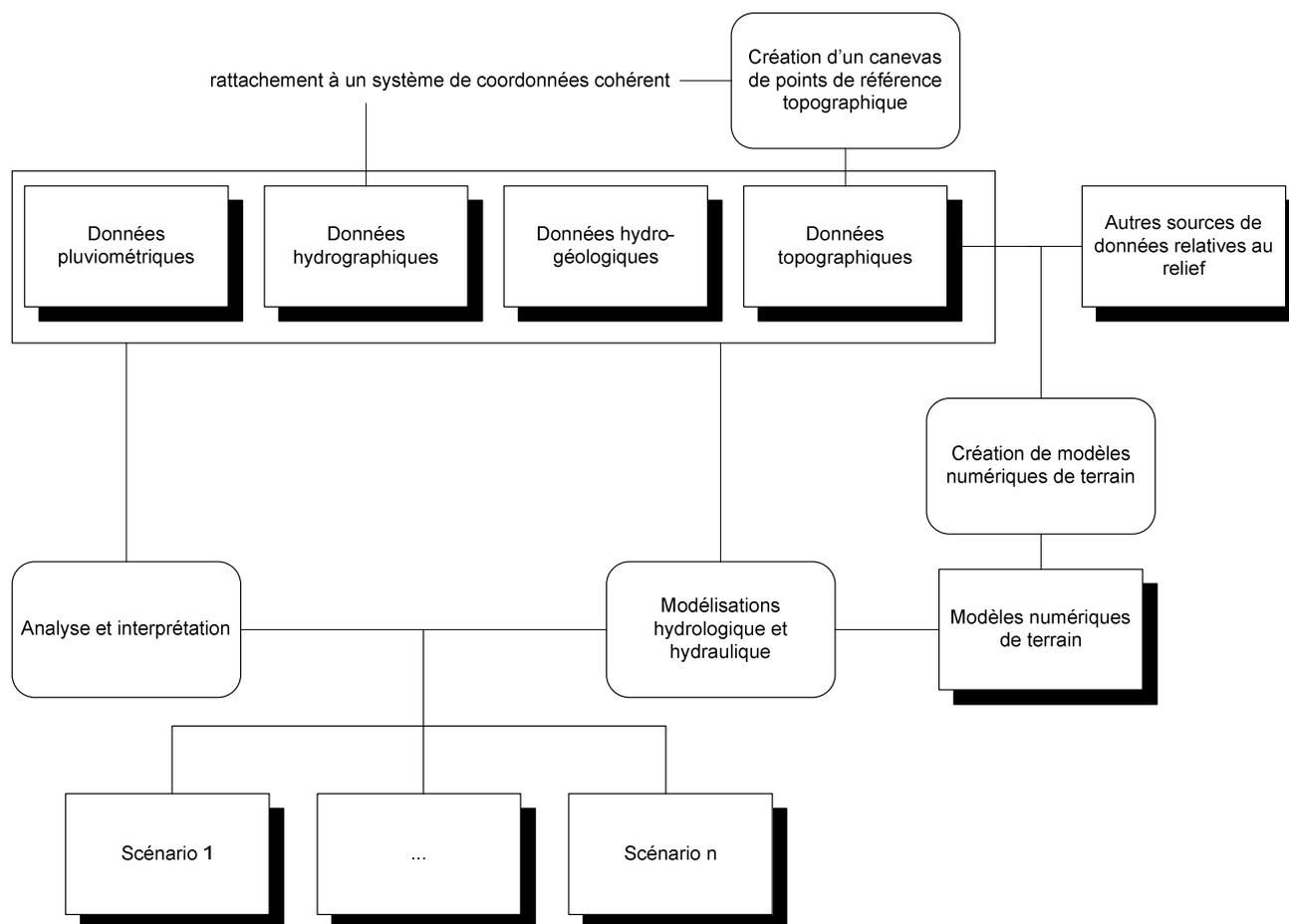


Figure 0-1 : diagramme représentant l’interactivité des données et leur utilisation

WP 2 Implémentation de la représentation des processus dans un modèle intégré existant ; calibration.

La nature même des événements vécus lors des pluies intenses du 29 mai 2008 a traduit l'importance des aspects convectifs de surface des différents flux hydrologiques, hydrauliques et sédimentaires. Dès lors, l'articulation du modèle intégré a été centrée sur l'outil de modélisation hydrodynamique de surface WOLF qui s'appuie sur une résolution explicite des équations différentielles de l'hydraulique. Sa conception modulaire permet à l'heure actuelle de représenter l'hydrologie d'un bassin versant en séparant le ruissellement sur le terrain naturel (WOLF HYDRO) et les écoulements dans le réseau drainant qu'ils soient naturels ou anthropiques en prenant en compte le cas échéant la présence d'ouvrages de régulation.

Grâce aux considérations physiquement basées et spatialement distribuées, le modèle est à même de représenter de manière totalement instationnaire les transferts distribués et progressifs entre les lieux de production du ruissellement et les différents organes du réseau drainant ainsi que le transfert des hydrogrammes de crues dans celui-ci.

Pour disposer d'un modèle intégré opérationnel pour les différents flux, il a été nécessaire d'alimenter en données les modules précédents grâce, d'une part à des données climatiques aptes à reproduire à la même échelle spatiale et temporelle les différents apports pluvieux observés, et d'autre part à un module capable de séparer l'apport pluvieux brut en contributions de surface, de subsurface et d'écoulements profonds. Dans ce dernier cadre, l'expertise et des informations acquises dans le cadre du programme MOHICAN ont été utilisées. Entres autres, l'équipe d'hydrogéologie a apporté son expertise afin d'identifier l'éventuel rôle de la nappe aquifère lors des événements pluvieux extrêmes. Une estimation des paramètres régissant l'infiltration a été fournie au modèle simulant les eaux de surface sur base de l'expérience acquise.

La problématique des boues et des flux boueux a été appréhendée d'une part en caractérisant les endroits de production et leurs paramètres physiques de contribution et d'autre part en déterminant les zones anthropiques sensibles à ces flux.

Dans le but d'obtenir un modèle final intégré, des travaux numériques ont dû être réalisés dans le but de faire interagir efficacement les différents modules à partir des données recueillies dans le WP 1.

Indépendamment de tout phasage, les travaux peuvent être résumés comme suit :

1. intégration, formalisation et mise en compatibilité des données géométriques, topographiques et morphologiques du bassin ;
2. intégration des données et calage du modèle climatique pour distribuer à petite échelle spatiale et temporelle les apports pluvieux sur l'ensemble de la zone d'étude ;
3. intégration des données et calage du modèle hydro-pédologique permettant de convertir la pluie brute en ses différentes contributions significatives d'un « flash flood » ;
4. intégration des données et calage du modèle hydrologique physiquement basé et spatialement distribué ;
5. intégration des données et calage du modèle de propagation en réseau des différents apports distribués (surface, hypodermique, souterrain, ...) ;

WP 3 Case study : résultats de la modélisation et élaboration intégrée de scénarios de simulation

Le troisième WP de l'étude comporte les tâches suivantes :

1. exécution d'une simulation de validation sur le domaine de l'étude ;
2. élaboration intégrée de scénarios de simulation. Les scénarios suivants ont été envisagés :
 - étude et analyse d'un ou deux scénarios de pluies « habituelles » de dimensionnement ;
 - étude et analyse d'un scénario de pluie exceptionnelle (type 100 ans) ;
 - étude et analyse d'une évolution d'affectation du sol ;
 - étude et analyse de l'effet des bassins de rétention.
3. exécution des scénarios et analyse des résultats ;
4. rédaction d'un rapport reprenant les résultats de l'étude.

Structure du rapport

Dans le présent rapport, le WP1 constitue le chapitre C (« Collecte des données et interprétation »), alors que les WP2 et WP3 sont regroupés dans le chapitre D (« Modélisation hydrologique »).

C. Collecte des données et interprétation

Quatre équipes ont participé à la collecte des données :

Equipe 1 : *Laboratoire de Climatologie et Topoclimatologie, ULg*

Equipe 2 : *Unité d'Hydrogéologie et de Géologie de l'Environnement, ULg*

Equipe 3 : *Laboratoire de Topographie et de Géométrie, ULg*

Equipe 4 : *Laboratoire d'Hydrographie et de Géomorphologie Fluviale, ULg*

La description de leurs contributions respectives est reprise dans les pages suivantes de ce rapport et constitue le WP1.

1. Présentation de l'événement pluviométrique

1 - 1. Introduction : données pluviométriques recueillies au pas de temps horaire fixe (en heure civile : TU+2)



En première analyse, il est nécessaire de préciser les valeurs de la durée approximative et de l'ampleur des précipitations qui se sont abattues sur la zone étudiée lors de l'événement pluviométrique exceptionnel du 29 mai 2008.

Plusieurs pluviographes ont servi de référence. Le pluviographe du réseau Météoroutes et le disdromètre du Laboratoire de Climatologie et Topoclimatologie de l'Université de Liège sont situés l'un à côté de l'autre à l'entrée principale du domaine universitaire du Sart Tilman. Le pluviographe du SETHY est situé à 375 m d'eux dans la direction Est-Sud-Est. Ils sont tous les trois localisés sur le plateau dans la zone nord du domaine universitaire. La très forte similitude entre les valeurs obtenues sur les deux sites (tableau 1-1) permet de déduire que les lames d'eau mesurées n'étaient pas ponctuelles.

A l'analyse du tableau 1-1, il apparaît également que l'épisode pluviométrique intense ayant provoqué les inondations soudaines fut de courte durée (durée maximum inférieure à 2 heures). La lame d'eau fut au minimum de l'ordre de 55 à 62 mm/h au pas de temps fixé par les conventions d'heure civile. Toutefois, étant donné la petitesse des bassins versants concernés par ce rapport et le pas de temps horaire de l'enregistrement du pluviographe du SETHY, il est indispensable de documenter et caractériser l'événement pluviométrique pour une succession d'échelles temporelles plus fines que l'heure. C'est ainsi que les données provenant du disdromètre à faisceau laser du Laboratoire de Climatologie et Topoclimatologie ont été d'une très grande utilité pour le tracé des hyétogrammes réels de cet événement pluviométrique exceptionnel au pas de temps glissant de 5 en 5 minutes pendant des périodes de durées respectives de 5, 10, 20, 30 et 60 minutes sans avoir besoin d'une reconstitution hypothétique des lames d'eau à partir de quelques valeurs horaires (voir paragraphe 1 - 3).

Un contrôle spatial plus large des intensités de pluies à l'échelle horaire a été effectué grâce aux estimations des intensités de précipitations extraites des informations du radar de Wideumont (IRM) (voir paragraphe 1 - 2).

Tableau 1-1 : Lames d'eau horaires mesurées au Sart Tilman le 29-05-2008 (en jaune : délimitation temporelle de l'épisode pluviométrique exceptionnel)

Heure TU+2	Pluviographe SETHY	Pluviographe Météoroutes	Disdromètre ULg-climato
	Sart Tilman	Sart Tilman	Sart Tilman
de 05 à 06 h	0 mm	0 mm	0 mm
de 06 à 07 h	2,5 mm	2,4 mm	2,4 mm
de 07 à 08 h	3,3 mm	3,0 mm	2,7 mm
de 08 à 09 h	24,2 mm	25,4 mm	26,2 mm
de 09 à 10 h	55,6 mm	60,2 mm	+ de 61 mm*
de 10 à 11 h	0,9 mm	1,0 mm	-
de 11 à 12 h	4,9 mm	4,0 mm	-
de 12 à 13 h	0 mm	0 mm	-

* panne de courant

1 - 2. Suivi spatio-temporel de l'événement pluviométrique extrême au pas de temps horaire

Un géoréférencement particulier de quatre images successives de superposition Pluvio-Radar issues du projet Parapluies de la Région Wallonne entre l'IRM et le SETHY obtenues auprès de l'IRM (figures 1-1 à 1-4) a permis d'y tracer les limites des bassins versants étudiés.

Les figures 1-1 et 1-4 confirment l'absence de précipitations intenses entre 7h et 8h (heure civile) et entre 10h et 11h (heure civile) sur les bassins versants étudiés comme sur l'entièreté de la commune de Liège ainsi que sur les communes limitrophes du Sart Tilman (Seraing, Neupré, Esneux et Chaudfontaine).

Le déplacement rapide du SE vers le NW d'un amas nuageux convectif aux intensités horaires pluviométriques supérieures à 30 mm (figures 1-2 et 1-3) accompagné de grêle (cf. disdromètre du Sart Tilman et observations personnelles de M. Erpicum) indique l'étroitesse de la zone affectée localement (5 km maximum dans l'axe SW-NE) par les précipitations extrêmes. Les intensités horaires estimées ne doivent pas être interprétées avec la plus grande précision car les images ont été obtenues sans recoupement et à partir d'un seul radar situé à Wideumont en Ardenne. Toutefois la zone géographique concernée par les précipitations intenses est repérable sans remise en question de même que les valeurs de précipitations pointées au droit des pluviographes du SETHY.

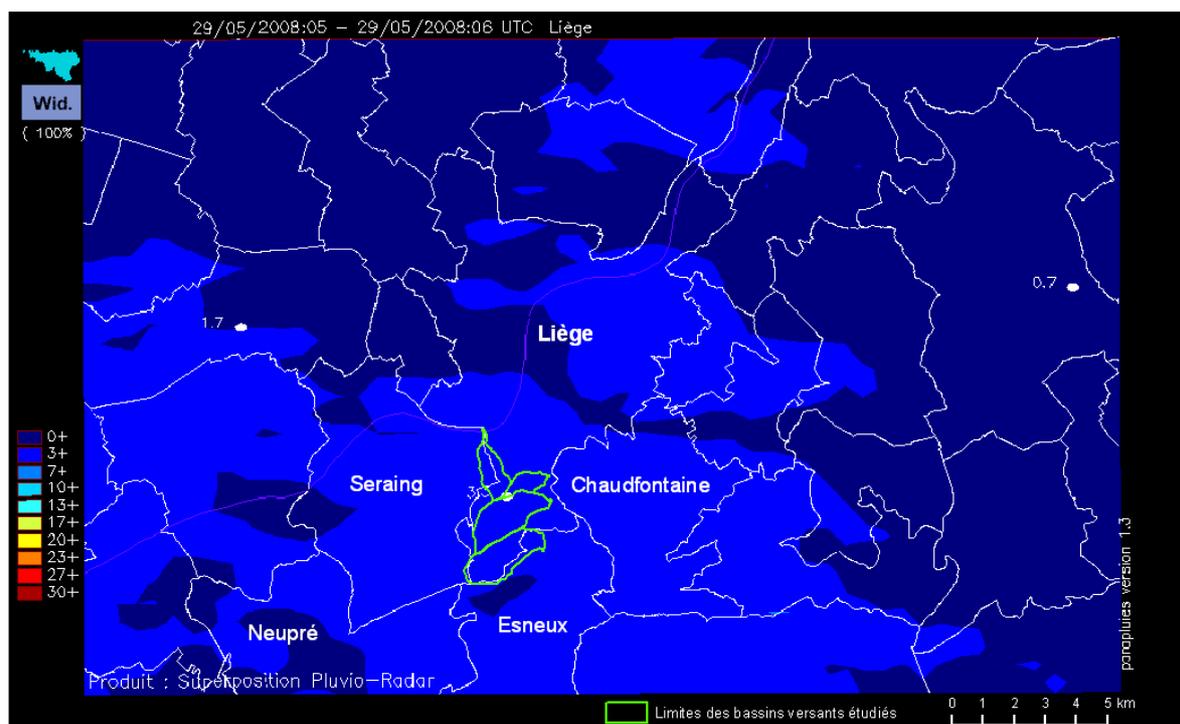


Figure 1-1 : Répartition spatiale des précipitations estimée à l'aide du radar de Wideumont : entre 7h et 8h TU+2

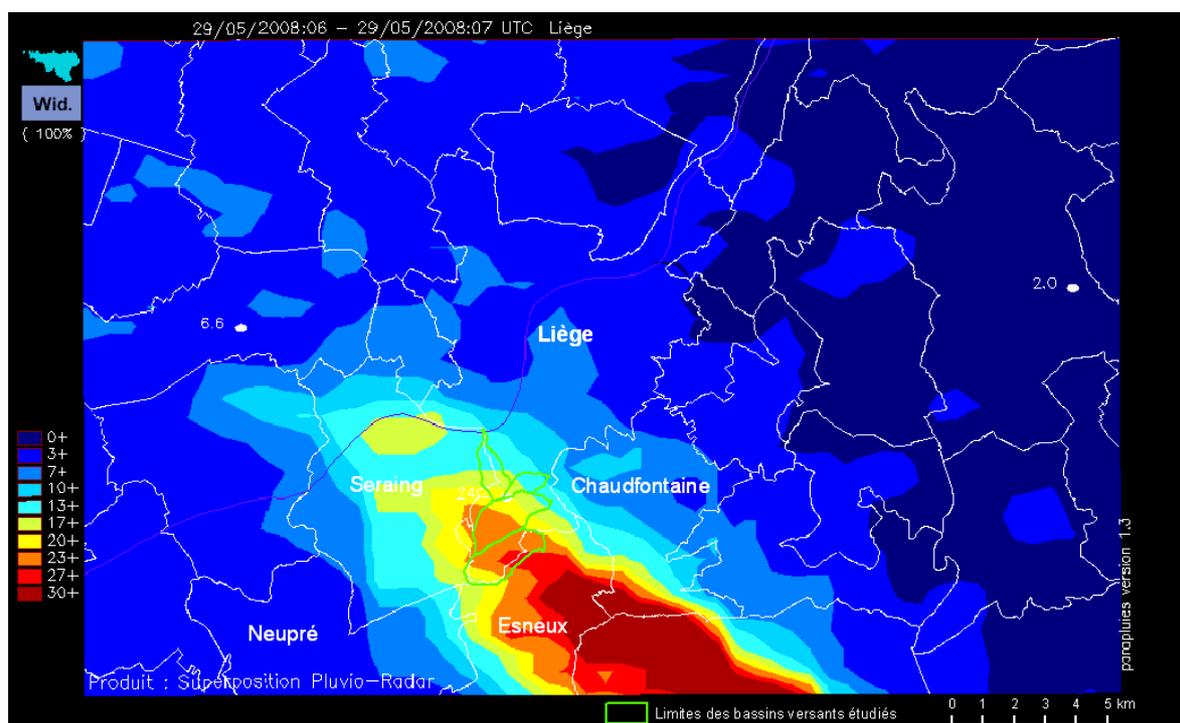


Figure 1-2 : Répartition spatiale des précipitations estimée à l'aide du radar de Wideumont : entre 8h et 9h TU+2

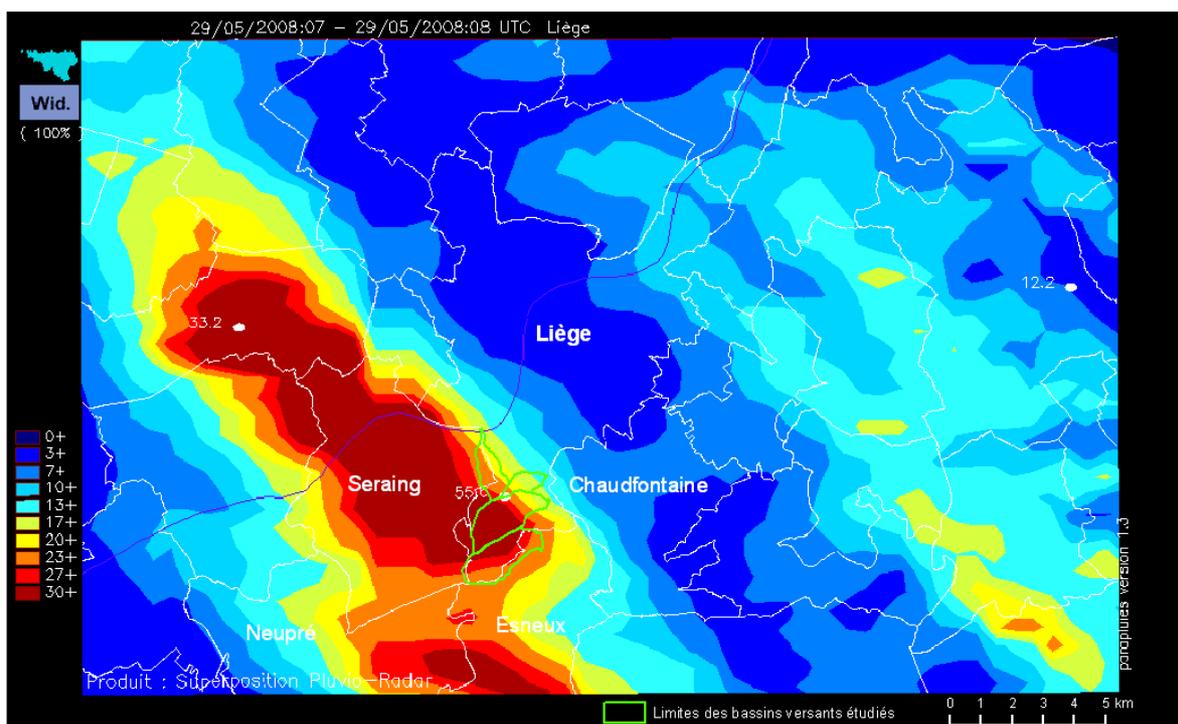


Figure 1-3 : Répartition spatiale des précipitations estimée à l'aide du radar de Wideumont : entre 9h et 10h TU+2

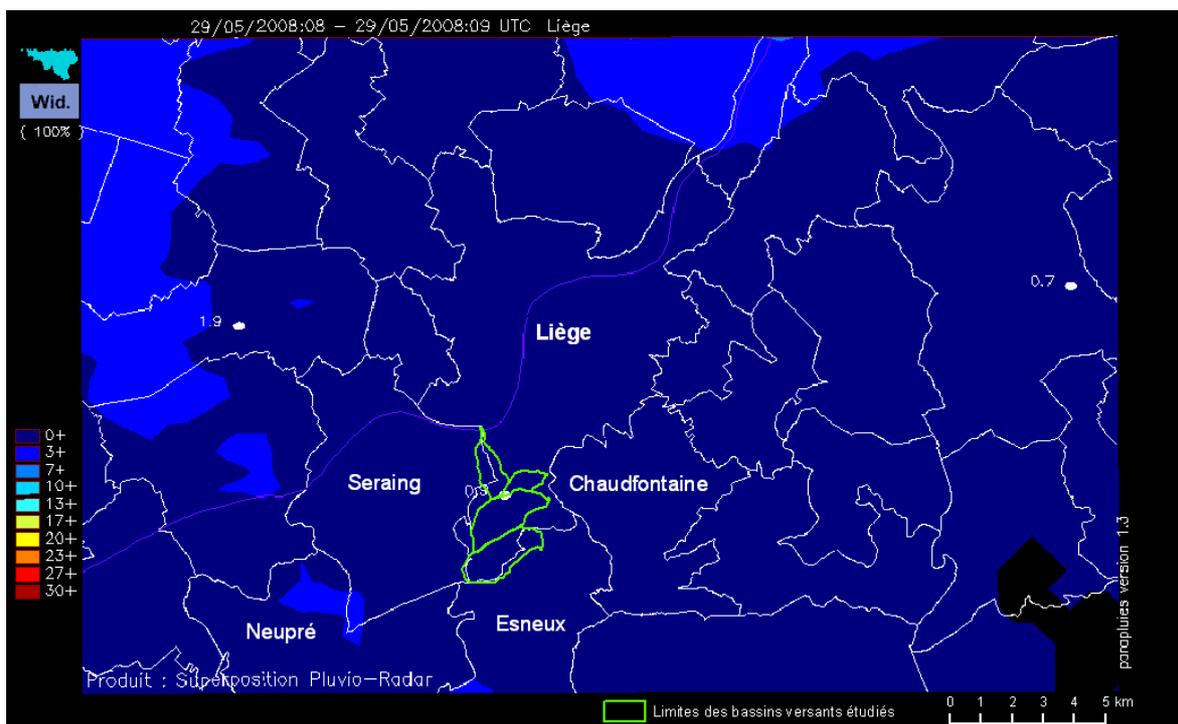


Figure 1-4 : Répartition spatiale des précipitations estimée à l'aide du radar de Wideumont : entre 10h et 11h TU+2

1 - 3. *Pluviogramme et hyétogrammes détaillés au pas de temps de 5 minutes et périodes de retour des cumuls observés estimés sur 10, 20, 30 et 60 minutes*

Il est tombé 92,5 mm d'eau entre 6h et 9h30 (fin soudaine de l'épisode intense) dont plus de 60 mm après 9h (figure 1-5).

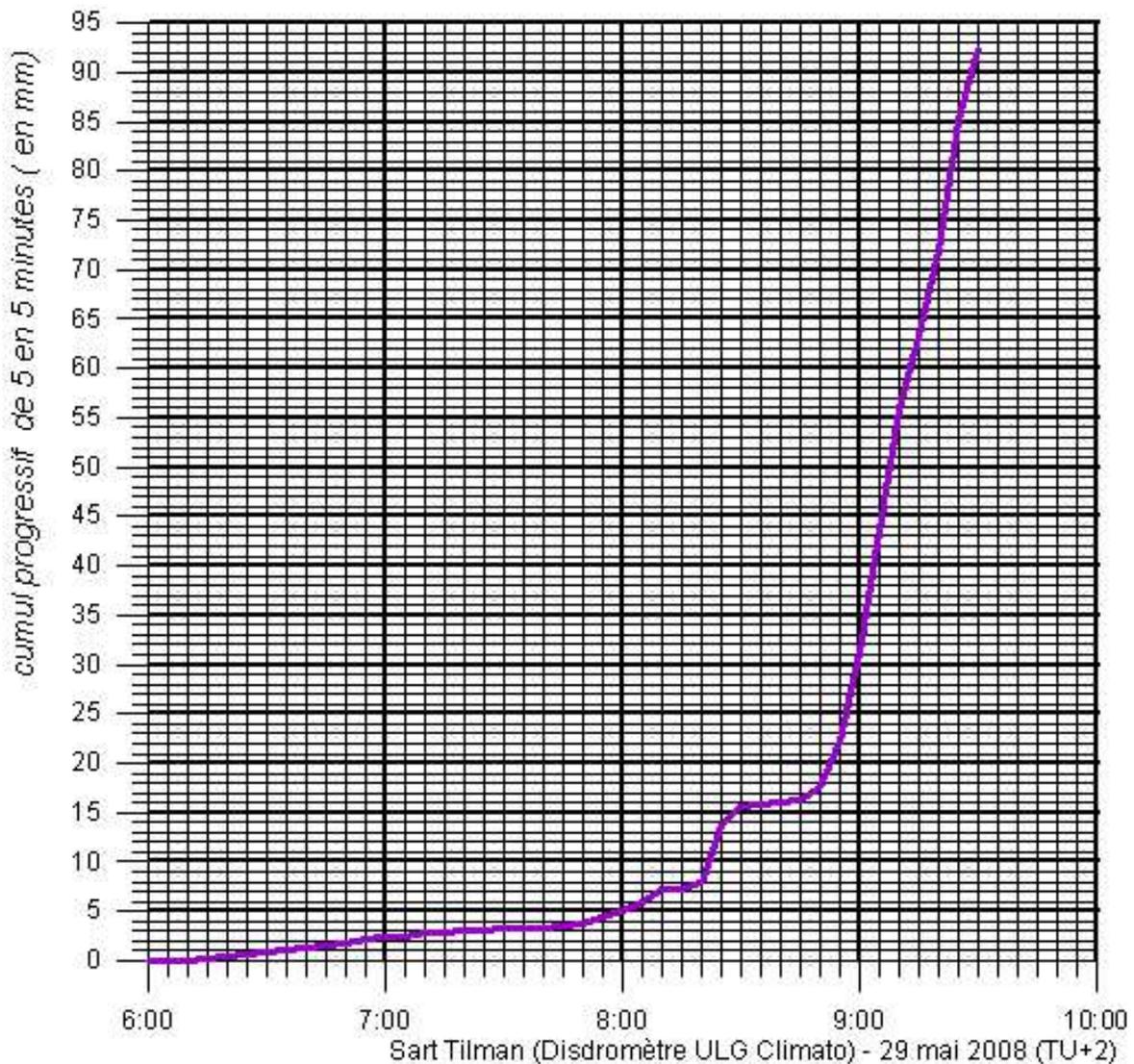


Figure 1-5 : Pluviogramme détaillé de l'événement pluvieux exceptionnel (site du Sart Tilman)

Quatre épisodes d'intensité plus importante ont été constatés (figure 1-6) :

- 5,7 mm en 5 minutes de 8h20 à 8h25
- 12,3 mm en 5 minutes à 9h05

- 12,5 mm en 5 minutes à 9h10
- 13,3 mm en 5 minutes de 9h20 à 9h25

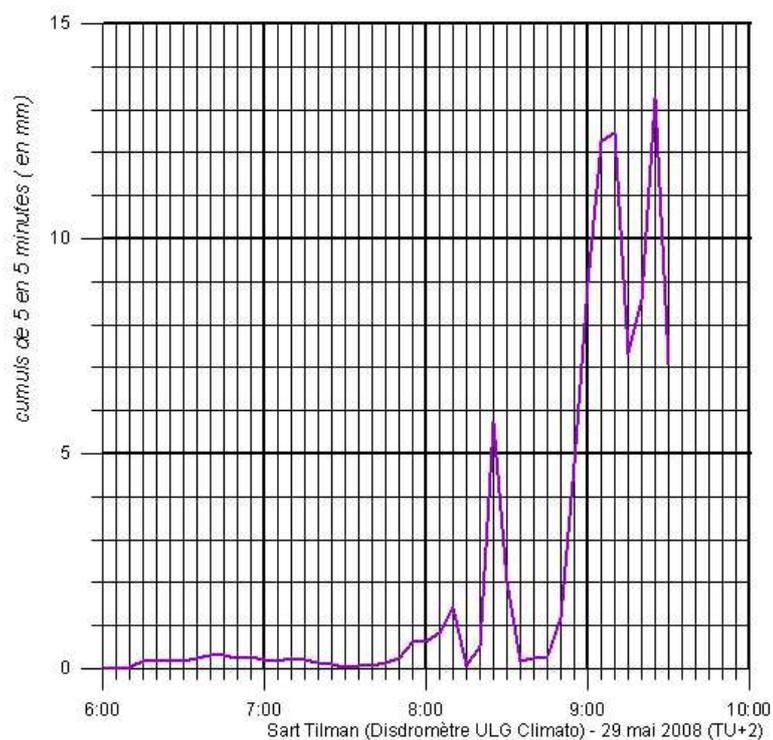


Figure 1-6 : Hyetogramme détaillé de l'événement pluvieux exceptionnel (site du Sart Tilman)

La lame d'eau maximum tombée en 10 minutes (25 mm) (figure 1-7) a une durée de retour de 50 ans (tableau 1-2).

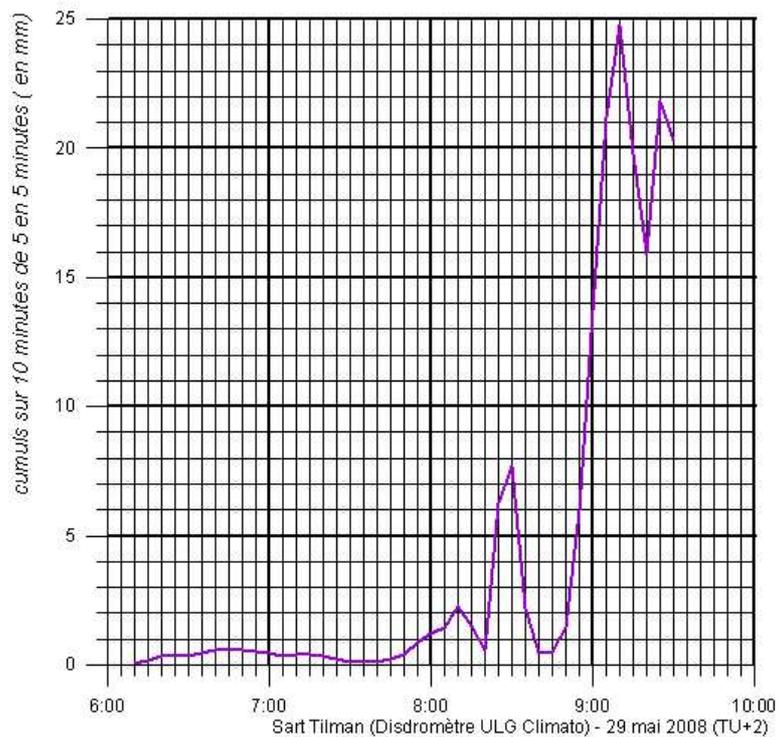


Figure 1-7 : Hyetogramme (cumuls sur 10 minutes) de l'événement pluvieux exceptionnel (site du Sart Tilman)

La lame d'eau maximum tombée en 20 minutes (41,7 mm) (figure 1-8) a une durée de retour de près de 200 ans (tableau 1-2).

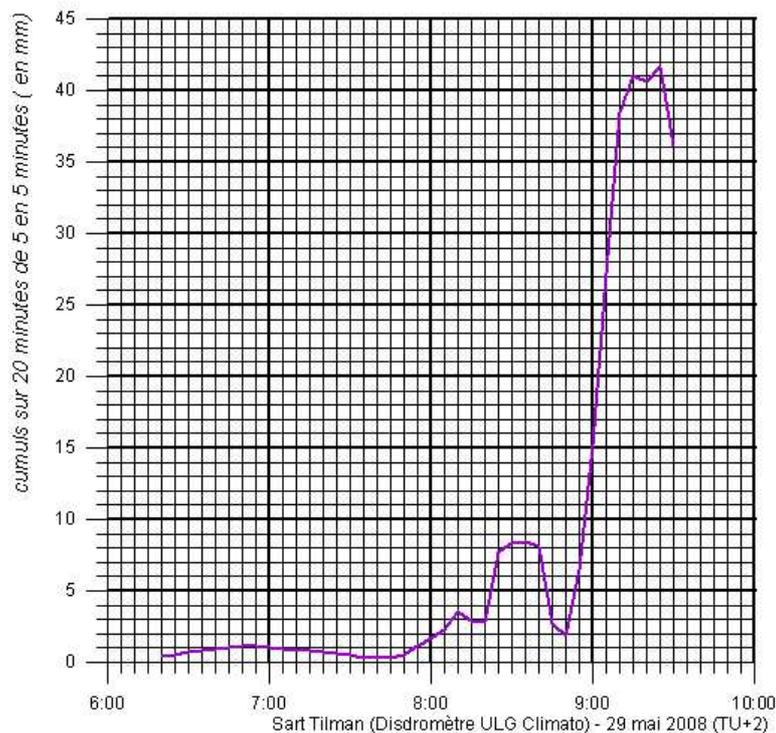


Figure 1-8 : Hyéogramme (cumuls sur 20 minutes) de l'événement pluvieux exceptionnel (site du Sart Tilman)

La lame d'eau maximum tombée en 30 minutes (62,9 mm) (figure 1-9) a une durée de retour largement supérieure à 200 ans (tableau 1-2).

La lame d'eau maximum tombée en 60 minutes (76,7 mm) (figure 1-10) a une durée de retour également très largement supérieure à 200 ans (tableau 1-2).

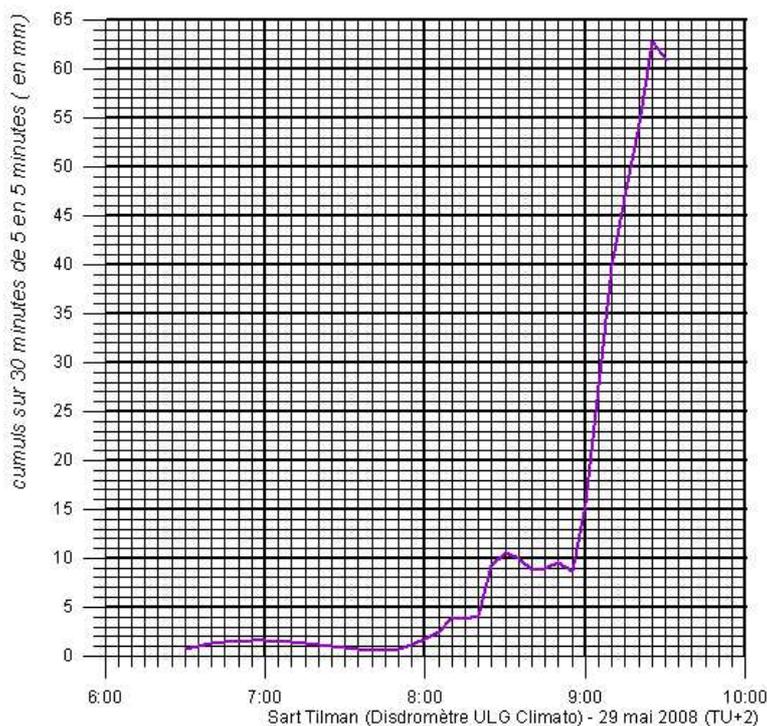


Figure 1-9 : Hyétoqramme (cumuls sur 30 minutes) de l'événement pluvieux exceptionnel (site du Sart Tilman)

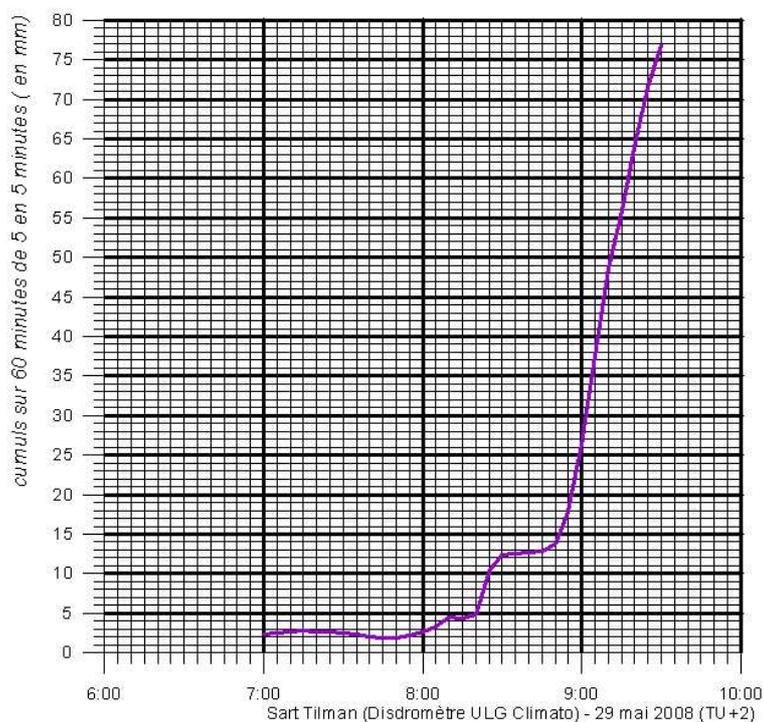


Figure 1-10 : Hyétoqramme (cumuls sur 60 minutes) de l'événement pluvieux exceptionnel (site du Sart Tilman)

Tableau 1-2 : Durée de retour (colonnes) du cumul pluviométrique sur un laps de temps considéré (ligne) (source Région Wallonne : valeurs calculées pour la commune de Liège)

(Les écarts types sur les estimations sont indiqués entre parenthèses)

D\T	2 mois	3 mois	6 mois	1 an	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	30 ans	50 ans	100 ans	200 ans
10 min	4.4 (0.7)	5.5 (0.5)	7.5 (0.5)	9.7 (0.7)	12.0 (1.0)	15.4 (1.5)	18.1 (2.0)	21.1 (2.7)	22.9 (3.1)	25.4 (3.8)	28.9 (4.9)	32.7 (6.2)
20 min	5.8 (1.1)	7.3 (0.8)	9.9 (0.7)	12.7 (0.8)	15.8 (1.2)	20.2 (1.8)	23.8 (2.5)	27.6 (3.3)	30.0 (3.9)	33.2 (4.8)	37.8 (6.1)	42.7 (7.8)
30 min	6.8 (1.2)	8.4 (0.9)	11.4 (0.7)	14.6 (0.9)	18.1 (1.4)	23.0 (2.1)	27.1 (2.9)	31.5 (3.9)	34.2 (4.5)	37.8 (5.5)	43.0 (7.1)	48.5 (9.0)
1 heure	8.5 (1.2)	10.4 (1.0)	14.0 (0.9)	17.8 (1.1)	21.9 (1.6)	27.7 (2.5)	32.6 (3.3)	37.8 (4.5)	41.0 (5.2)	45.2 (6.3)	51.4 (8.1)	58.0 (10.3)
2 heures	10.3 (1.2)	12.5 (1.0)	16.5 (0.9)	20.8 (1.2)	25.4 (1.6)	32.1 (2.5)	37.6 (3.4)	43.4 (4.6)	47.1 (5.4)	51.9 (6.6)	58.9 (8.6)	66.3 (10.9)
6 heures	13.4 (1.4)	16.0 (1.1)	20.6 (1.1)	25.5 (1.2)	30.9 (1.6)	38.5 (2.4)	44.8 (3.3)	51.6 (4.5)	55.8 (5.3)	61.4 (6.6)	69.4 (8.5)	78.0 (11.0)
12 heures	15.9 (1.5)	18.7 (1.2)	23.7 (1.2)	29.1 (1.5)	34.8 (2.0)	43.2 (2.8)	50.0 (3.6)	57.4 (4.7)	61.9 (5.5)	68.0 (6.6)	76.7 (8.5)	86.0 (10.9)
1 jour	19.2 (1.8)	22.3 (1.6)	27.8 (1.7)	33.8 (2.3)	40.1 (3.1)	49.3 (4.4)	56.9 (5.5)	65.0 (6.7)	70.1 (7.5)	76.7 (8.6)	86.3 (10.5)	96.7 (12.7)
2 jours	24.1 (2.0)	27.6 (1.9)	33.9 (2.3)	40.6 (3.1)	47.9 (4.1)	58.4 (5.4)	67.1 (6.5)	76.3 (7.9)	82.1 (8.7)	89.7 (10.0)	100.7 (12.0)	112.5 (14.4)
3 jours	28.0 (2.3)	31.9 (2.2)	38.8 (2.8)	46.3 (3.8)	54.3 (4.8)	65.9 (6.3)	75.4 (7.6)	85.6 (9.0)	92.0 (9.9)	100.3 (11.3)	112.4 (13.4)	125.4 (16.0)
4 jours	31.5 (2.5)	35.7 (2.5)	43.2 (3.2)	51.3 (4.3)	60.0 (5.5)	72.5 (7.1)	82.8 (8.5)	93.9 (10.0)	100.7 (11.0)	109.8 (12.5)	122.9 (14.7)	137.0 (17.5)
5 jours	34.8 (2.8)	39.2 (2.8)	47.3 (3.6)	55.9 (4.8)	65.2 (6.1)	78.6 (7.9)	89.6 (9.3)	101.5 (10.9)	108.8 (12.0)	118.5 (13.5)	132.5 (15.9)	147.6 (18.9)
7 jours	40.7 (3.3)	45.7 (3.3)	54.7 (4.3)	64.4 (5.6)	74.8 (7.1)	89.7 (9.1)	102.1 (10.8)	115.3 (12.6)	123.5 (13.8)	134.4 (15.4)	150.0 (18.1)	166.9 (21.3)
10 jours	48.7 (3.9)	54.4 (4.0)	64.7 (5.1)	75.8 (6.7)	87.7 (8.4)	104.8 (10.7)	118.8 (12.6)	134.0 (14.7)	143.3 (16.0)	155.7 (17.9)	173.6 (20.9)	192.9 (24.5)
15 jours	60.9 (4.9)	67.6 (5.0)	79.8 (6.3)	92.9 (8.2)	107.0 (10.2)	127.2 (13.0)	143.8 (15.2)	161.7 (17.6)	172.8 (19.2)	187.5 (21.4)	208.7 (24.9)	231.4 (29.1)
20 jours	72.1 (5.8)	79.7 (5.8)	93.6 (7.3)	108.5 (9.4)	124.6 (11.7)	147.6 (14.9)	166.6 (17.4)	187.0 (20.2)	199.6 (22.0)	216.3 (24.5)	240.5 (28.4)	266.4 (33.1)
25 jours	82.7 (6.6)	91.2 (6.7)	106.6 (8.2)	123.2 (10.6)	141.1 (13.1)	166.8 (16.6)	187.9 (19.4)	210.6 (22.4)	224.7 (24.4)	243.2 (27.2)	270.1 (31.6)	299.0 (36.8)
30 jours	92.8 (7.5)	102.1 (7.4)	119.1 (9.1)	137.3 (11.6)	156.8 (14.4)	185.0 (18.2)	208.1 (21.2)	233.0 (24.6)	248.4 (26.7)	268.8 (29.8)	298.2 (34.5)	329.9 (40.2)

<http://voies->

[hydrauliques.wallonie.be/opencms/opencms/fr/hydro/Archive/idf/visualisation_commune.jsp?province=6&commune=3341&type=11&action=OK](http://voies-hydrauliques.wallonie.be/opencms/opencms/fr/hydro/Archive/idf/visualisation_commune.jsp?province=6&commune=3341&type=11&action=OK)

A la figure 1-5, on a constaté un cumul total de l'événement pluviométrique exceptionnel du 29 mai 2008 d'une valeur supérieure à 90 mm. Il s'agit là d'une valeur très supérieure à celle de 78 mm pour une pluie totalisée sur 6 heures avec une durée de retour de 200 ans. Les 90 mm tombés lors de cet épisode ont causé des flash-floods dans les bassins versants analysés correspondant à une durée de retour de 200 ans pour un total pluviométrique calculé sur 12h (tableau 1-2).

1 - 4. Conclusion

Au vu de l'analyse climatologique menée, il est évident et indiscutable que l'épisode pluviométrique qui a provoqué les flash-floods dans les petits bassins versants étudiés a vraiment été très exceptionnel : cet événement était caractérisé par une période de retour multi-centenaire.

2. Contexte géologique et hydrogéologique



2 - 1. Introduction

Les travaux réalisés par l'équipe d'Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement de l'Université de Liège ont porté sur la collecte des données géologiques et hydrogéologiques nécessaires à la compréhension du fonctionnement des aquifères et à l'identification de leur éventuel rôle lors de l'événement pluvieux extrême du 29 mai 2008. Une estimation des paramètres régissant l'infiltration a été fournie à l'équipe de l'unité d'Hydrologie, Hydrodynamique Appliquée et de Constructions Hydrauliques (ULg), en charge du développement du modèle hydrologique.

Les travaux réalisés sont :

- consultation des cartes géologiques existantes et intégration de ces données dans un environnement SIG ;
- consultation des bases de données hydrogéologiques ;
- collecte et consultation des études géologiques et hydrogéologiques réalisées précédemment dans la zone d'étude ;
- collaboration avec l'équipe de l'unité d'Hydrologie, Hydrodynamique Appliquée et de Constructions Hydrauliques (ULg), en vue d'identifier les paramètres hydrogéologiques nécessaires à la modélisation.

2 - 2. Contexte géologique

La zone d'étude est entièrement comprise au sein de la carte géologique au 1/40.000 Seraing-Chênée levée en 1897 par Forir. Le plateau du Sart Tilman – Bonnelles a été largement étudié lors de l'implantation de l'Université de Liège sur ce site et une carte géologique plus détaillée a été dressée (Calembert *et al*, 1964). Malheureusement, cette carte géologique détaillée ne couvre pas l'entièreté de la zone d'étude, pas l'entièreté du bassin du Fond du Moulin et, pour ce bassin la description géologique provient donc de la carte au 1/40.000.

2 - 2 - 1. Lithostratigraphie

Les formations géologiques rencontrées dans la zone d'étude sont principalement datées du Paléozoïque. Ces dépôts sont d'âge Dévonien à Houiller. Des dépôts sableux cénozoïques sont présents sur le sommet des plateaux. Les dépôts quaternaires sont présents sous forme de graviers de terrasses notamment.

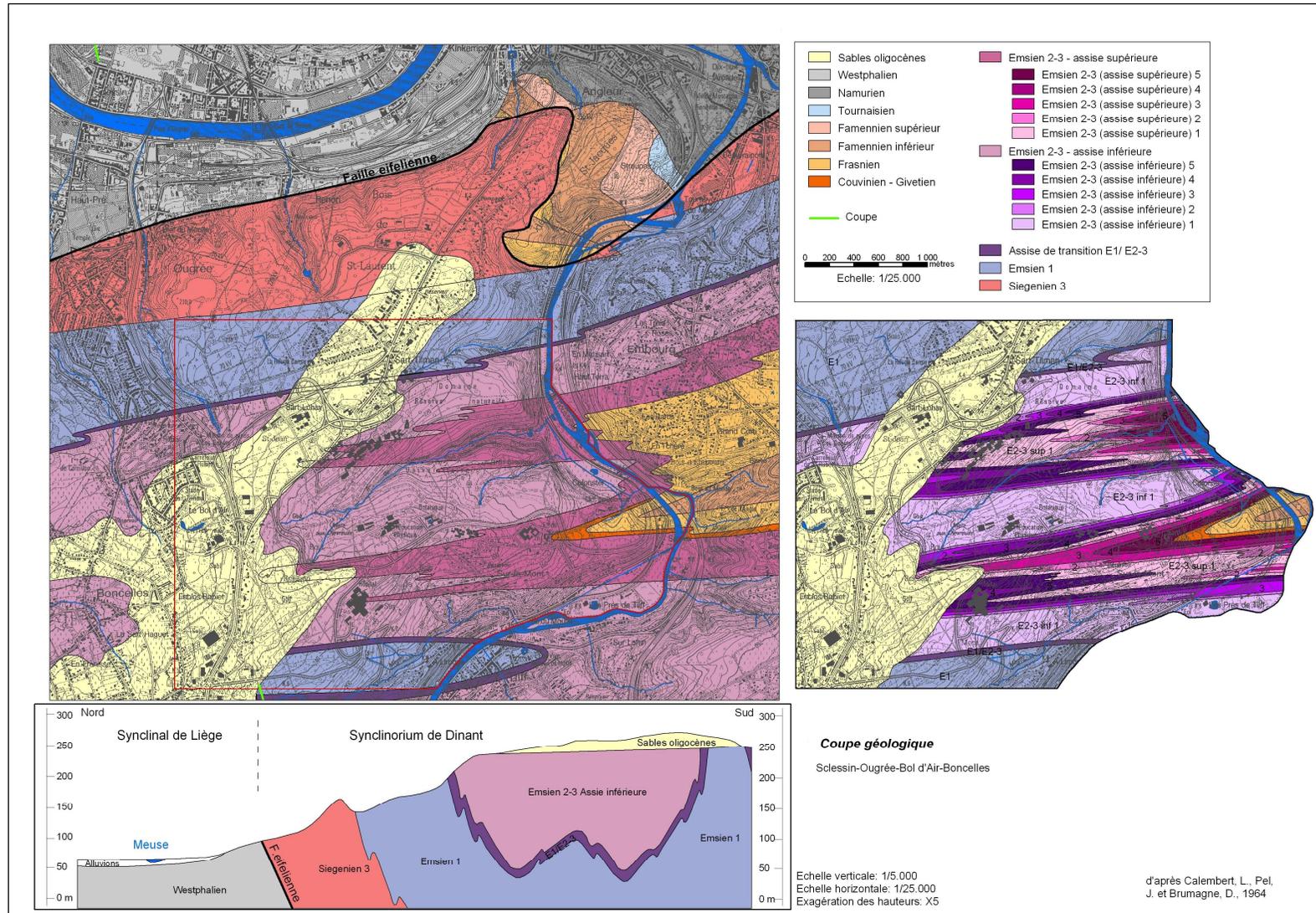


Figure 2-1 : Carte et coupe géologique détaillée du Sart Tilman (d'après Ruthy et al, 2005)

En ce qui concerne le Paléozoïque, la nomenclature utilisée pour désigner les différentes formations est différente pour les deux cartes :

- Coblencien Cb1 et Cb2 = Siegenien
- Coblencien (Cb3) + Burnotien (Bt) = Emsien

Les formations rencontrées dans la zone d'étude sont des plus anciennes au plus récentes :

1° Formations du Paléozoïque :

- Siegenien supérieur (Sg3) : formé en majorité de schistes, quartzites et grès micacés (psammites) lie de vin et bigarrés, accessoirement des schistes et quartzites verts et, des quartzites et grès micacés gris clair. Faciès septentrional d'"Acoz".
- Emsien inférieur (E1): composé de quartzites gris ou verts et de schistes verts et lie de vin, plus quelques niveaux de poudingues. Faciès de "Wépion";
- Assise de transition entre l'Emsien inférieur et l'Emsien moyen et supérieur: marqué par la persistance d'horizons gréseux foncés et la nette prépondérance des schistes verts, avec des intercalations de grès et de quartzites et de schistes lie de vin. Epaisseur estimée à 50 m;
- Emsien moyen et supérieur (E2-3): ils n'ont pas pu être différenciés stratigraphiquement dans le domaine du Sart Tilman. Néanmoins, deux niveaux lithologiques se distinguent:
 - Assise inférieure (E2-3 inf): formée grès, quartzites et schistes. Couche caractérisée par sa couleur lie de vin.
 - Assise supérieure (E2-3 sup): composée de gros bancs de quartzites et de grès verts, gris, bruns.
- Houiller : formé par des alternances de schistes plus ou moins gréseux et de grès avec intercalations de veines de charbon d'épaisseur comprise entre 0.5 et 1 m, mais pouvant atteindre 2.5 m au maximum. A la base du Namurien, on observe des ampélites alunifères riches en pyrite et qui ont été exploitées pour la fabrication de l'alun. Cette série se divise en deux étages, Namurien H1 et Westphalien H2. Le "Poudingue houiller" (H1c), grès grossier à grains de charbon, forme la séparation entre ces étages. Il est difficilement reconnaissable. La puissance du Houiller est, dans le bassin de Liège, d'environ 1550 m. Le Houiller exploitable a une épaisseur maximum de 1260 m. Il se rattache tout entier au Westphalien, tandis que la partie inférieure, le Namurien, a une puissance de 300 m environ (Humblot, 1941).

2° Formations du Cénozoïque

- Paléogène (Oligocène) : Des grandes étendues datant de l'Oligocène, ne subsistent que quelques lambeaux. Ces dépôts, assez hétérogènes, sont composés de sables quartzeux, fins et pailletés, parfois glauconieux ou ferrugineux, d'amas de cailloux, et de glaises plastiques. Leur épaisseur est très variable. Ce dépôt essentiellement sableux atteint maximum 6 m au Sart Tilman. Il augmente d'est ou ouest sur le plateau de Bonnelles avec une épaisseur maximum de 12 m.
- Quaternaire : Les plateaux sont recouverts par des limons éoliens (loess) d'épaisseur variable. Les versants et le bord de la plaine alluviale sont recouverts par du colluvium et des limons de pente. La composition du colluvium est variable en fonction de son origine. Il comprend des limons sableux et argileux mélangés à des fragments plus ou moins grossiers de provenances diverses (graviers roulés de terrasses, schistes, grès, calcaires, craie, silex...). Le colluvium présente usuellement une épaisseur réduite sur les versants à forte pente (quelques décimètres à 2-3 m). En pied de versants, il existe

d'importantes accumulations de colluvium, pouvant dépasser 5 m voire atteindre une trentaine de mètres.

Les alluvions récentes de la Meuse, de l'Ourthe ainsi que les terrasses fluviatiles sont composées de limons fluviatiles d'épaisseur variable (3 à 8 m) surmontant des sables et graviers roulés d'une puissance comprise entre 2 et 10 m. Plusieurs terrasses, à différents niveaux, ont été observées sur les versants de la vallée de la Meuse et l'Ourthe.

2 - 2 - 2. Cadre structural

La zone d'étude est traversée par la faille eifélienne qui charrie le Synclinorium de Dinant sur le Synclinorium de Namur. La faille traverse le bassin du Renory et met en contact les formations du Dévonien inférieur (Siegenien, Coblencien et Burnotien) et du Carbonifère (Westphalien).

Au nord de la faille eifélienne, le bassin houiller de Liège dessine un synclinal dissymétrique avec un flanc nord en plateaux et un flanc sud fortement redressé, voire renversé. Plus à l'est, les anticlinaux de Cointe et de la Chartreuse assurent la liaison avec le massif de Herve, grand pli synclinal structuré en une série d'écaillés imbriquées (Boulvain, 2000).

Au sud de la faille eifélienne, les couches du Dévonien ont l'allure caractéristique du bord nord du Synclinorium de Dinant. Les plis de direction générale SW-NE sont redressés et légèrement déversés vers le sud. De nombreux plis secondaires affectent les plis majeurs. Ces plis secondaires ont une allure inverse à celle des plis du Synclinorium de Namur; le flanc nord des synclinaux est très redressé, alors que le flanc sud est moins incliné.

2 - 3. Contexte Hydrogéologique

2 - 3 - 1. Aquifère alluvial

Les formations graveleuses des terrasses fluviatiles peuvent contenir localement et temporairement de petites nappes, alimentées par les eaux de précipitation et l'apport des nappes des versants. L'exutoire de ces nappes correspond à la base aval de la terrasse, limitant fortement la capacité de stockage des terrains.

2 - 3 - 2. Aquifère des sables oligocènes

Les lambeaux de sables oligocènes contiennent une nappe aquifère alimentant quelques ruisseaux. Leur réserve en eau est fonction de leur extension et de leur puissance. Lorsque les terrains sous-jacents sont suffisamment perméables (bed-rock altéré et fissuré), la nappe des sables alimente les nappes sous-jacentes.

De par son étendue relativement importante, le lambeau de sables oligocènes du plateau du Sart Tilman – Bonnelles contient un aquifère aux potentialités non négligeables. De nombreux ruisseaux sont alimentés en amont par cette nappe et ensuite plus en aval par les nappes de fissures recoupées par le bassin versant. La puissance totale des sables, de

l'ordre de 20 m sur le plateau de Bonnelles, diminue vers le nord et ne dépasse pas 5 m en moyenne sur le plateau du Sart Tilman.

Cet aquifère perché présente une porosité et une perméabilité moyenne élevées. Toutefois, les couches argileuses glauconifères, à perméabilité moindre, introduisent une anisotropie verticale réduite par la discontinuité des horizons à glauconie d'ailleurs associés à des graviers.

Là où le bed-rock présente une perméabilité de fissures suffisante, la nappe des sables alimente le substratum et participe à l'écoulement souterrain concentré dans quelques bandes plus tectonisées.

On peut distinguer deux secteurs hydrogéologiques distincts dans ce lambeau de sables (Monjoie, 1970):

- au nord, le plateau du Sart Tilman s'étend entre la ligne Blanc-Gravier – dôme du Bol d'Air et le versant de la Meuse, sur une largeur de 350 à 550 m.

La réserve d'eau est peu importante étant donné la faible épaisseur de la couche sableuse. En raison de la pente nord de la surface de base, d'un ressaut de 2 m du bed-rock au sud et de la présence d'un chenal de sable argileux fluvial, l'eau infiltrée s'écoule préférentiellement vers le nord. Seule la zone en amont du ruisseau de Sordeye, située au sud du chenal fluvial, échappe à cet écoulement préférentiel et est drainée vers l'est en raison d'une pente locale du sommet du bed-rock dans cette direction. De nombreuses venues d'eau apparaissent en périphérie du dépôt sableux.

- au Sud-Ouest, le plateau de Bonnelles correspondant à la partie la plus large du lambeau.

La réserve d'eau est plus importante (liée à l'épaisseur des sables plus grande). L'écoulement préférentiel se fait vers le nord et vers l'ouest, suivant l'inclinaison NNW de la surface de base. Peu de puits sont recensés dans ce secteur. Au sud-est du Fort de Bonnelles, un niveau piézométrique relevé dans un puits privé en février 2005 a montré que l'eau était à 4 m de profondeur, soit la cote de ≈ 241 m (P-Betzy). Au sud et à l'est, quelques exutoires alimentent des affluents de l'Ourthe.

2 - 3 - 3. Aquifères schisto-gréseux du Paléozoïque

Les schistes, grès et psammites du Dévonien moyen et inférieur (Eifélien, Emsien et Siegenien) et les schistes et grès du Houiller sont très peu perméables en petit. Ils ne peuvent contenir de l'eau récupérable que dans les fissures ouvertes dans les bancs de grès tectonisés et fracturés. Dans les schistes, les fractures sont généralement colmatées par un remplissage argileux.

Dans le manteau d'altération de ces terrains, une nappe superficielle peut se développer. Elle est liée au taux d'altération différentielle de la roche-mère. Les grès et les quartzites s'altérant en sables peuvent contenir un aquifère intéressant. Par contre, les schistes et siltites qui s'altèrent en argile sont pratiquement imperméables. Les réserves de ces nappes superficielles sont variables et soumises aux variations climatiques. De plus l'eau qu'elles renferment est particulièrement sensible aux influences de l'activité anthropique en surface.

2 - 4. Données disponibles

Diverses données et études géologiques permettent de définir la géologie de la zone du Sart Tilman (cf ci-dessus). Pour plus de détails, le lecteur pourra consulter les documents suivants :

- Calembert, L., Pel, J., Brumagne, D. 1964, *Géologie, Extrait du 2ième cahier du Sart Tilman*, Publication n°25, Laboratoires de Géologie de la Fac. des Sc. Appl., ULg.
- Calembert, L., Monjoie, A., Pel, J., 1970, *La géologie du Sart Tilman*, Collection des Publications de la Fac. des Sc. Appl., ULg, n°2 2, pp.16-21.
- Calembert, L., Pel, J., Monjoie, A., Burton, E., Lambrecht, L., 1974, *Géologie, Les guides scientifiques du Sart Tilman*, Conseil scientifique des Sites du Sart Tilman, 107p.
- Calembert, L., Monjoie, A., Polo-Chiapolini, Cl., 1975, *Carte géotechnique prototype du Sart Tilman*, 1/5.000, Centre de cartographie géotechnique, ULg, Annales des travaux publics de Belgique, n°5, 26 p. , 10 planches hors-texte
- Pel, J., 1980, *Structurologie de l'Eodévonien du campus universitaire du Sart Tilman (Liège)*, In Hommage à Léon Calembert, eds Georges Thone, Liège, pp. 231-239.

En ce qui concerne l'hydrogéologie, la carte hydrogéologique Seraing-Chênée (Ruthy et al, 2005) dresse une synthèse des diverses informations disponibles. Afin de compléter ces données, différentes sources ont été consultées et différentes données collectées et synthétisées.

2 - 4 - 1. Consultation de la banque de données hydrogéologiques de la Région wallonne

La banque de données hydrogéologiques 'BDHydro' de la Région wallonne a été consultée en vue d'en extraire les informations hydrogéologiques existant dans les 4 bassins étudiés.

9 ouvrages (piézomètres ou puits) ont été recensés dans les 4 bassins étudiés, 8 dans le bassin du Renory et 1 dans le bassin du Fond du Moulin (figure 2-2) :

- Parmi les 8 ouvrages localisés dans le bassin du Renory, 7 ont été réalisés lors de travaux (dirigés par la SPAQuE) de réhabilitation du site du Bois Saint-Jean. Pour ces 7 ouvrages, seuls des mesures du niveau piézométriques pour les années 2002 et 2003 sont disponibles dans la banque de données. Le 8^{ème} ouvrage est localisé dans le Port de Renory. Outre sa localisation, aucune autre information n'est disponible.
- Outre sa localisation, aucune information n'est disponible pour l'ouvrage situé dans le bassin du Fond du Moulin.

Aucune mesure de niveau piézométrique n'est donc disponible dans la zone d'étude pour la période correspondant à l'événement pluvieux extrême du 29 mai 2008. Il est donc impossible de déterminer l'état de la nappe avant, pendant et après cet événement.

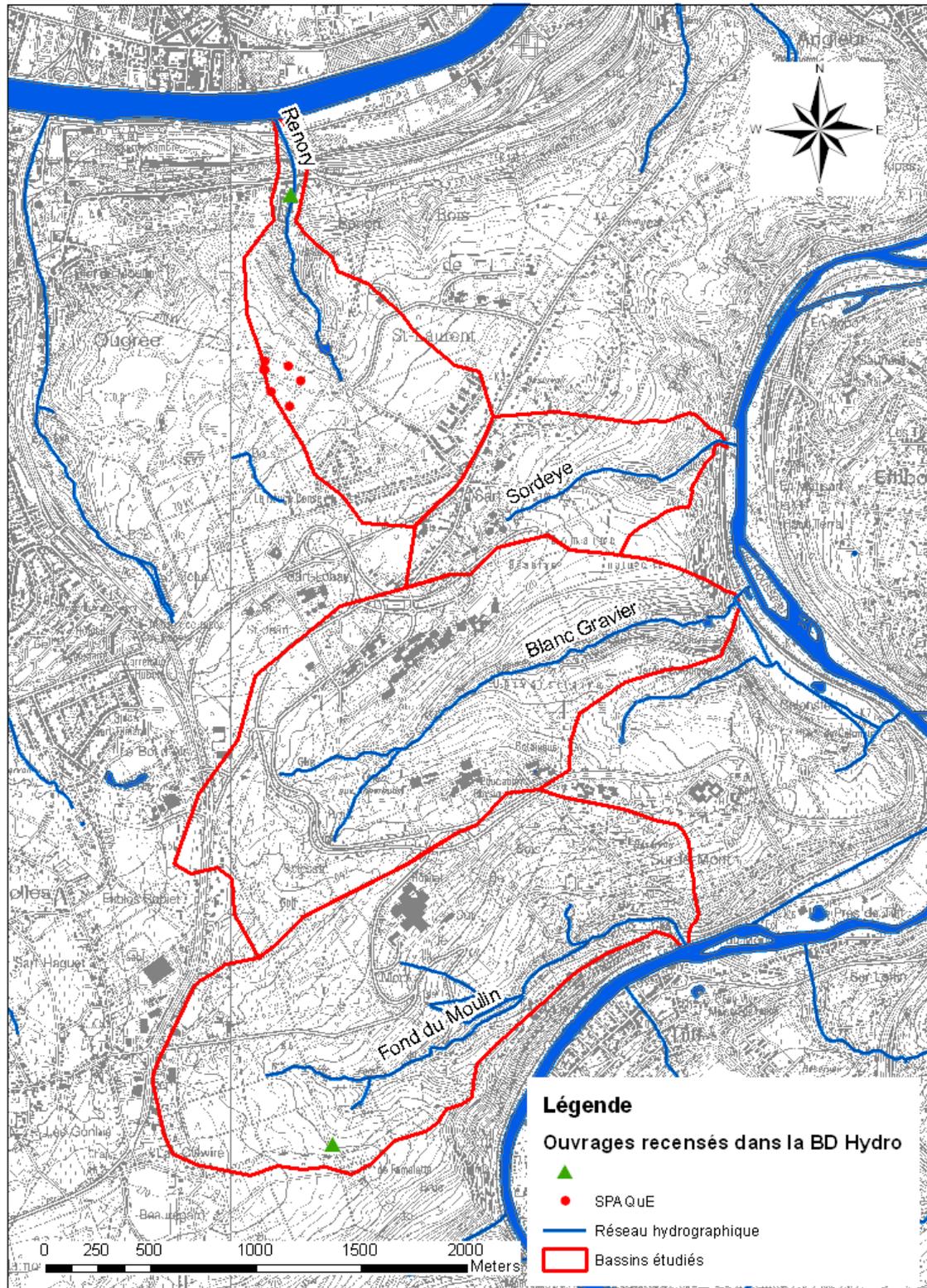


Figure 2-2 : Localisation des ouvrages recensés dans la banque de donnée hydrogéologique de la Région wallonne

2 - 4 - 2. Paramètres hydrodynamiques pour les niveaux de terrasses de la Meuse et l'Ourthe

La conductivité hydraulique des terrasses présentes dans le secteur étudiée n'est pas déterminée. La conductivité hydraulique de la plaine alluviale peut servir de valeur de référence (entre 1×10^{-2} et 1×10^{-4} m/s). La porosité efficace de ces terrasses est également inconnue, des valeurs comprises entre quelques % et environ 20%, déduites d'essais réalisés dans la plaine alluviale de la Meuse, pourront être utilisées.

2 - 4 - 3. Paramètres hydrodynamiques pour les sables oligocènes

Dans les années 60, des études hydrologiques et hydrogéologiques détaillées ont été réalisées sur le campus du Sart Tilman en vue de quantifier les ressources en eau, d'établir le bilan en eau et déterminer l'influence de l'implantation du campus universitaire sur le cycle naturel de l'eau. Dans ce cadre, différentes investigations hydrogéologiques ont été réalisées et compilées (Monjoie, 1970). Au cours de cette étude, les différents aquifères et leurs propriétés hydrodynamiques ont été décrits.

Différents essais ont été réalisés au laboratoire en vue d'identifier la granulométrie des sables, leur porosité et leur perméabilité. 25 déterminations de porosité totale ont été réalisées sur des échantillons non remaniés ; les valeurs trouvées varient entre 33 et 60% avec une valeur moyenne égale à 47%. La conductivité hydraulique des sables a été mesurée sur 70 échantillons remaniés. Elle varie entre 7×10^{-5} m/s et 1×10^{-7} m/s, la valeur moyenne étant de 8×10^{-6} m/s. Il faut rappeler que ces conductivités hydrauliques ont été mesurées sur échantillons au laboratoire, la conductivité hydraulique à l'échelle du lambeau de sable doit être supérieure d'un ou deux ordres de grandeur.

Les débits des sources existant au contact des sables tertiaires et du socle paléozoïque ont été mesurés, mettant en évidence deux zones distinctes au sein du lambeau des sables tertiaires. La première zone correspond à la partie nord du lambeau (couvrant notamment la zone amont des bassins du Renory et de la Sordeye) a de faibles capacités de stockage liée à la faible épaisseur des sables (en moyenne 5 m). La seconde zone correspond à la partie sud du Lambeau (couvrant notamment la zone amont des bassins du Blanc Gravier et du Ruisseau du Fond du Moulin) où l'épaisseur moyenne des sables est de l'ordre de 20 m et où la capacité de stockage est donc plus importante. Petit (1999) rapporte que le débit des sources situés sur les sables de l'Oligocène est généralement très faible ($< 1 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{j}^{-1}$ sur une source observée en 1991) et que des coefficients de tarissements compris entre 0.02 et 0.07 j^{-1} ont été calculés sur base de débits mesurés en période sèche. Il en déduit que l'aquifère des sables oligocènes est donc un aquifère à vidange rapide et que la nappe dans ces sables est peu développée.

2 - 4 - 4. Paramètres hydrodynamiques pour les formations du Paléozoïque

Deux études ont eu pour objet la caractérisation des paramètres hydrodynamiques des formations paléozoïques de la colline du Sart Tilman. Leurs principaux résultats sont résumés ci-dessous.

2 - 4 - 4 - a. Etude du site Bois Saint-Jean

A Ougrée, le site du Bois Saint-Jean a servi jadis de crassier pour l'industrie sidérurgique locale. Les derniers déversements ont eu lieu en 1987. Diverses études environnementales ont été menées sur ce site dans le but, in fine, de l'assainir (travaux dirigés par la SPAQuE). Une trentaine de piézomètres ont été forés. Ainsi l'allure de la nappe du bed-rock a pu être déterminée (figure 2-3). Les écoulements souterrains dans le bed-rock sont très peu influencés par la présence des remblais. En dehors de la zone d'emprise des remblais, la nappe est observée entre 1,5 et 5,5 m de profondeur en avril 2003, et entre 0,9 et 7,28 m en avril 2003. Au droit des remblais, la profondeur de la nappe du bed-rock peut atteindre 25 m ce qui correspond (approximativement) à l'épaisseur maximale des remblais. La surface piézométrique de la nappe du bed-rock suit de manière assez parallèle la surface topographique originelle du site. Les eaux souterraines semblent circuler essentiellement dans les terrains naturels (bed-rock schisto-gréseux) et très peu dans les remblais sauf ponctuellement à leur base (SPAQuE-SGS, 2002 et 2003).

Différents essais de pompage dans différents piézomètres ont également été réalisés sur le site. Des valeurs de conductivité hydraulique comprises entre 10×10^{-6} et 0.1×10^{-6} m/s ont été obtenues.

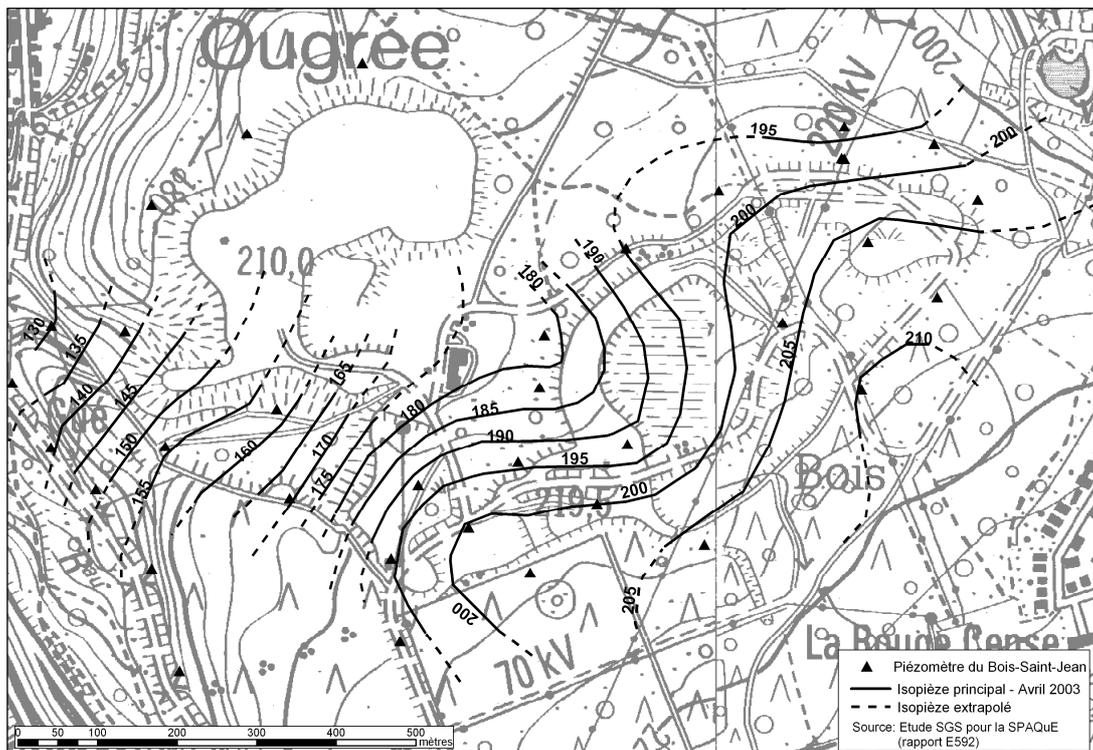


Figure 2-3 : Carte piézométrique de la nappe du bed-rock au droit du site du Bois Saint-Jean (Ruthy et al., 2005)

2 - 4 - 4 - b. Observations sur les nappes aquifères de fissures dans le promontoire Meuse-Ourthe

Les aquifères de fissures du Siegenien et de l'Emsien ont été caractérisés par Calembert & Monjoie (1973). Les formations paléozoïques présentent dans les 4 bassins étudiés (schistes, grès et quartzites) sont très peu perméables. Elles ne contiennent de l'eau que dans les fissures ouvertes des bancs de grès et quartzites. Dans les schistes, les fractures sont généralement colmatées.

Ces formations sont surmontées d'un manteau d'altération (colluvium et zone fauchée) d'une épaisseur variable pouvant atteindre quelques mètres. Dans cette zone altérée, une nappe superficielle peut se développer.

La porosité totale des formations du Siegenien et de l'Emsien a été mesurée sur 30 échantillons, des valeurs de 0,5 à 1,5% ont été obtenues. Des suivis de débits de cours d'eau, de source et de débits de galeries de captage à Seraing, l'établissement des courbes de récession correspondantes combinés à des suivis de fluctuations de hauteurs piézométriques ont également permis de quantifier la porosité de ces formations. Des valeurs de l'ordre de 1% ont également été trouvées.

Des essais Lefranc en forage, des essais Lugeon dans les galeries de captage de Seraing et l'observations des rabattements engendrés par l'exploitation de ces galeries ont permis de déterminer la conductivité hydraulique de ces formations (1×10^{-7} m/s en zones peu fissurées à 1×10^{-5} m/s en zones très fissurées). Dans les fissures, des conductivités hydrauliques de l'ordre de 1×10^{-2} m/s ont été observées.

2 - 5. Contexte géologique local

Une carte géologique de chaque bassin est dressée. Une description de la lithologie associée à chaque formation et des valeurs de porosité et conductivités hydrauliques sont ensuite proposées par bassin.

La formation géologique ayant pu jouer le rôle le plus important en terme de stockage d'eau lors de l'événement pluvieux est celle des sables oligocènes. Les sables sont en effet situés sur les parties les plus plates des bassins et leur conductivité hydraulique et leur porosité sont importantes. Pour chaque bassin, sur base d'hypothèse simplifiées (remplissage total de l'aquifère sableux, non prise en compte du degré de saturation avant l'événement pluvieux, épaisseur moyenne des sables, valeur de porosité estimée...), la quantité d'eau stockable au sein des aquifères sableux a été estimée.

2 - 5 - 1. Bassin du Renory

La description géologique provient de la carte géologique détaillée du Sart Tilman (Calembert *et al.*, 1964). Le bassin du Renory est couvert par les formations paléozoïques du Westphalien, Emsien 1 et du Siegenien 3, par les sables tertiaires et une terrasse de la Meuse (figure 2-4). La faille eifélienne met en contact l'Emsien et le Westphalien. Le tableau 2-1 reprend une description lithologique de ces différentes formations ainsi que les valeurs des propriétés hydrodynamiques estimées telles que communiquées à l'équipe chargée de la modélisation.

En considérant une épaisseur moyenne de sable de 5 m, une porosité efficace de 20 % et la superficie des sables au sein du bassin étant égale à 314.495 m², la quantité d'eau stockable dans l'aquifère sableux est de 314.945 m³.

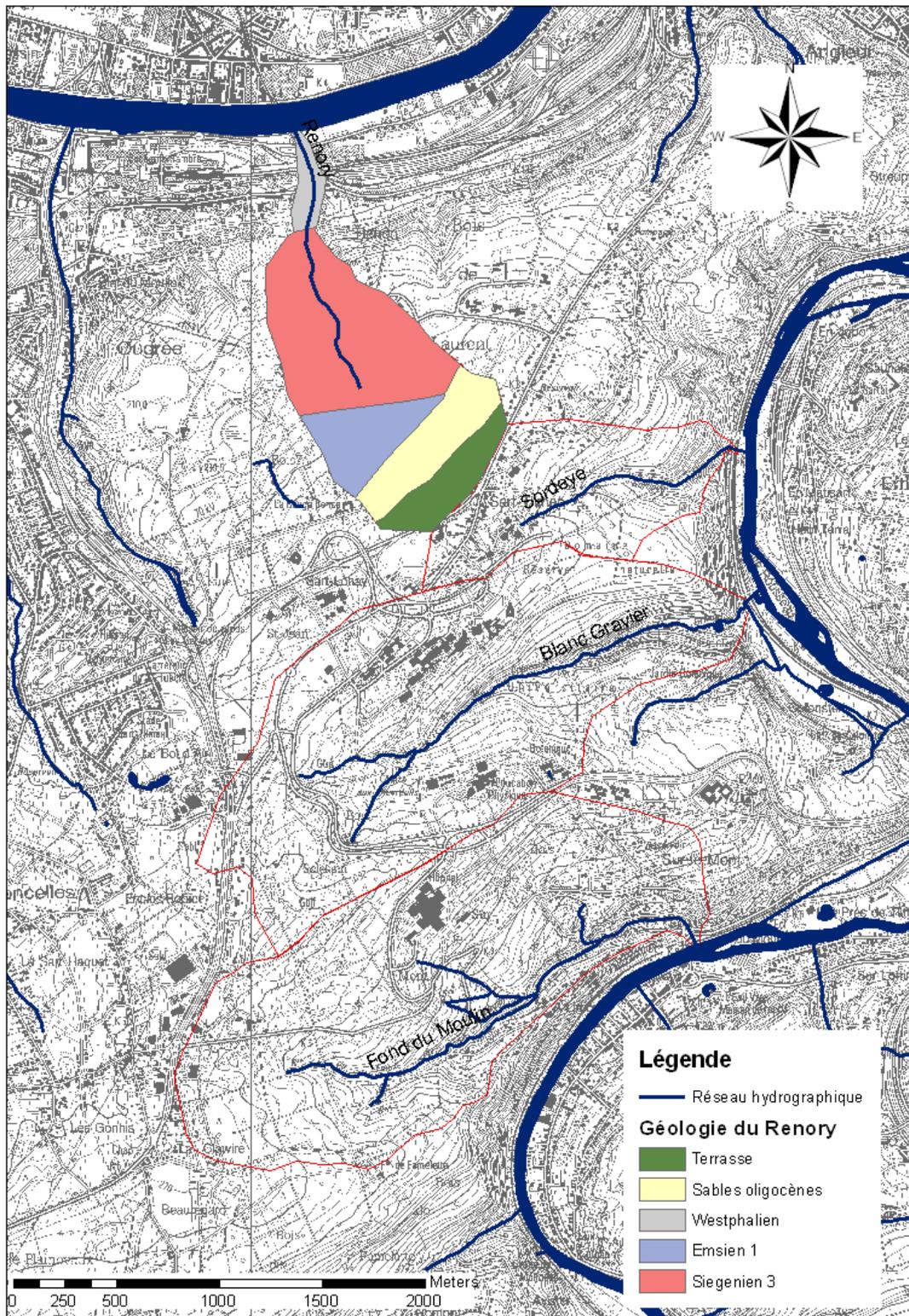


Figure 2-4 : Géologie du bassin du Renoy

Tableau 2-1 : Description lithologique des formations couvrant le bassin du Renory et valeurs estimées des paramètres hydrodynamiques

Code	Lithologie	Porosité efficace (%)	Conductivité hydraulique (m/s)
Terrasse	Sables et gravier, limons au sommet	5 - 20	1×10^{-2} - 1×10^{-4}
Sables oligocènes	Sables, niveau graveleux	10 - 50	1×10^{-3} - 1×10^{-5}
Westphalien	Alternance de schistes + ou – gréseux et de grès avec intercalations de veines de charbon	0,1 - 1	1×10^{-5} - 1×10^{-7}
Emsien1	Quartzites, schistes, quelques niveaux de poudingues	0,1 - 1	1×10^{-5} - 1×10^{-7}
Siegenien 3	Schistes, quartzites, grès micacés.	0,1 - 1	1×10^{-5} - 1×10^{-7}

2 - 5 - 2. Bassin du Sordeye

La description géologique provient de la carte géologique détaillée du Sart Tilman (Calembert et al, 1964). Le bassin de la Sordeye est couvert par les formations paléozoïques de l'Emsien, par les sables tertiaires et des lambeaux de terrasse de la Meuse et de l'Ourthe (figure 2-5). Le tableau 2-2 reprend une description lithologique de ces différentes formations ainsi que les valeurs des propriétés hydrodynamiques estimées telles que communiquées à l'équipe chargée de la modélisation.

En considérant une épaisseur moyenne de sable de 5 m, une porosité efficace de 20 % et la superficie des sables au sein du bassin étant égale à 246.986 m², la quantité d'eau stockable dans l'aquifère sableux est de 246.986 m³.

Tableau 2-2 : Description lithologique des formations couvrant le bassin de la Sordeye et valeurs estimées des paramètres hydrodynamiques

Code	Lithologie	Porosité efficace (%)	Conductivité hydraulique (m/s)
Terrasse	Sables et gravier, limons au sommet	5 - 20	1×10^{-2} - 1×10^{-4}
Sables oligocènes	Sables, niveau graveleux	10 - 50	1×10^{-3} - 1×10^{-5}
Emsien2-3 – Assise inférieure	Grès, quartzites, schistes	0,1 - 1	1×10^{-5} - 1×10^{-7}
Assise de transition E1/E2-E3	Schistes, intercalations schisto-gréseuses	0,1 - 1	1×10^{-5} - 1×10^{-7}
Emsien1	Quartzites, schistes, quelques niveaux de poudingues	0,1 - 1	1×10^{-5} - 1×10^{-7}

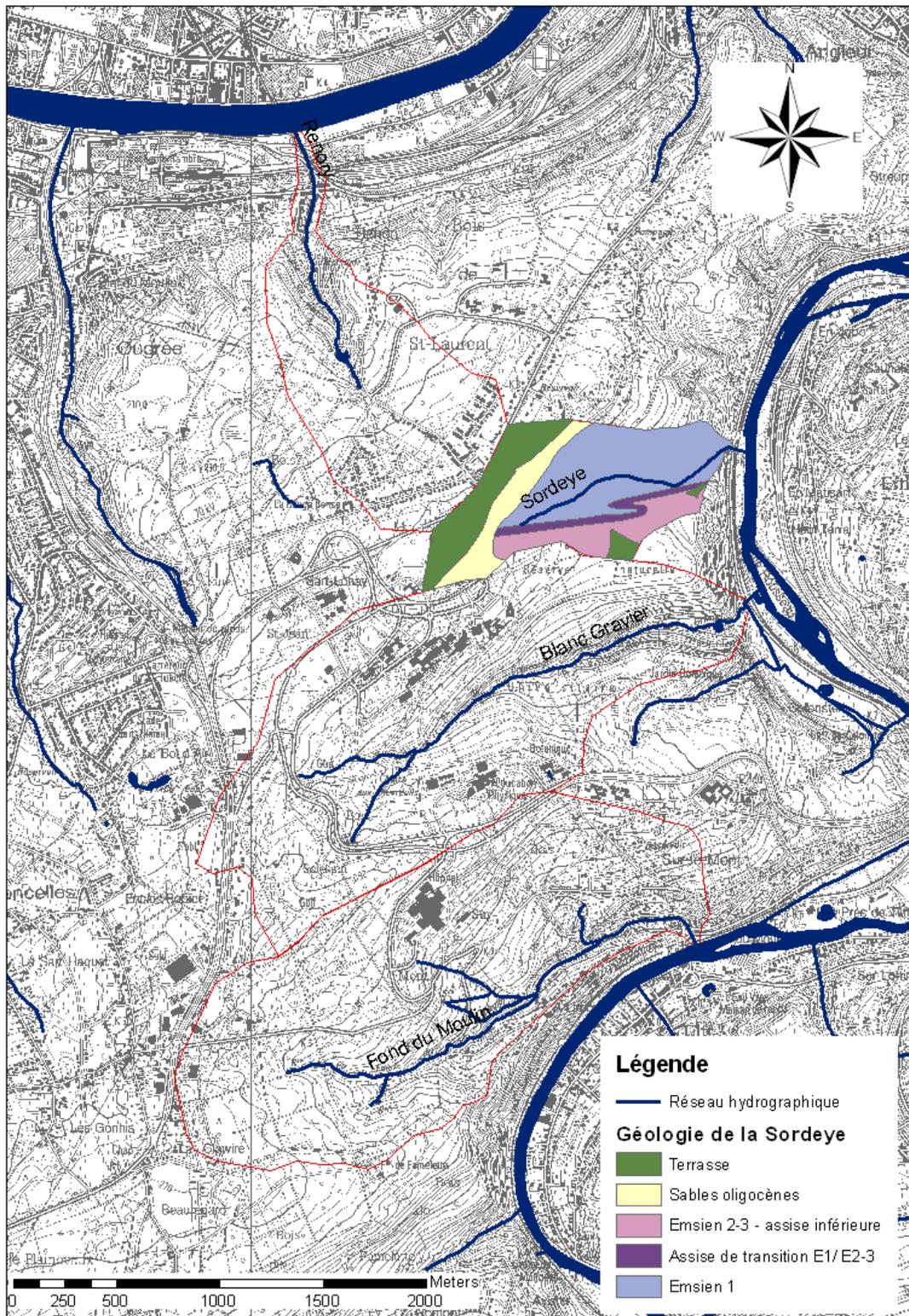


Figure 2-5 : Géologie du bassin de la Sordeye

2 - 5 - 3. Bassin du Blanc-Gravier

La description géologique provient de la carte géologique détaillée du Sart Tilman (Calembert *et al.*, 1964). Le bassin du Blanc Gravier est couvert par les formations paléozoïques de l'Emsien 2 et 3, par les sables tertiaires et des lambeaux de terrasse de la Meuse et de l'Ourthe (figure 2-6). Le tableau 2-3 reprend une description lithologique de ces différentes formations ainsi que les valeurs des propriétés hydrodynamiques estimées telles que communiquées à l'équipe chargée de la modélisation.

En considérant une épaisseur moyenne de sable de 20 m, une porosité efficace de 20 % et la superficie des sables au sein du bassin étant égale à 680.202 m², la quantité d'eau stockable dans l'aquifère sableux est de 2.720.808 m³.

Tableau 2-3 : Description lithologique des formations couvrant le bassin du Blanc Gravier et valeurs estimées des paramètres hydrodynamiques

Code	Lithologie	Porosité efficace (%)	Conductivité hydraulique (m/s)
Terrasse	Sables et gravier, limons au sommet	5 - 20	1×10^{-2} - 1×10^{-4}
Sables oligocènes	Sables, niveau graveleux	10 - 50	1×10^{-3} - 1×10^{-5}
Emsien2-3 – Assise supérieure	Quartzites, grès, au sommet poudingues	0,1 - 1	1×10^{-5} - 1×10^{-7}
Emsien2-3 – Assise inférieure	Grès, quartzites, schistes	0,1 - 1	1×10^{-5} - 1×10^{-7}

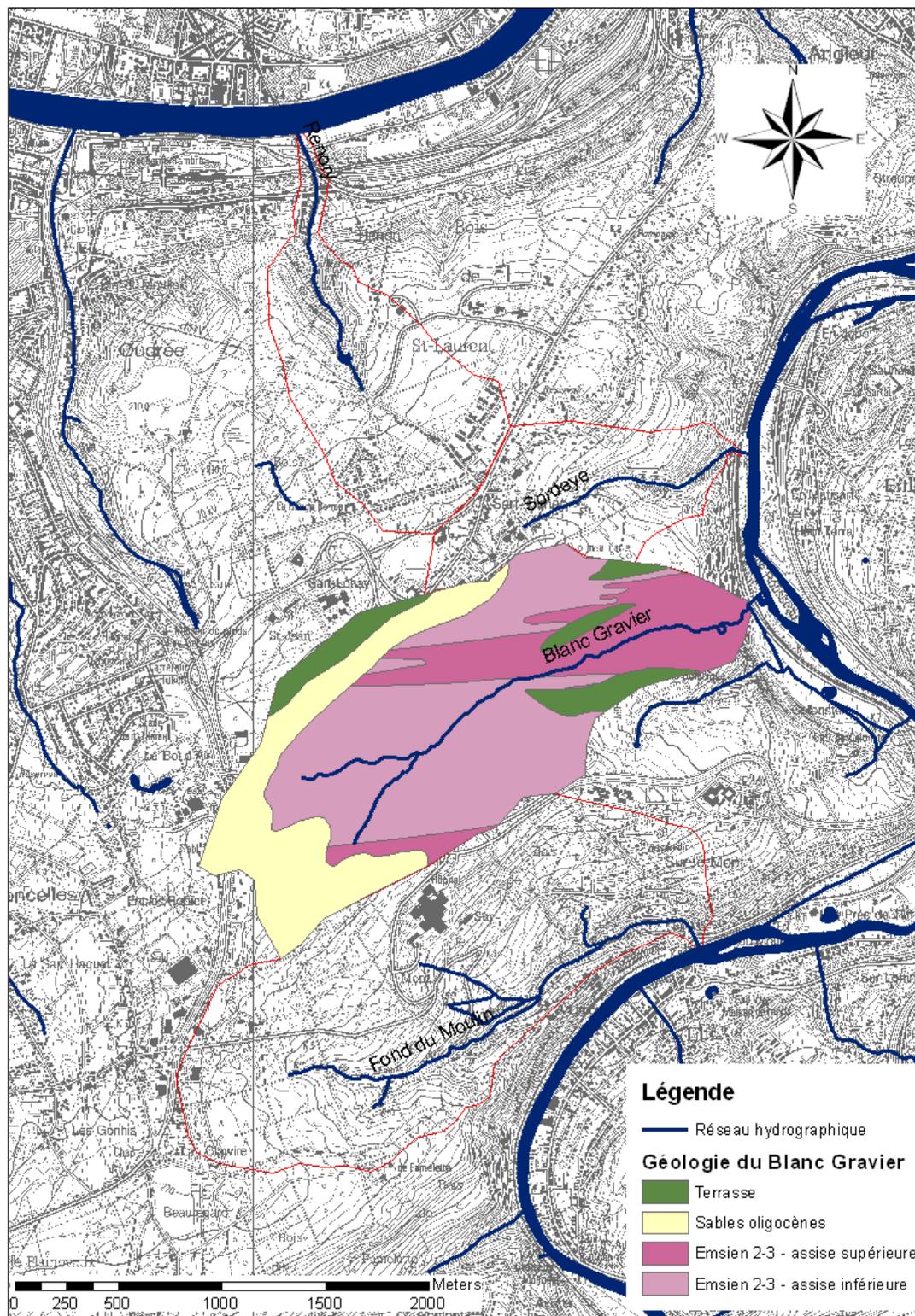


Figure 2-6 : Géologie du bassin du Blanc Gravier

2 - 5 - 4. Bassin du Fond du Moulin

Comme la carte géologique détaillée du Sart Tilman ne couvre pas l'entièreté du bassin du Fond du Moulin, la description géologique provient de la carte géologique Seraing –Chênée de Forir (1897). Le bassin du Fond du Moulin est couvert par les formations paléozoïques du Coblencien 3 et du Burnotien, par les sables tertiaires (figure 2-7). Le tableau 2-4 reprend une description lithologique de ces différentes formations ainsi que les valeurs des propriétés hydrodynamiques estimées telles que communiquées à l'équipe chargée de la modélisation.

En considérant une épaisseur moyenne de sable de 20 m, une porosité efficace de 20 % et la superficie des sables au sein du bassin étant égale à 667.105 m², la quantité d'eau stockable dans l'aquifère sableux est de 2.668.420 m³.

Tableau 2-4 : Description lithologique des formations couvrant le bassin du Fond du Moulin et valeurs estimées des paramètres hydrodynamiques

Code	Lithologie	Porosité efficace (%)	Conductivité hydraulique (m/s)
Alluvions	Sables et gravier, limons au sommet	5 - 20	$1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-4}$
Sables oligocènes	Sables, niveau graveleux	10 - 50	$1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-5}$
Bt (Burnotien)	Schistes et grès	0,1 - 1	$1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-7}$
Cb3 (Coblencien)	Schistes avec intercalations de grès	0,1 - 1	$1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-7}$

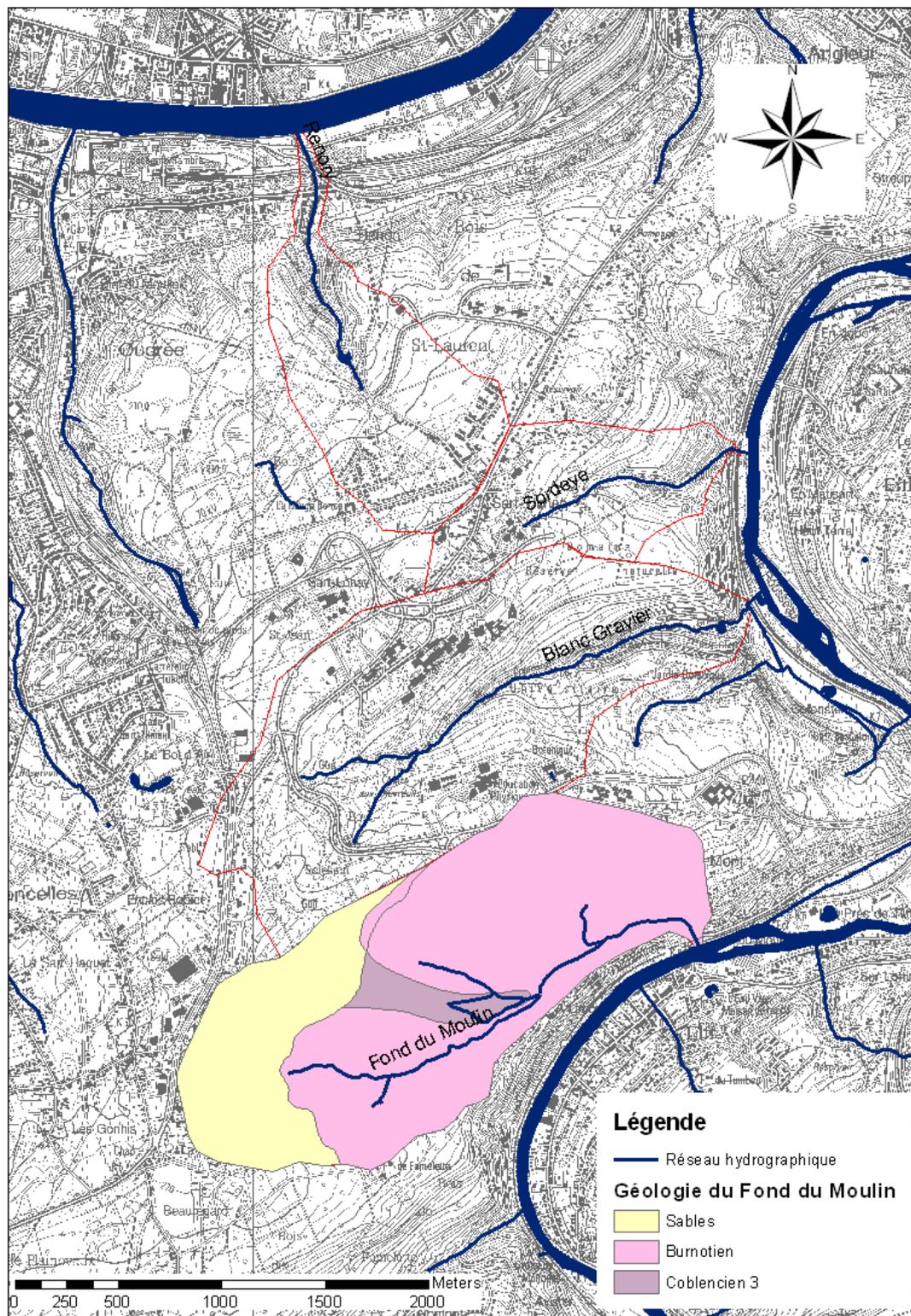


Figure 2-7 : Géologie du bassin du Fond du Moulin

2 - 6. Conclusion

Au cours de cette étude, les formations géologiques couvrant les bassins étudiés ont été décrites. Le fonctionnement hydrogéologique de ces formations a été mis en évidence. Des valeurs des paramètres hydrodynamiques régissant l'écoulement au sein de ces formations ont été collectées.

Au vu des paramètres hydrodynamiques et du fonctionnement des différents aquifères, la formation géologique ayant pu jouer le rôle le plus important en termes de stockage d'eau lors de l'événement pluvieux est celle des sables oligocènes. Les sables sont en effet caractérisés par une grande porosité permettant un stockage d'un volume important d'eau et une perméabilité importante permettant une infiltration et une circulation rapide de l'eau.

Il est, par contre, impossible de préciser le rôle exact des aquifères pendant l'événement pluvieux extrême. Aucune donnée piézométrique n'est disponible dans la zone d'étude pour la période correspondant à cet événement. Il faut d'ailleurs remarquer que la plupart des suivis piézométriques ne sont pas adaptés au suivi et à la compréhension de l'impact sur les eaux souterraines de tels événements pluvieux vu que les fréquences d'échantillonnages sont généralement trop faibles.

3. Opérations topographiques



3 - 1. Introduction

Les opérations topographiques ont été réalisées en deux étapes (service de Topographie et de Géométrie).

La première a consisté en l'établissement, le mesurage et l'implantation d'un **réseau de points de topographiques de références** idéalement répartis sur les lits des bassins versants des zones étudiées. Ces points de contrôles doivent servir :

- à la réalisation de levés de détails (pour la densification de modèles numériques de terrain, le repérage de structures particulières, etc.),
- au rattachement d'autres données ou réseaux (levés d'autres équipes).

La deuxième étape a consisté en la réalisation de **plusieurs levés de détails** permettant de densifier les MNT aux endroits stratégiques (voir chapitre C.4 : « Création de modèles numériques de terrain (MNT) ») ainsi que d'identifier les éléments importants à prendre en compte dans la modélisation. Ces levés consistent en la mesure de différents points de niveaux et en l'identification des différents pertuis, canal, taques le long du tracé des cours d'eau. Enfin, une série de coupes topographiques / sections de contrôles ont également été réalisées en vue d'aider à la modélisation.

Dans la suite de cette section, nous décrivons la méthode utilisée pour mettre en place le réseau de points de contrôle (matérialisés par des bornes) ainsi que la méthode de levé et de compensation utilisée.

3 - 2. Implantation d'un réseau de points de contrôles

3 - 2 - 1. Matérialisation des bornes et localisation

Après visite de terrain avec les différentes équipes et identification des différentes zones à étudier, il a été décidé de réaliser un réseau de bornes de contrôles à proximité des lits mineurs des trois bassins principaux de l'étude, à savoir, le Renory, le Fond du Moulin et le Blanc Gravier.

Les bornes sont implantées de façon à répondre à deux types de critères :

Critères obligatoires :

- Inter visibilité avec au moins 2 autres bornes du réseau :
 - o Cette contrainte est le fondement du réseau. Ceci permet par la suite de mesurer les bornes en utilisant une technique de polygonaion.
- Couverture de zone :
 - o La zone de visibilité des bornes doit permettre de mesurer la majeure partie du cours d'eau. Dans les cas les plus défavorables, il doit toujours être possible de lever le lit en implantant une seule station temporaire à partir des bornes présentes.
- Stabilité – pérennité :
 - o Les bornes implantées doivent résister à la majeure partie des crues, avoir une stabilité suffisante afin de ne pas avoir un mouvement absolu de plus de 1 à 2 centimètre par an. Elles doivent finalement ne pas être facilement dégradables par les badauds, et en conséquence non implantées trop visiblement le long des sentiers de passage.

Critères facultatifs :

- Facilité de repérage :
 - o Bien que faisant l'objet d'une identification par fiche borne, elles doivent être situées tant que possible dans une zone permettant l'identification rapide sur terrain.
- Facilité de station :
 - o Autant que possible, la zone choisie pour l'implantation permettra une mise en station aisée des instruments de mesures.

Après étude des différentes solutions possibles, il s'avère que le meilleur type de borne pour ce genre de travail est une borne en béton coulée sur place. En effet, le caractère public des zones étudiées, ainsi que le nombre de bornes à placer ne permettait pas d'utiliser des bornes de type FAYNOT. De plus, le substrat étant souvent peu profond, ce type d'accroche n'aurait pas été suffisant. Le choix s'est donc porté sur le moulage d'un cube de béton de 10 cm de côté traversé par une barre à béton de 14mm enfoncée de 40 à 60cm dans le sol. Le point mesuré est situé sur le sommet de la tige en acier. Celle-ci dépasse généralement de quelques centimètres de la borne. La figure 3-1 représente le type de borne employée. Un total de 130 stations de contrôles ont été matérialisées sur terrain.



Figure 3-1 : Borne de béton armée coulée sur place.

3 - 2 - 2. Cheminement – Etablissement de la polygonale

Deux opérations topographiques ont été réalisées afin de fournir un jeu de coordonnées tridimensionnelles pour l'ensemble des points de la polygonale. La première consiste en un cheminement fermé tendu par centrage forcé et double retournement. La seconde consiste en un nivellement trigonométrique. Dans le cadre de cette étude, l'instrument de mesure utilisé (station totale TCRA1205) a permis de réaliser ces deux opérations conjointement.

La précision relative des points de polygonale requise par les autres équipes du projet est de l'ordre de 2 centimètres en altimétrie et de 3 centimètres en planimétrie. Cette précision attendue permet l'utilisation d'un rattachement GPS et d'une polygonation. En effet, étant donné la méthode et les instruments utilisés, à savoir un levé GPS RTK basé sur le réseau Walcors pour déterminer les points d'appuis du cheminement (calage dans le système global) et un cheminement fermé tendu à l'aide d'une Station Totale Leica type TCRA 1205, la précision obtenue correspond aux attentes. Il est à noter que le type de station totale utilisée possède une précision en distance de 2mm+2ppm et une précision angulaire de 1,5 mgon. Toutes les mesures ont été effectuées en veillant à respecter les standards de qualité définissant le cheminement de précision ; à savoir, le double retournement, le centrage forcé, la mesure de pression atmosphérique, la mesure d'humidité relative et la mesure de température ambiante afin d'effectuer au mieux les réductions nécessaires préalablement au calcul de la polygonale (cheminement fermé tendu dans notre cas) à proprement parler.

La compensation s'est faite suivant une compensation par technique de moindres carrés fondée sur des équations d'observations. Ceci permet d'intégrer à la fois un modèle mathématique ainsi qu'un modèle stochastique qui tient compte de la précision relative de chaque mesure lors de la compensation. Cette technique permet également de définir des ellipses de confiances définissant la qualité intrinsèque de chaque point. Enfin, l'ensemble des mesures ont été transformées d'un système local vers le Lambert belge 1972 à l'aide d'un calage GPS effectué avec le système Walcors-RTK. Notons que lors de cette opération, un certain nombre de points préalablement mesurés par le laboratoire d'hydrologie et de géomorphologie fluviale (LHGF) ont été relevés.

Les trois figures suivantes représentent l'implantation globale des stations dans les 3 bassins versants étudiés.

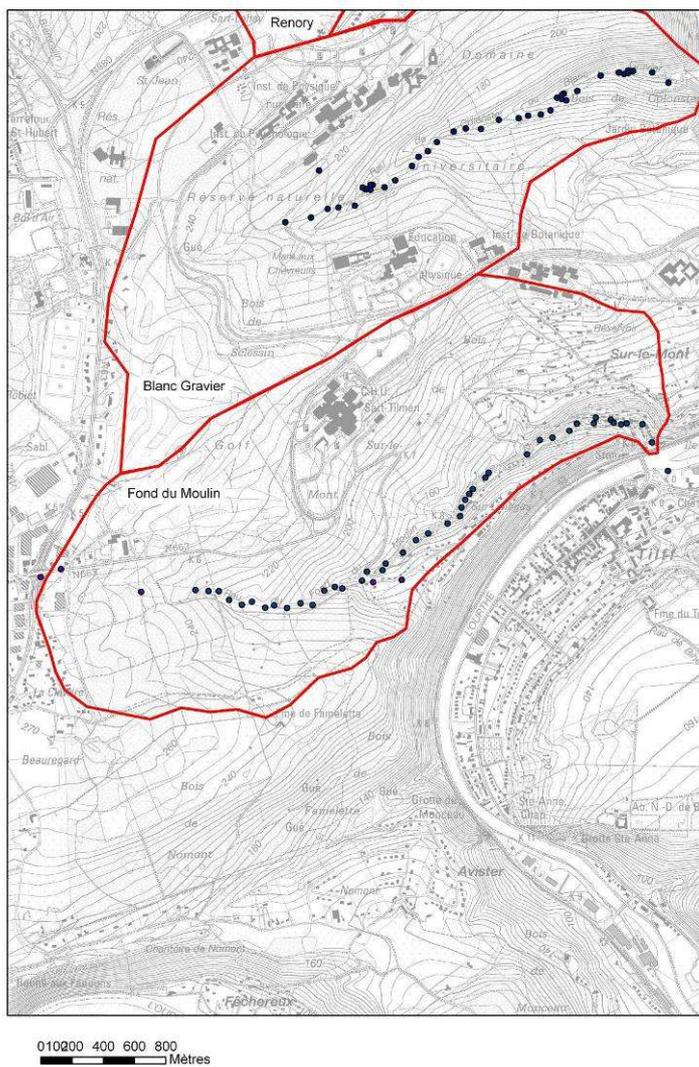


Figure 3-2 : Bassin du Fond du Moulin – stations de contrôles implantées en bleu.

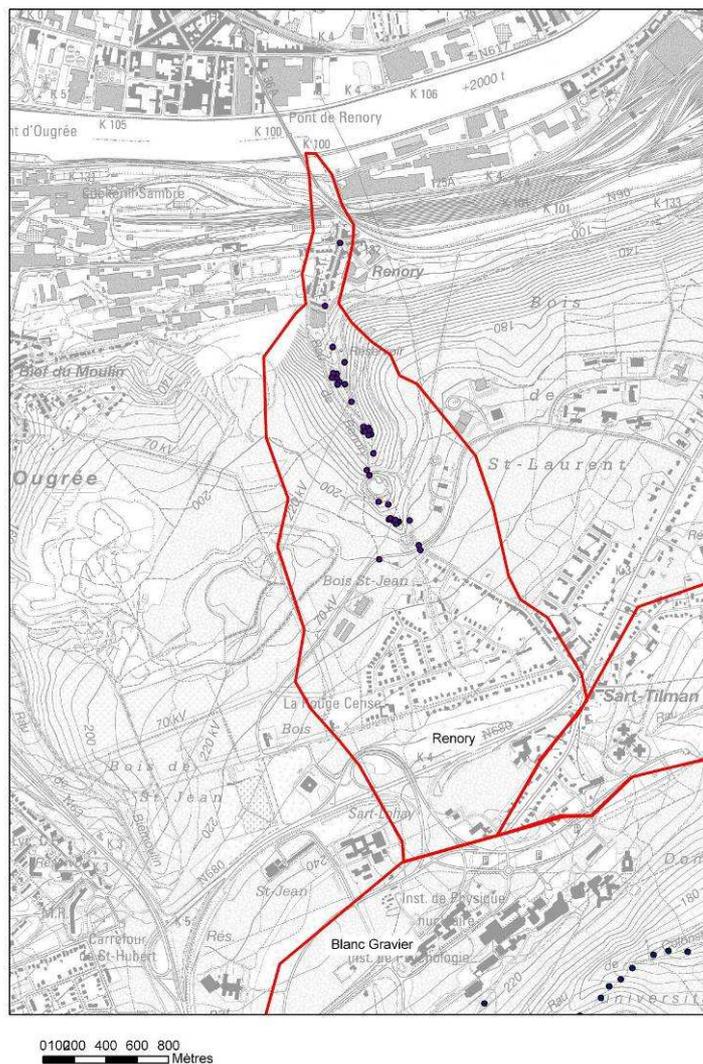


Figure 3-3 : Bassin du Renory – stations de contrôles implantées en bleu.

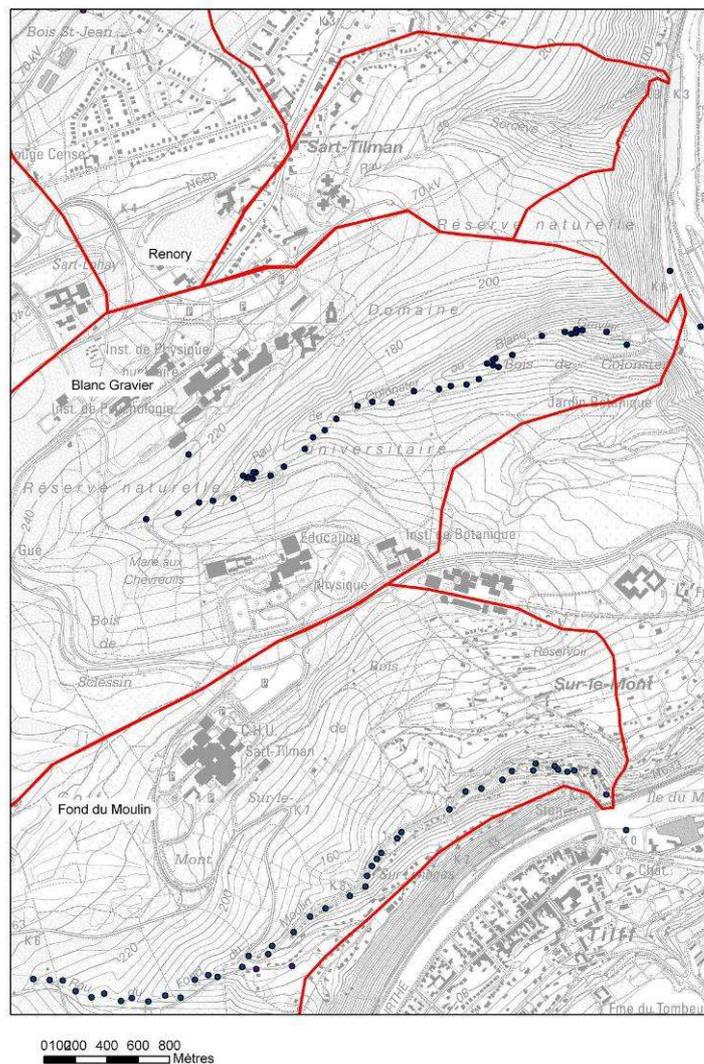


Figure 3-4 : Bassin du Blanc Gravier – stations de contrôles implantées en bleu.

Ont été fournis, un listing des coordonnées Lambert Belge 72 de chaque point de contrôle, une fiche borne reprenant les informations de chaque point, ainsi qu'une aide à la localisation du point.

Une visite de terrain a également été prévue afin de permettre à toutes les équipes intervenantes de visualiser la position des points de contrôle.

3 - 2 - 3. Levés complémentaires

3 - 2 - 3 - a. Fond du Moulin

Le bassin du fond du Moulin a été couvert par un levé de points de niveau de part et d'autre du lit sur une distance de +/- 20m dans la zone sous couvert forestier. La partie urbanisée quant à elle a été levée jusqu'aux habitations les plus proches. Dans cette zone, la taille des pertuis et la dimension du canal ont également été mesurées. 36 coupes topographiques ont également été réalisées afin de représenter au mieux la complexité du relief local.

3 - 2 - 3 - b. Renory

Un Levé de points de niveau de part et d'autre du lit sur les zones sensibles à la réalisation du MNT a été effectué. Les profondeurs des bassins d'orage ainsi que la taille des canalisations aériennes et des pertuis, les points préalablement implantés par le LHGF ont été mesurés.

3 - 2 - 3 - c. Blanc Gravier

Cette zone ne présentant pas d'éléments de relief local particuliers, seuls les points préalablement implantés par le LHGF ont été relevés. Les points de polygones sont suffisants sur cette zone pour vérifier la cohérence du MNT calculé.

Ont été délivrés, l'ensemble des coupes topographiques, un listing des dimensions et positions de pertuis, ainsi que la localisation des points levés sur les trois sites.

La figure suivante représente un extrait du plan de levé réalisé afin de densifier le modèle numérique de terrain.

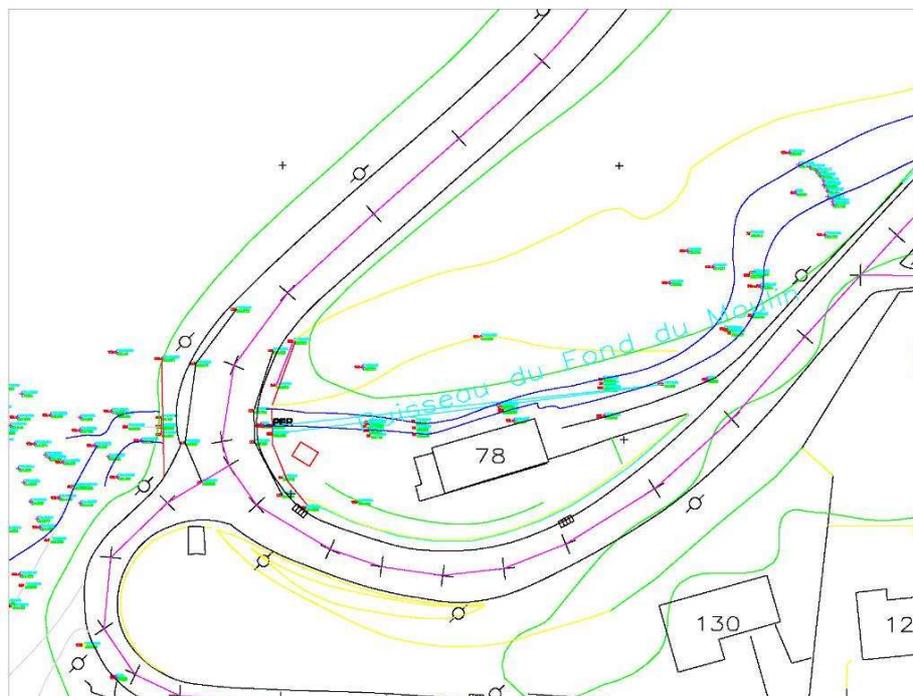


Figure 3-5 : Extrait du plan de densification du MNT surchargé du PICC.

4. **Création de modèles numériques de terrain (MNT)**



Les simulations hydrologiques qui font l'objet de l'étude reposent notamment sur des modèles du relief des bassins versants (appelé modèles numériques de terrain ou MNT). La construction de ces MNT passe par une phase de collecte des données déjà disponibles auprès d'administrations ainsi qu'en une phase d'enrichissement sur base des données topographiques relevées spécifiquement à cet effet (voir chapitre C.3 : « Opérations topographiques »).

Dans la suite, nous décrivons la méthode utilisée afin de générer les modèles numériques de terrain.

4 - 1. **Sélection des sources de données**

Les données disponibles à la réalisation du projet sont décrites succinctement ci-dessous.

- Levés de détails :
 - o Levés réalisés sur base du réseau de points topographiques de référence défini préalablement. La précision planimétrique et altimétrique de ces points est de l'ordre de quelques centimètres.
 - o Ceux-ci sont disponibles dans les zones sensibles du relief afin de permettre une bonne interpolation. Ces zones sont essentiellement définies de part et d'autre du lit mineur des cours d'eaux étudiés.
- Coupes topographiques :
 - o De même précision que les levés de détails, les coupes servent de section de contrôle au modèle numérique de terrain afin de vérifier sa pertinence dans les zones difficiles à interpoler (notamment dans les zones urbanisées).
- Lidar (Sethy)
 - o Les deux échos sont disponibles, nous avons principalement utilisé le 2^{ème} écho correspondant au mieux aux points au sol (surtout sous couvert forestier).
 - o La résolution planimétrique est de 1m et la précision altimétrique est de 13 centimètres.
- PICC
 - o Lorsque celui-ci est disponible, il a également été utilisé. Les données fournies par la région wallonne sont au format DWG qui permet l'enregistrement de polygones 3D ce qui permet l'utilisation de ces données notamment comme ligne de rupture de pente. Les couches thématiques conservées sont principalement des objets au sol : bâtiments, bord de rue, axe de rue, réseau hydrographique, points isolés.
 - o La précision de ces objets est de 25cm dans les trois dimensions.
- Modèles numériques de terrain de l'IGN
 - o DTM-10 000 et Top10vGIS

- Les données utilisées sont les points cotés, les axes de vallées, les lignes de crêtes ainsi que les courbes de niveau
- La précision tridimensionnelle de ces données est de l'ordre du mètre.
- DETD-WGS 1 :50 000
 - Ces données sont beaucoup moins utiles à cause de leur faible précision et de leur faible fiabilité.
 - La précision altimétrique finale des points fournis dans ce jeu de donnée est de l'ordre de 10 mètres.

4 - 2. Calcul du MNT

Le calcul du MNT a consisté en la consolidation de toutes les données disponibles sur base de leur précision relative et de leur extension spatiale. Les données les plus précises ont été utilisées en priorité. Une attention toute particulière à la cohérence des données a été apportée lors du calcul. Cependant, comme on peut le constater dans la zone du Renory, certaines valeurs du modèle numérique de terrain au 1 :10 000 de l'IGN ont reçu trop d'importance lors de la pondération relative. Ceci entraîne la formation de pics. Ceux-ci étant limité au lit de la Meuse et n'entrant pas dans la zone de modélisation le modèle n'a pas été modifié en conséquence. Les autres zones ne souffrent pas de cette anomalie.

L'ordre de sélection des sources de données est le suivant :

LEVER DE DÉTAIL > LIDAR > PICC > DTM (1 : 10 000) > DTM (1 :50 000)

Les 3 figures suivantes représentent les 3 MNT créés. Ceux-ci sont surchargés d'un extrait de carte topographique IGN au 1/10 000.

Fond du Moulin - MNT 20m

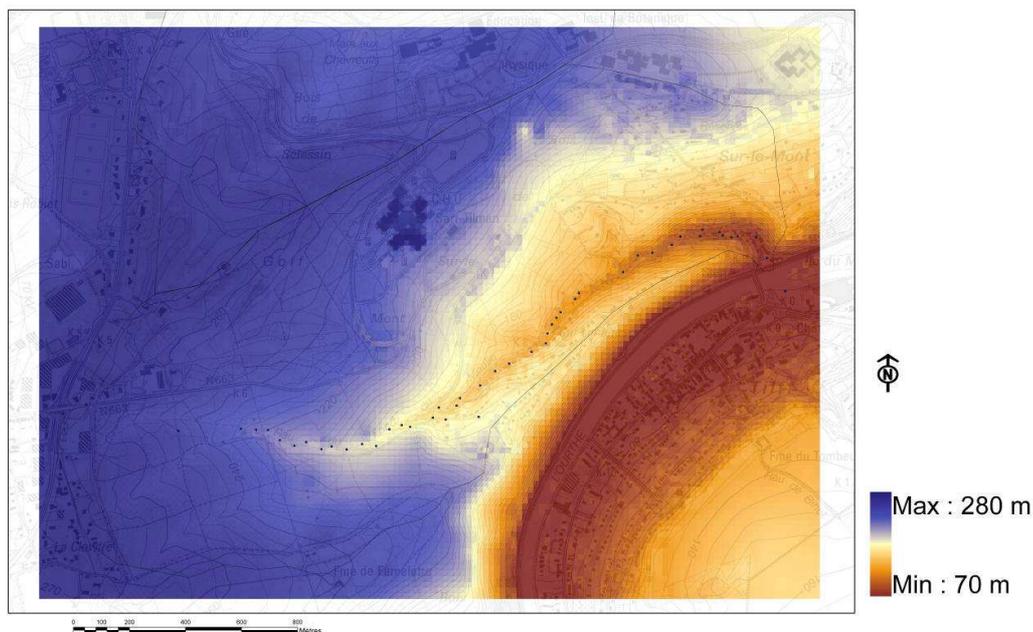


Figure 4-1 : Modèle numérique de terrain généré sur la zone du Fond du Moulin.

Renory - MNT 20m

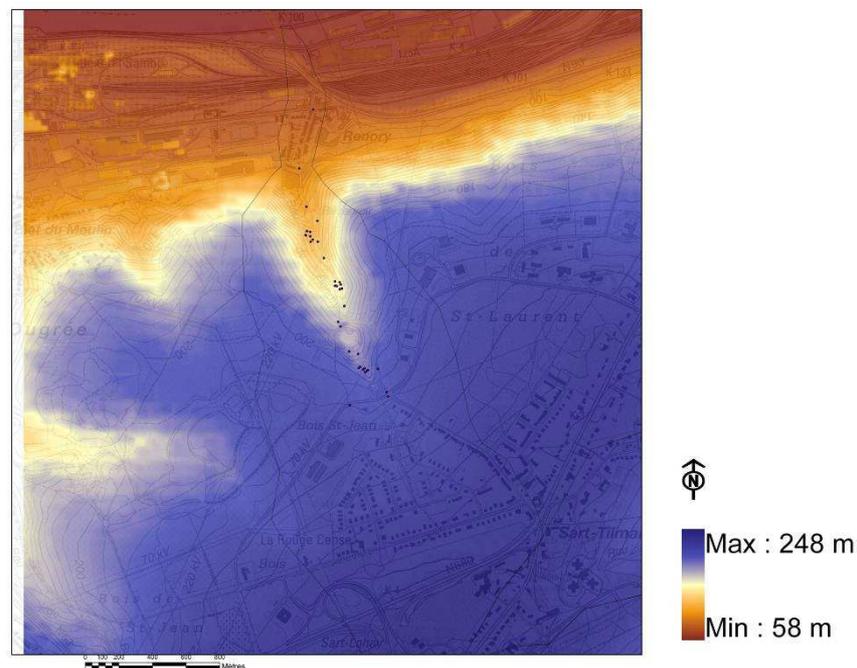


Figure 4-2 : Modèle numérique de terrain généré sur la zone du Renory.

Blanc Gravier - MNT 20m

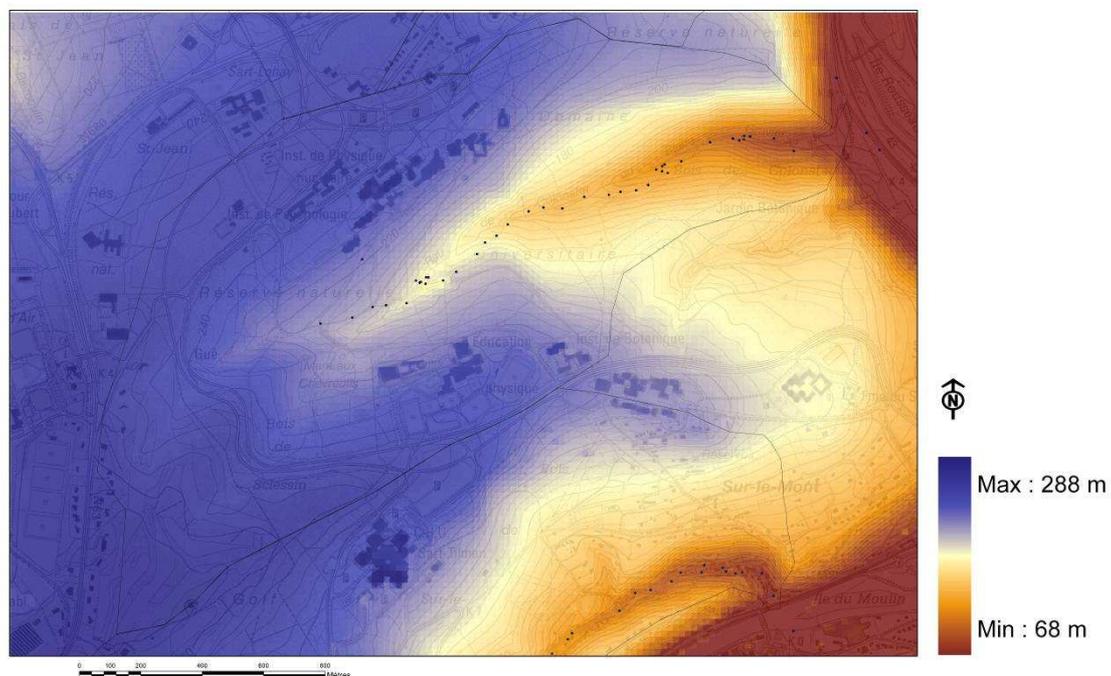


Figure 4-3 : Modèle numérique de terrain généré sur la zone du Blanc Gravier.

Ont été délivrés, un MNT englobant le bassin versant des 3 cours d'eaux étudiés au format IMG. Celui-ci a été échantillonné une fois à une résolution spatiale de 2 mètres et une fois à une résolution de 20 mètres. Un calcul de modèle de pente a également été réalisé afin de vérifier la cohérence du résultat final.

4 - 3. Conclusions et perspectives

Suite aux diverses campagnes de mesures de terrain, il a été possible de proposer un modèle numérique de terrain complet de la zone d'intérêt. Celui-ci a été réalisé sur base des techniques de mesures les plus adéquates pour des zones sous couvert forestier, à savoir le levé de détail et la densification de modèles numériques de terrain. Plus qu'un simple MNT, un véritable site d'étude pérenne a été réalisé sur l'ensemble des trois bassins étudiés. De cette manière, une cohérence entre toutes les futures campagnes de mesures dans cette zone pourra être garantie. Enfin cette étude a permis de montrer à toutes les équipes intervenantes l'importance de la définition préalable des précisions attendues par les différents utilisateurs de données. En effet, c'est la gamme de précision attendue qui définit principalement la technique de mesure utilisée pour acquérir la donnée. Un modèle numérique de terrain d'une précision métrique ou décimétrique s'obtient par deux philosophies de travail tout à fait différentes et par conséquent par des coûts très différents également.

5. Contexte hydrodynamique et géomorphologique



PARTIE 1 : Présentation générale

5 - 1. Présentation générale de la problématique

5 - 1 - 1. L'événement du 29 mai 2008

Cette convention a été mise en place suite aux crues exceptionnelles des cours d'eau du domaine du Sart Tilman et des bassins proches suite aux précipitations extrêmes du 29 mai 2008.

Les précipitations ont été concentrées entre 8h20 et 9h30. Les caractéristiques des précipitations, associées à un front occlus oscillant à proximité de la frontière allemande, ont été décrites par la première équipe en charge de cette étude. Le tableau 1-1 (voir chapitre C.1. : « Présentation de l'événement pluviométrique ») récapitule la hauteur des précipitations enregistrées sur le plateau du Sart Tilman. Compte tenu de la superficie du Sart Tilman et de la hauteur des précipitations, nous avons estimé à environ un million de m³ d'eau le volume précipité durant la journée du 29 mai 2008.

Plusieurs bassins versants ont été affectés par des inondations exceptionnelles : des bassins presque exclusivement forestiers (ruisseau de Sordeye, ruisseau du Blanc Gravier) et des bassins partiellement urbanisés (ruisseau de Renory, ruisseau du Fond du Moulin et ruisseau du Vieux Moulin). Dans le cadre de cette étude, les quatre premiers bassins nommés ici ont fait l'objet d'une étude hydrographique, géomorphologique et sédimentologique. La figure 5-1 précise les sites où des levés topographiques précis ont été réalisés dans les semaines qui ont suivi les inondations.

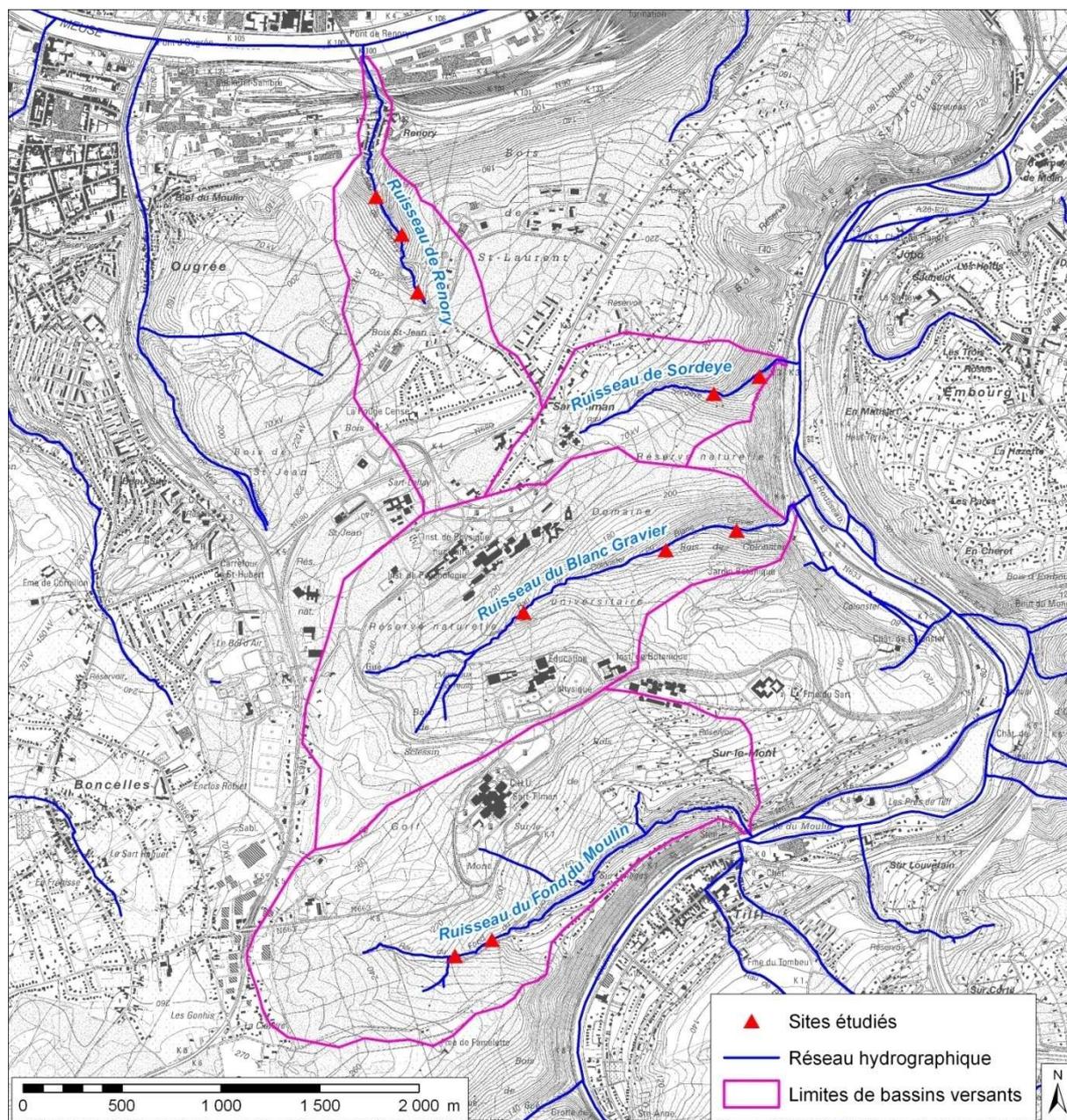


Figure 5-1 : Carte topographique générale du Sart Tilman

5 - 1 - 2. Caractéristiques des bassins versants

Les bassins versants étudiés (voir tableau 5-1) ont une superficie comprise entre 0,65 et 2,53 km². Leur pente moyenne est quant à elle comprise entre 6,6 % (ruisseau du Blanc Gravier) et 13,2 % (ruisseau de Sordeye). Le substratum géologique présente un grand nombre de plis, mais la nature des roches est similaire dans chaque sous-bassin. L'équipe n°2 de l'Unité d'Hydrogéologie et de Géologie de l'Environnement a décrit en détails le contexte tectonique et géologique. Les cartes géologiques présentées pour chaque sous-bassin sont de la figure 2-4 à la figure 2-7. Pour rappel, ces strates appartiennent à l'Emsien, inférieur (bancs puissants de quartzites gris ou verts et des schistes verts et lie de vin, associés à quelques niveaux de poudingue) ou supérieur (bancs de quartzites et de grès

verts, gris et bruns) selon la structure tectonique. Des lambeaux de terrasse sont apparents dans le bassin du ruisseau du Blanc Gravier.

L'affectation du sol diffère d'un bassin à l'autre. Outre la couverture forestière exclusive du bassin de Sordeye, le ruisseau du Fond du Moulin est forestier dans sa partie amont, comprend également le CHU et est fortement urbanisé dans sa partie aval. Le ruisseau y passe en pertuis successifs à proximité des habitations. Cette configuration a engendré de nombreux dégâts comme le présentent quelques photos de riverains. On peut noter que l'écoulement était maximal entre 10h et 10h30 (figure 5-2). Le débit n'était plus débordant dès 11h30 (figure 5-3).

Le ruisseau du Blanc Gravier est également forestier, mais intègre la majorité des bâtiments du campus. Les eaux de ruissellement sont collectées par un égout et dirigées par écoulement gravitaire vers la rive opposée de l'Ourthe via un siphon. D'après le conservateur du domaine, Luc Schmitz, le collecteur n'était pas en charge durant l'événement. Le ruisseau de Renory est composite : il comprend le parc d'activités du Pré Aily en amont, associé à deux bassins d'orage et le quartier résidentiel de la Rouge Cense, une zone forestière dans sa partie centrale et une zone urbanisée sur les 500 derniers mètres de son tracé. Les photos suivantes (figure 5-4) présentent les dégâts observés dans ce secteur suite à la crue éclair du 29 mai 2008.

Tableau 5-1 : Caractéristiques des cours d'eau et des bassins versants

<i>Bassin versant</i>	<i>Longueur max.</i>	<i>Altitude source</i>	<i>Altitude embouchure</i>	<i>Pente moyenne</i>	<i>Superficie</i>
	<i>(m)</i>	<i>(m)</i>	<i>(m)</i>	<i>(%)</i>	<i>(km²)</i>
Ruisseau du Fond du Moulin	1370	238	75	11,9	2,53
Ruisseau du Blanc Gravier	2455	240	78	6,6	2,51
Ruisseau de Renory	1437	200	60	9,7	1,18
Ruisseau de Sordeye	1138	225	75	13,2	0,65



Figure 5-2 : Partie urbanisée du ruisseau du Fond du Moulin (source : riverain, 29/05/2008, 10h11)



Figure 5-3 : Dépôt de blocs dans la vallée du ruisseau du Fond du Moulin (source : riverain, 29/05/2008, 12h41)



Figure 5-4 : Débordements sur la voirie au pied du versant du ruisseau de Renory (source : www.lameuse.be)

PARTIE 2 : Acquisition des données

5 - 2. Levés topographiques

5 - 2 - 1. Introduction

Dès l'été 2008, des levés topographiques ont été réalisés sur le terrain par le Laboratoire d'Hydrographie et de Géomorphologie fluviale dans chacun des sous-bassins affectés par les flash-floods. Il était nécessaire de lever le plus rapidement possible les éléments géomorphologiques qui permettent de reconstituer les paramètres de la crue tels que la hauteur d'eau atteinte, la largeur du chenal en crue et la pente de la ligne d'eau. Les laisses de crue qui matérialisent le niveau d'eau maximum atteint au cours de l'événement étaient bien visibles dans les sous-bassins de Renory, du Blanc Gravier, du Fond du Moulin et de Sordeye ; elles ne restent cependant visibles que quelques semaines. L'élimination de la couverture de feuilles et de débris végétaux par le courant d'eau a délimité précisément les niveaux atteints. Nous avons fait le choix de relever ces laisses de crue sur trois à quatre sites d'intérêt sur chacun des sous-bassins. Pour chaque site, 200 à 300 points ont été localisés en x,y,z en coordonnées locales, grâce à une station totale (Leica TC-600). Des repères ont été implantés dans les versants des ruisseaux afin de servir de points de contrôle temporaires pour les deux équipes chargées du levé topographique.

5 - 2 - 2. Raccord au système Lambert belge 1972

Après la mise en place d'un réseau de bornes géodésiques localisées précisément en x,y,z Lambert 72 par l'équipe n°3 du Laboratoire de Topographie et de Géométrie dans une partie des bassins versants, d'autres relevés géomorphologiques ont eu lieu afin de couvrir dans les secteurs où l'incision ou l'accumulation des dépôts ont été importantes. Les levés topographiques réalisés antérieurement ont pu être raccordés précisément au système Lambert belge 72 grâce au travail effectué par l'équipe n°3. La précision en x,y est d'1 à 2 cm tandis que la précision en z atteint 3 cm.

5 - 2 - 3. Levés topographiques, profils transversaux et longitudinaux

A partir des levés topographiques, plusieurs profils transversaux et longitudinaux ont été mesurés afin de déterminer les caractéristiques principales de chacun des cours d'eau lors de la crue (rayon et section hydrauliques, pente moyenne). Ces éléments permettent d'affiner l'estimation de la hauteur d'eau maximale atteinte, en complément des laisses de crue.

Chaque cours d'eau étudié comprend deux ou trois sites d'étude, généralement dans la partie amont, centrale et aval du tracé. Leur numérotation se fait d'aval en amont. Les figures suivantes résument la géométrie du thalweg, la position des laisses de crue sur les berges et les éléments géomorphologiques importants (incisions, racines apparentes, chocs sur les troncs d'arbres, ...) au niveau des sites étudiés.

Ce chapitre présente successivement le levé topographique et le profil longitudinal correspondant. Il est important de noter que les altitudes indiquées sur les profils longitudinaux sont exprimées en coordonnées locales et n'ont donc pas de lien absolu avec

les coordonnées Lambert 72, le réseau n'étant pas encore entièrement mis en place. Les translations seront effectuées par la suite.

5 - 2 - 3 - a. Ruisseau du Blanc Gravier

Le ruisseau du Blanc Gravier (de la figure 5-5 à la figure 5-11) est caractérisé par une pente de la ligne d'eau comprise entre 6 et 10%. Cette pente est d'autant plus importante que l'on remonte vers la source du cours d'eau. Les laisses de crue sont surtout visibles dans la partie amont du tracé. Au niveau du site aval, la zone de débordement se confond avec le chemin de promenade du domaine. Le niveau d'eau n'a donc pu être déterminé que sur la rive opposée. Le ruisseau du Blanc Gravier est caractérisé par de multiples embâcles et dépôts de blocs entre l'ancien canal de jaugeage et l'étang situé en aval.

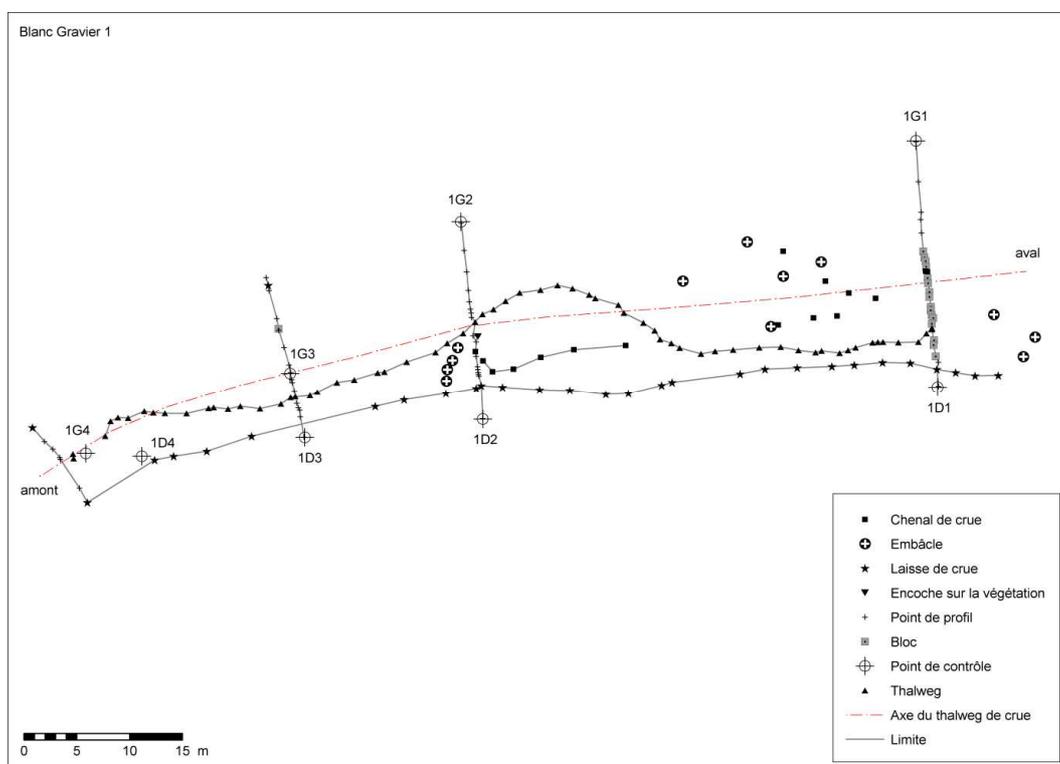


Figure 5-5 : Levé topographique du site aval du ruisseau du Blanc Gravier

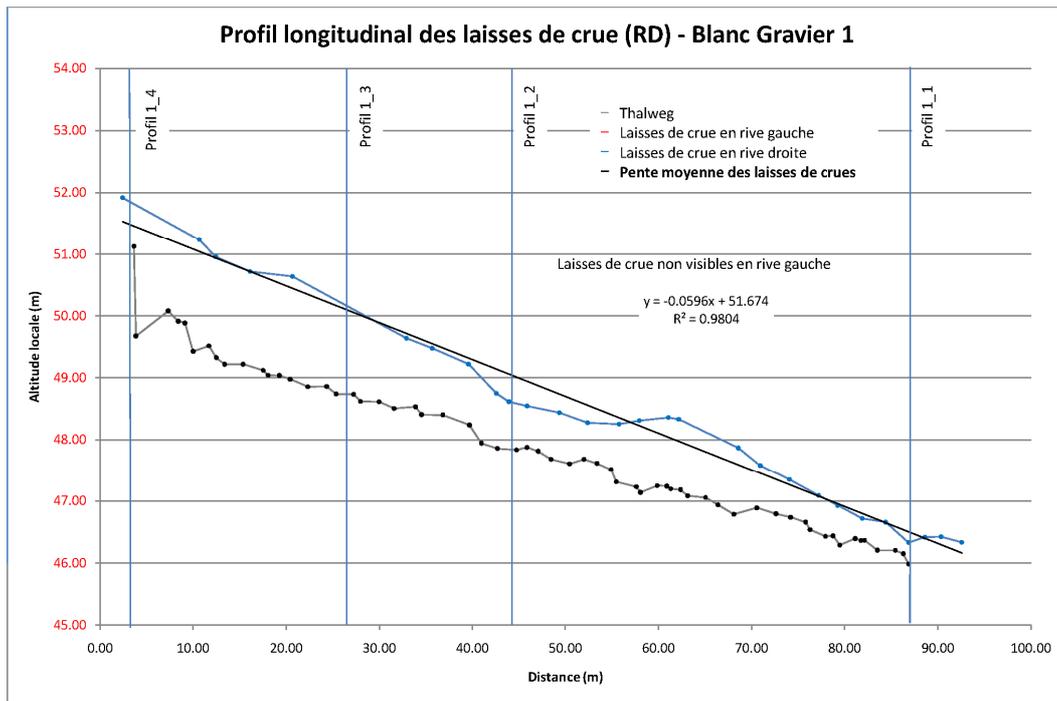


Figure 5-6 : Profil longitudinal du site aval du ruisseau du Blanc Gravier

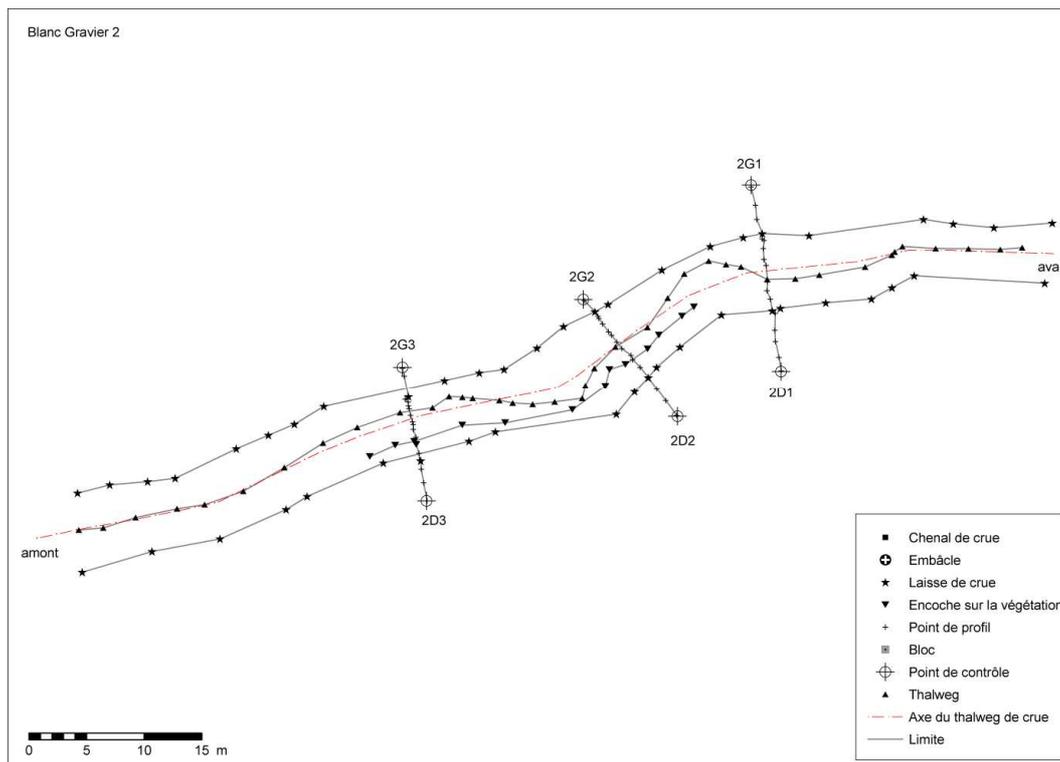


Figure 5-7 : Levé topographique du site central du ruisseau du Blanc Gravier

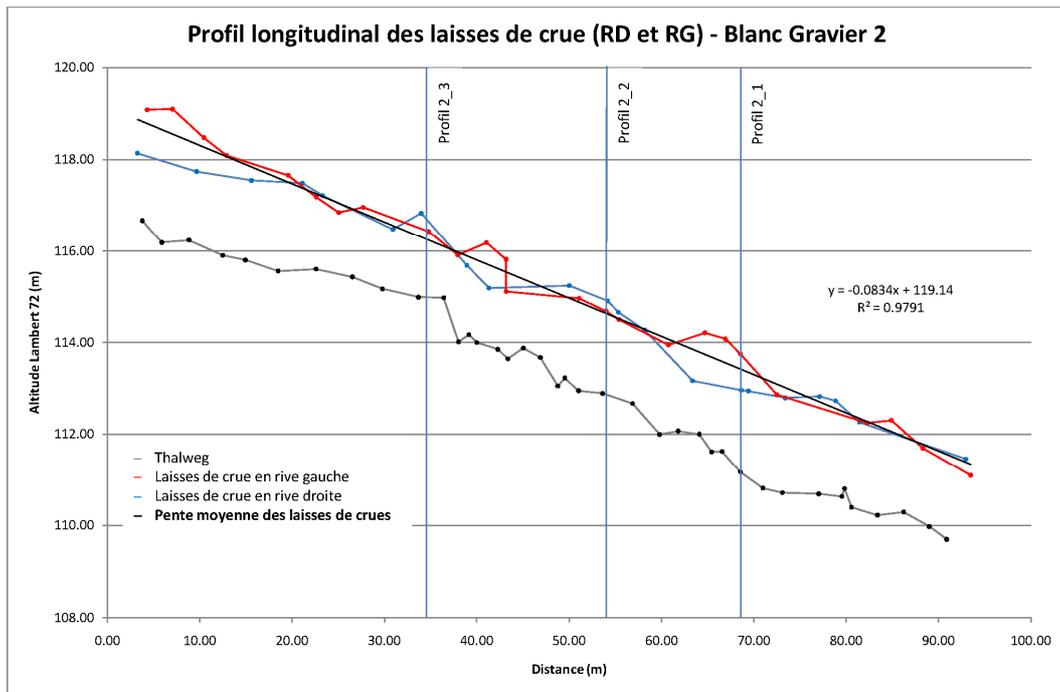


Figure 5-8 : Profil longitudinal du site central du ruisseau du Blanc Gravier

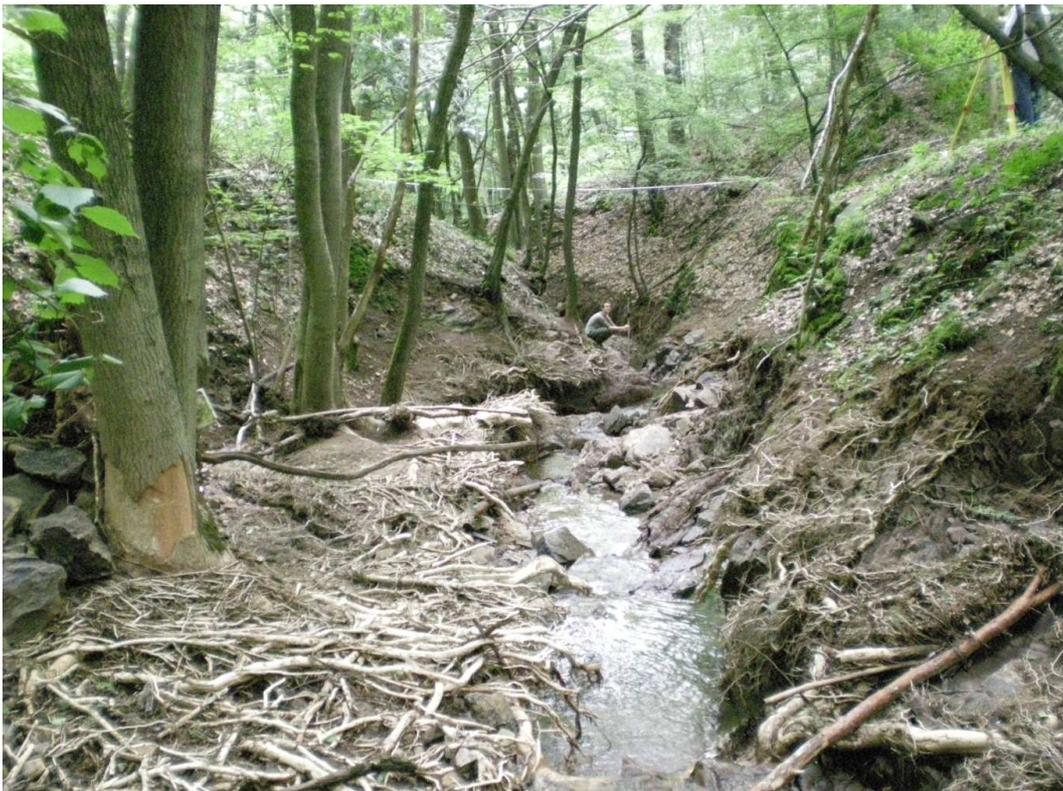


Figure 5-9 : Incision du substrat et mise à nu des racines au niveau du site amont du ruisseau du Blanc Gravier

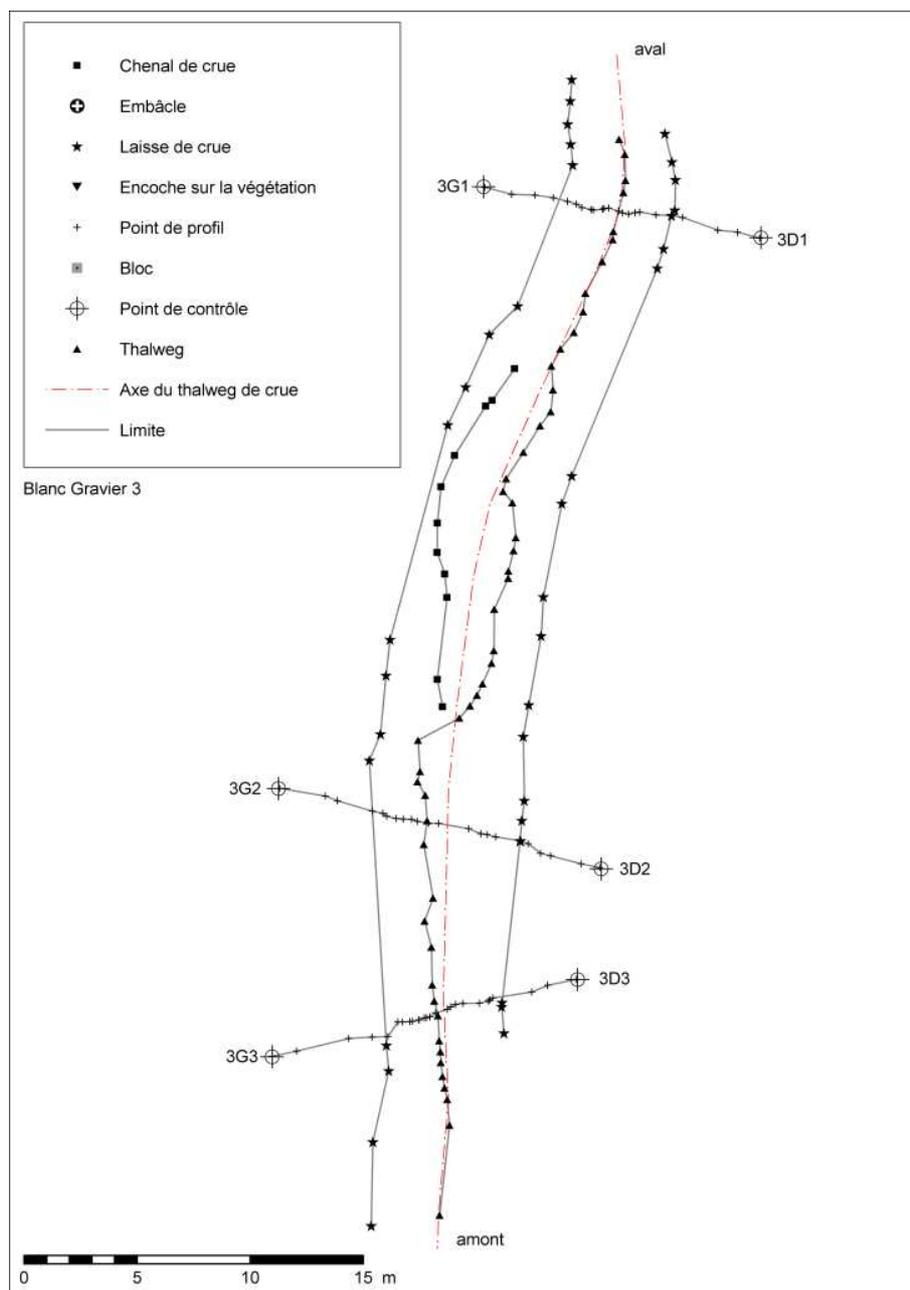


Figure 5-10 : Levé topographique du site amont du ruisseau du Blanc Gravier

La figure 5-9 met en évidence l'effet des débits de pointe sur le thalweg du cours d'eau. Les puissances développées par la crue ont engendré un décapage du sol et du substratum rocheux. L'incision du secteur BG2 sera mesurée au point 5 - 2 - 5.

La hauteur de la ligne d'eau indiquée sur chacun des profils longitudinaux est la hauteur maximale atteinte. Il est à ce stade impossible de savoir si l'incision s'est produite avant ou après que ce niveau d'eau maximal ait été atteint. La profondeur maximale d'eau en chaque point du thalweg ne peut être approchée que par sa valeur maximale. Il est probable que l'incision se soit produite au fur et à mesure de l'accroissement de débit et donc de puissance.

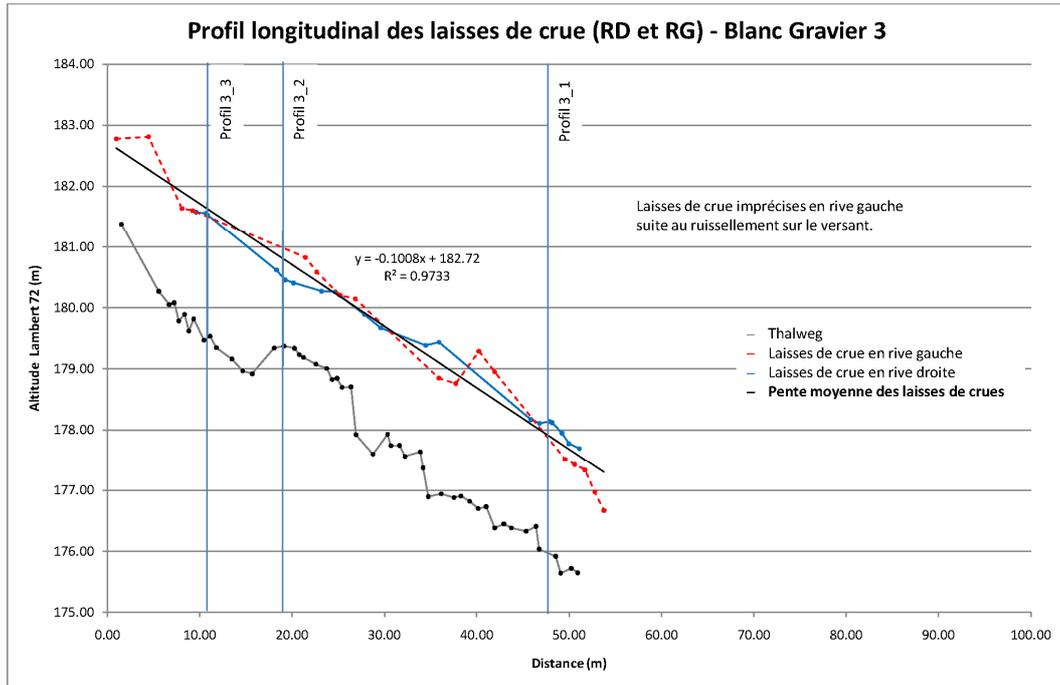


Figure 5-11 : Profil longitudinal du site amont du ruisseau du Blanc Gravier

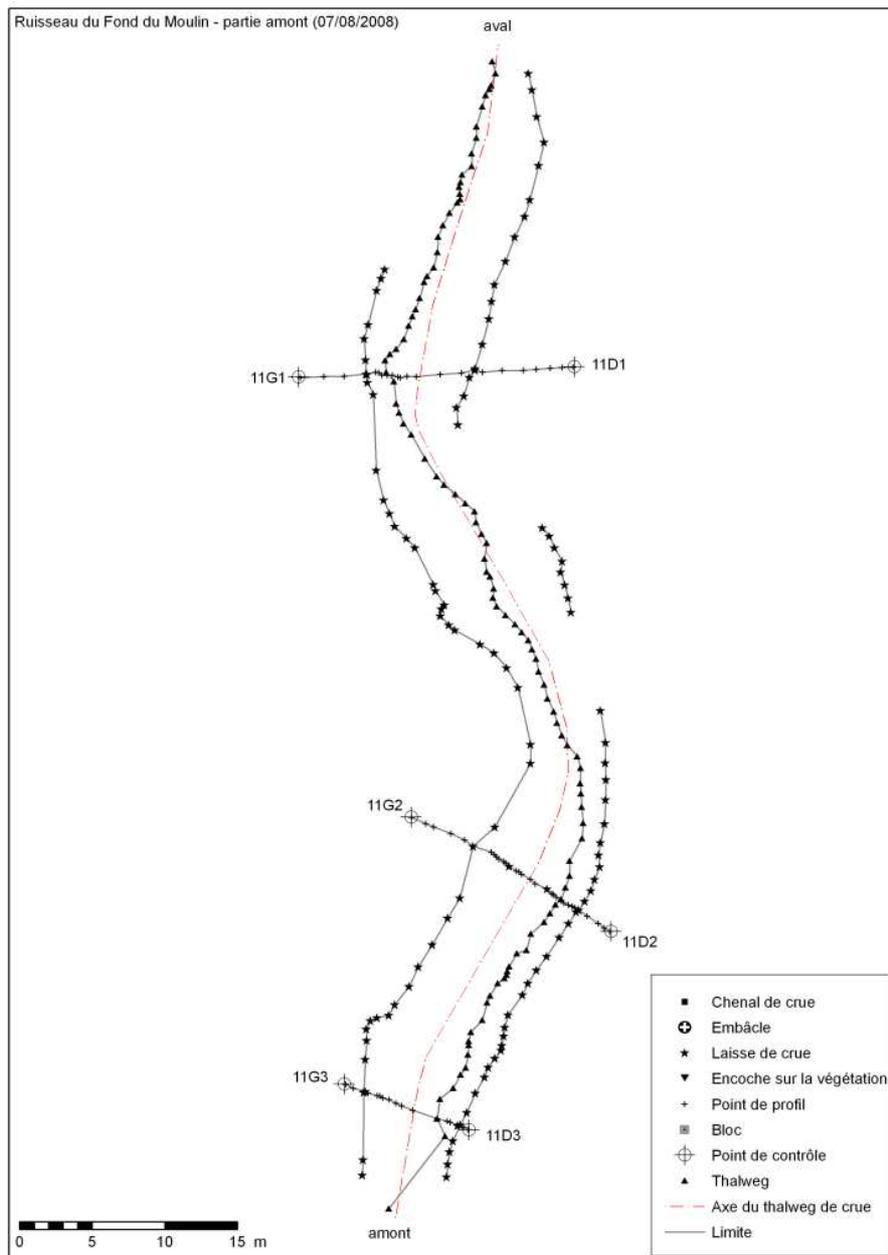
5 - 2 - 3 - b. Ruisseau du Fond du Moulin

Figure 5-12 : Levé topographique du site amont du ruisseau du Fond du Moulin

Le ruisseau du Fond du Moulin, dans la partie amont du tracé forestier (voir figure 5-12), est caractérisé par une pente de la ligne d'eau d'environ 6% (voir figure 5-13). Un ressaut dû au bedrock apparaît au niveau du profil 11-3.

Dans la partie aval, le tracé étudié propose deux secteurs rectilignes séparés par un méandre où un important dépôt de blocs s'est constitué en rive gauche (voir figure 5-14). La pente moyenne de la ligne d'eau diminue également d'amont en aval, elle est de l'ordre de 10% (voir figure 5-15).

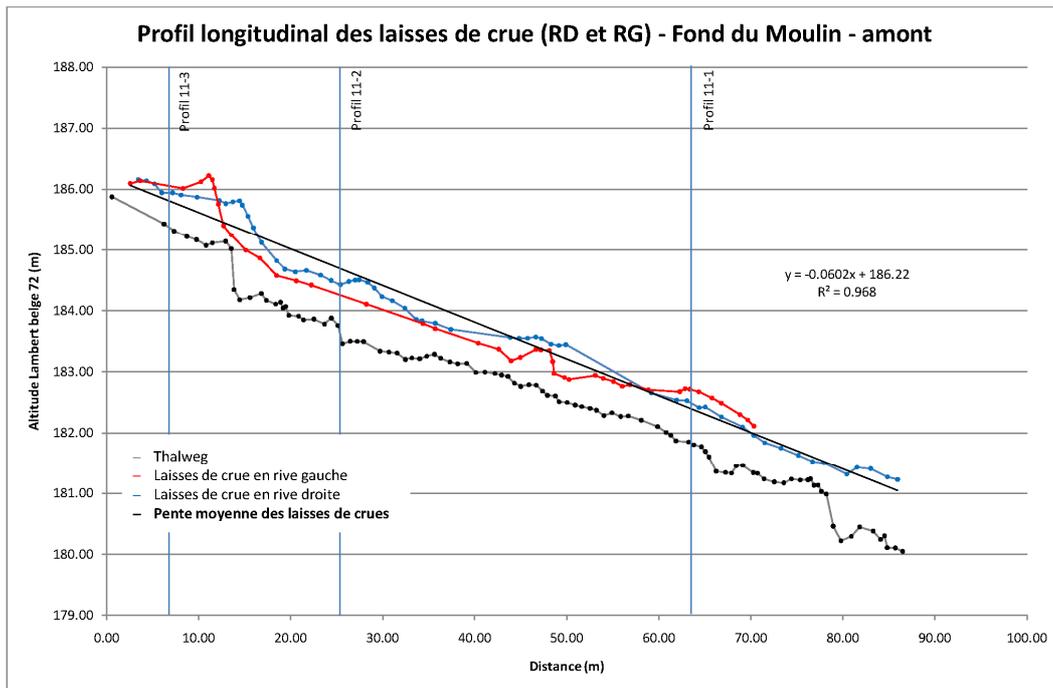


Figure 5-13 : Profil longitudinal du site amont du ruisseau du Fond du Moulin

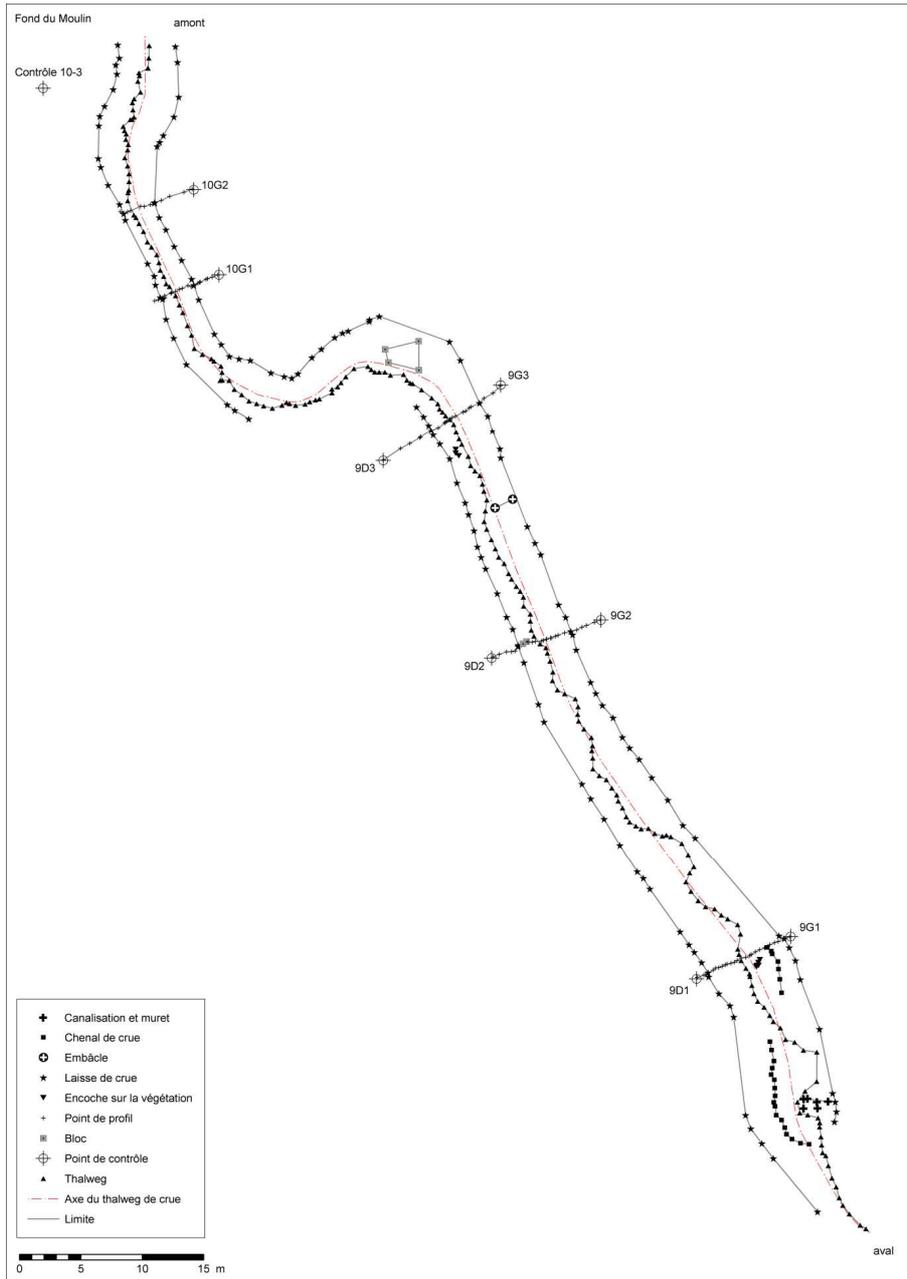


Figure 5-14 : Levé topographique du site aval du ruisseau du Fond du Moulin

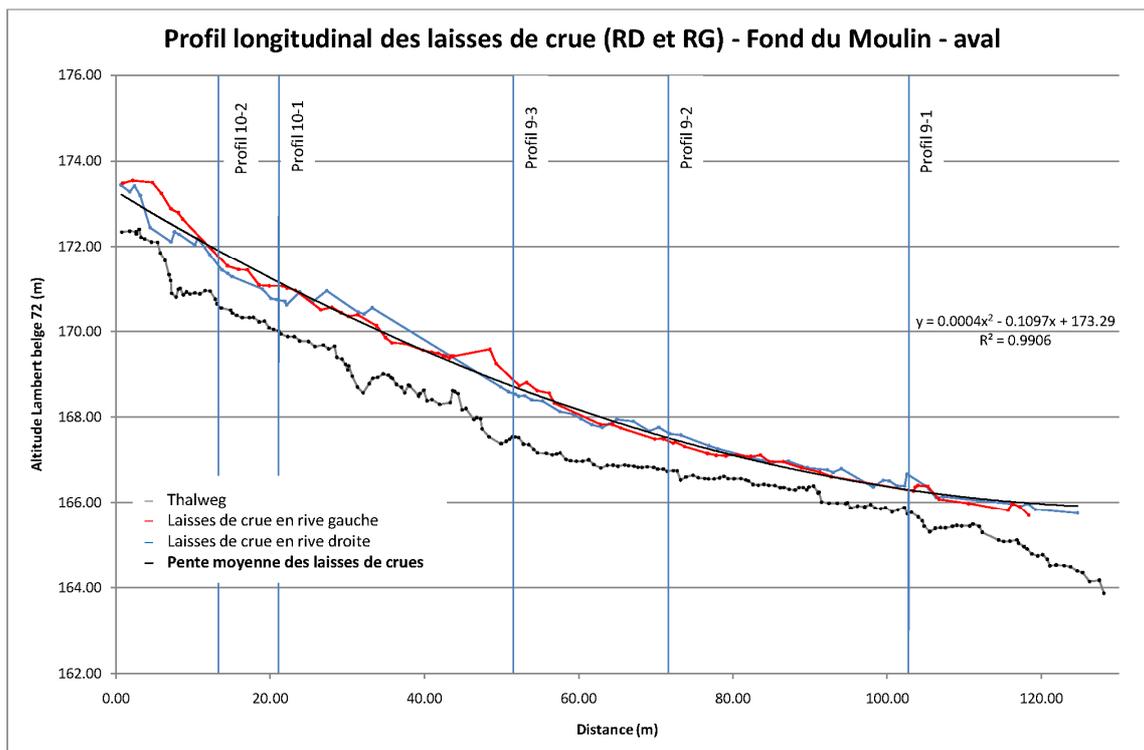


Figure 5-15 : Profil longitudinal du site aval du ruisseau du Fond du Moulin

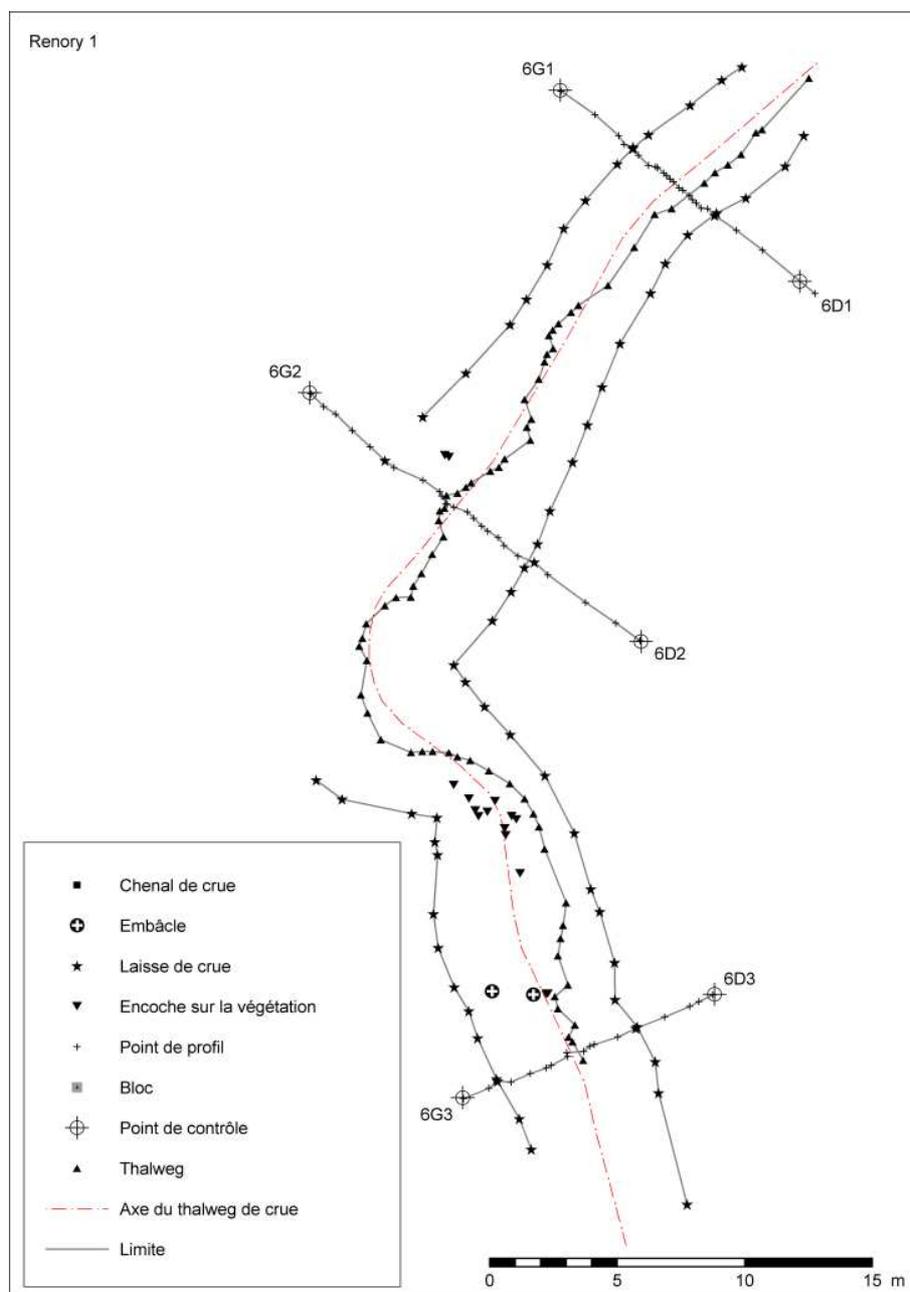
5 - 2 - 3 - c. Ruisseau de Renory

Figure 5-16 : Levé topographique du site aval du ruisseau de Renory

Trois sites ont été prospectés le long du ruisseau de Renory : deux tronçons situés en aval des bassins d'orage, un tronçon compris entre les deux bassins amont.

La pente de la ligne d'eau est comprise entre 10 et 13%. Le levé aval (voir figure 5-16 et suivante) présente de nombreuses encoches dans la végétation, synonymes des chocs de la charge de fond et des débris flottants sur les troncs et les racines. Au niveau du secteur central (voir figure 5-18 et suivante), la largeur du plan d'eau durant l'événement s'est fortement accrue. Deux chenaux annexes se sont créés, incisant le substrat original et

mettant à nu de nombreuses racines. Un affleurement rocheux (profil 7D1-7G1), perpendiculaire au thalweg, barre surtout la rive droite et modifie la hauteur du plan d'eau par déversement (voir figure 5-19).

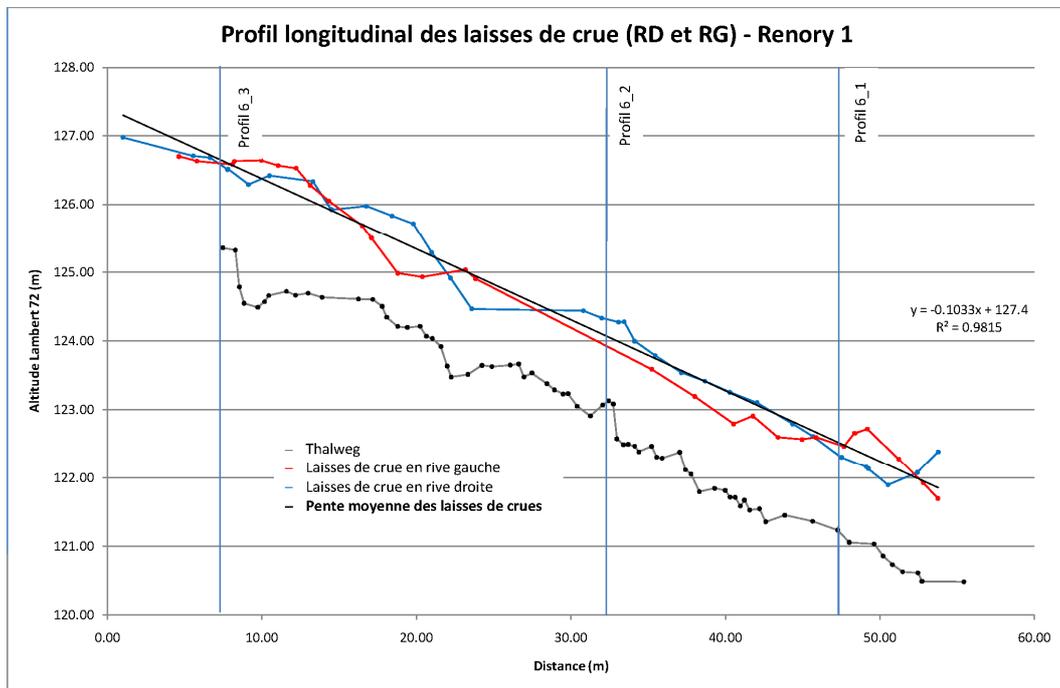


Figure 5-17 : Profil longitudinal du site aval du ruisseau de Renory

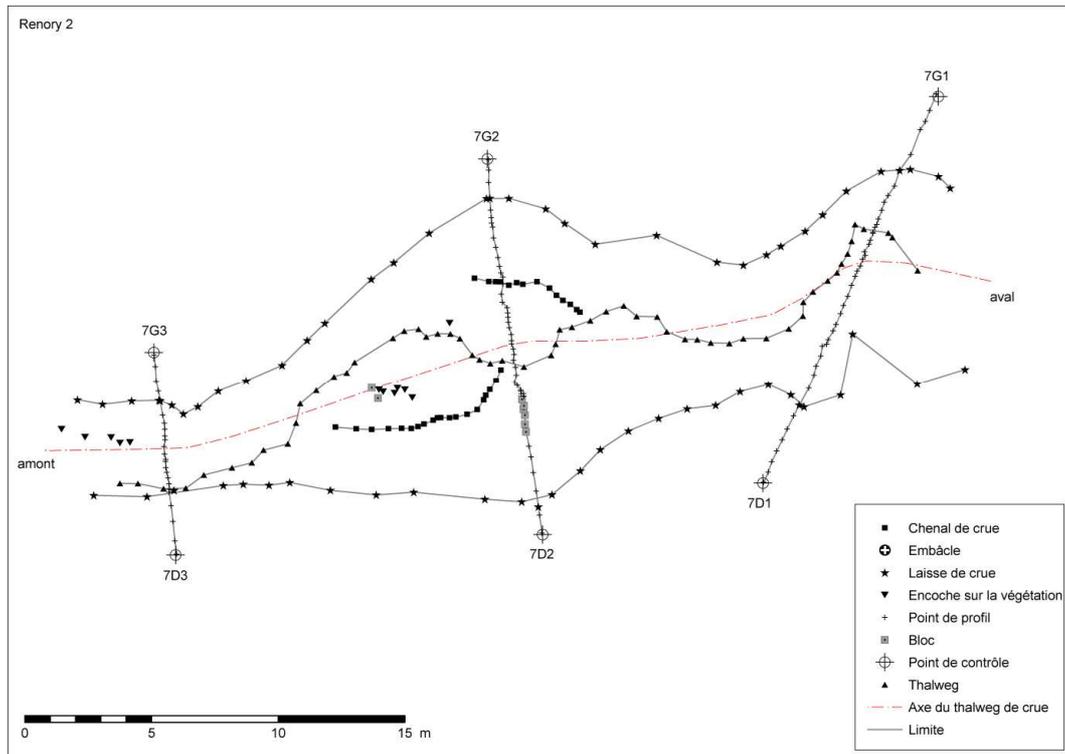


Figure 5-18 : Levé topographique du site central du ruisseau de Renory

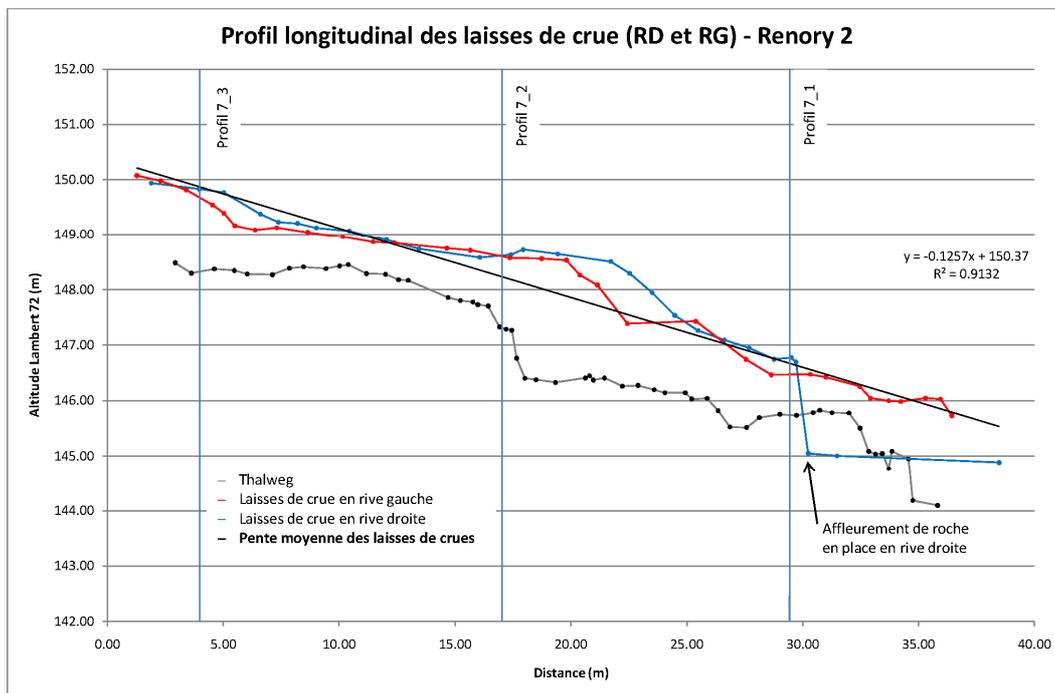


Figure 5-19 : Profil longitudinal du site central du ruisseau de Renory



Figure 5-20 : Incision au niveau du site central du ruisseau de Renory

La figure 5-20 montre une incision de plus d'un mètre de profondeur au niveau du profil 7-2. On peut reconstituer approximativement l'allure de la plaine alluviale avant la crue en prolongeant virtuellement le sol. La forme originale de la vallée, dont tout indice a été effacé par l'évacuation des matériaux, reste cependant inconnue.

La profondeur de l'incision est ici de l'ordre du mètre et la largeur incisée est d'environ 3 mètres. On estime dans ce cas l'érosion à 3 m^3 par mètre linéaire. Cependant, nous ne pouvons extrapoler cette valeur à l'ensemble du tracé, l'incision varie fortement d'un secteur à l'autre. Il s'agit ici d'une valeur maximale sur un tronçon très affecté par ce phénomène, sur un substrat meuble constitué de dépôts de pente.

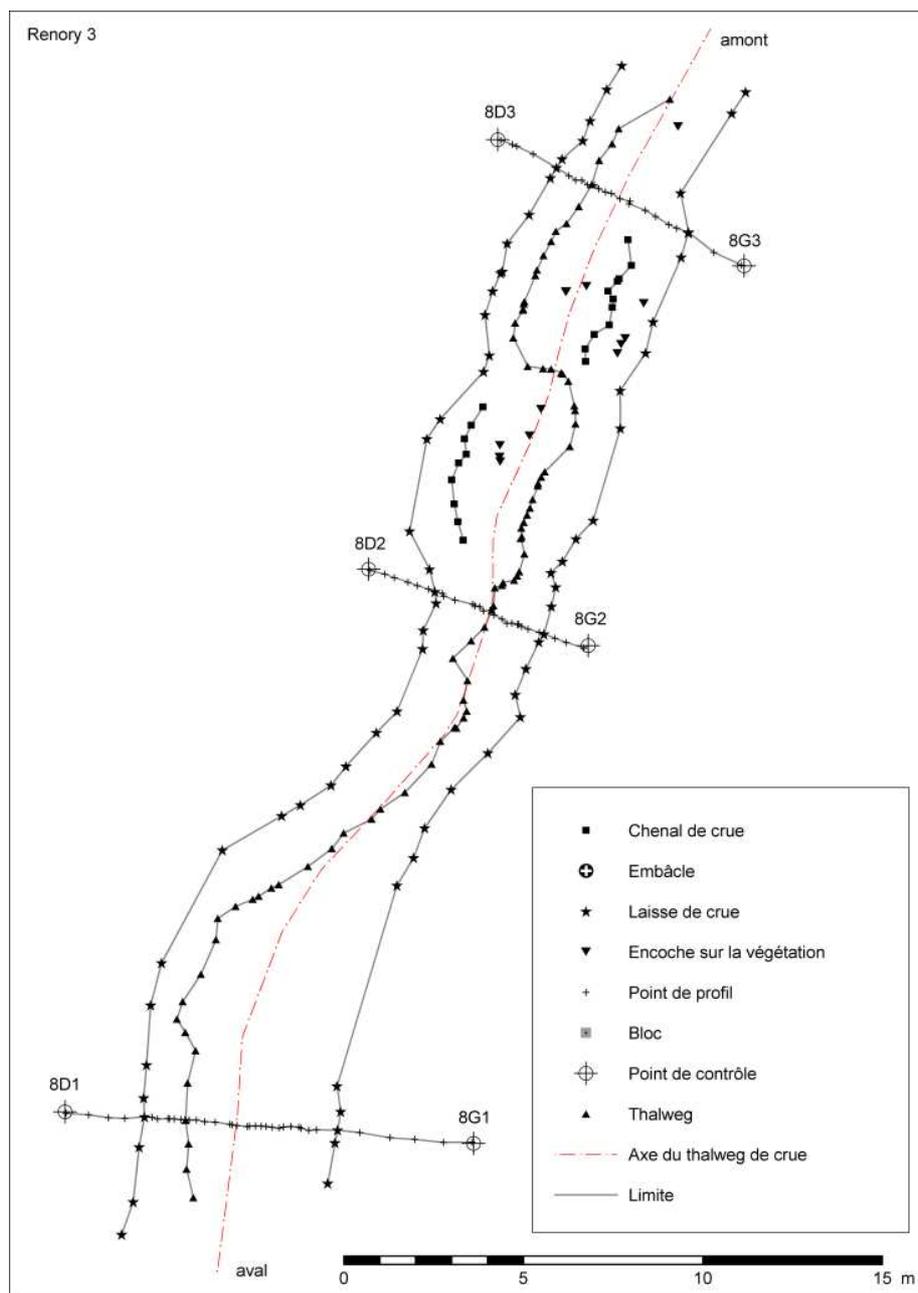


Figure 5-21 : Levé topographique du site amont du ruisseau de Renory

Le site amont du ruisseau de Renory est également significatif de l'érosion et de l'incision qui ont affecté les cours d'eau du Sart Tilman. Deux chenaux de crue se sont développés en marge du thalweg initial. De nombreuses racines et encoches dans la végétation permettront de reconstituer la situation avant la crue et d'estimer le volume de substrat transporté.

La hauteur d'eau enregistrée sur ce secteur a atteint plus de 1,5 m, comme l'indique la figure 5-23.



Figure 5-22 : Incision visible dans le secteur amont du ruisseau de Renory

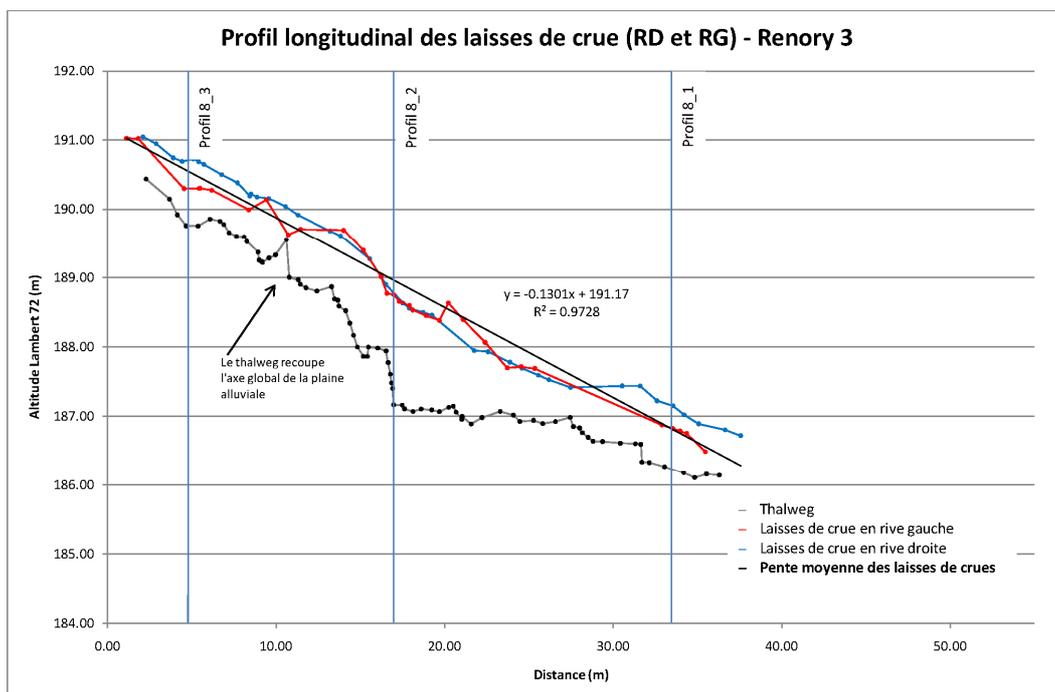


Figure 5-23 : Profil longitudinal du site amont du ruisseau de Renory

5 - 2 - 3 - d. Données complémentaires et analyse des résultats communs aux différents cours d'eau

Parallèlement aux trois ruisseaux déjà présentés, des levés topographiques ont été réalisés sur le ruisseau de Sordeye, dont le bassin versant est exclusivement forestier et qui débouche sur la rue de Tilff (N633). Les sites amont et aval du ruisseau de Sordeye (de la figure 5-24 à la figure 5-28) sont caractérisés par des vallées en V très incisées dans le substratum emsien. Au niveau du site amont, la stratification est parallèle à l'axe du thalweg. En aval, la stratification recoupe en oblique l'axe de la vallée. Des photos réalisées avant et après la crue par le conservateur du domaine permettent de mettre en évidence l'évolution du site (voir figure 5-26) avec une légère incision du bedrock. La pente de la ligne d'eau en amont atteint 16%. En aval, cette pente est d'environ 11%.

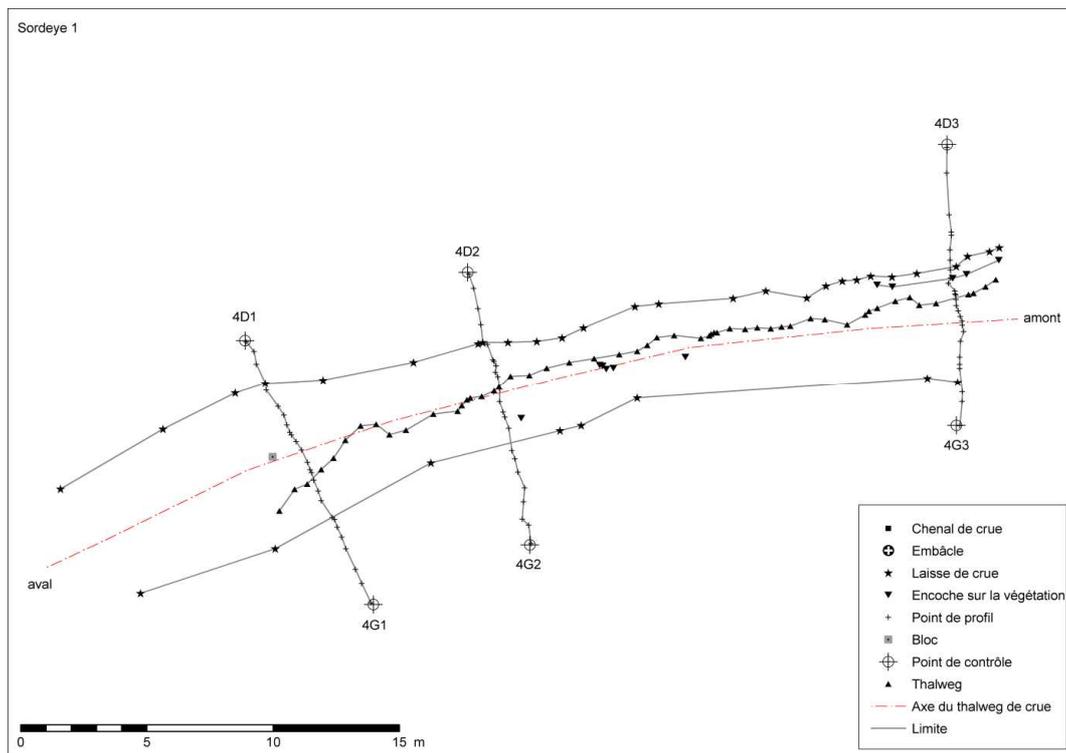


Figure 5-24 : Levé topographique du site aval du ruisseau de Sordeye

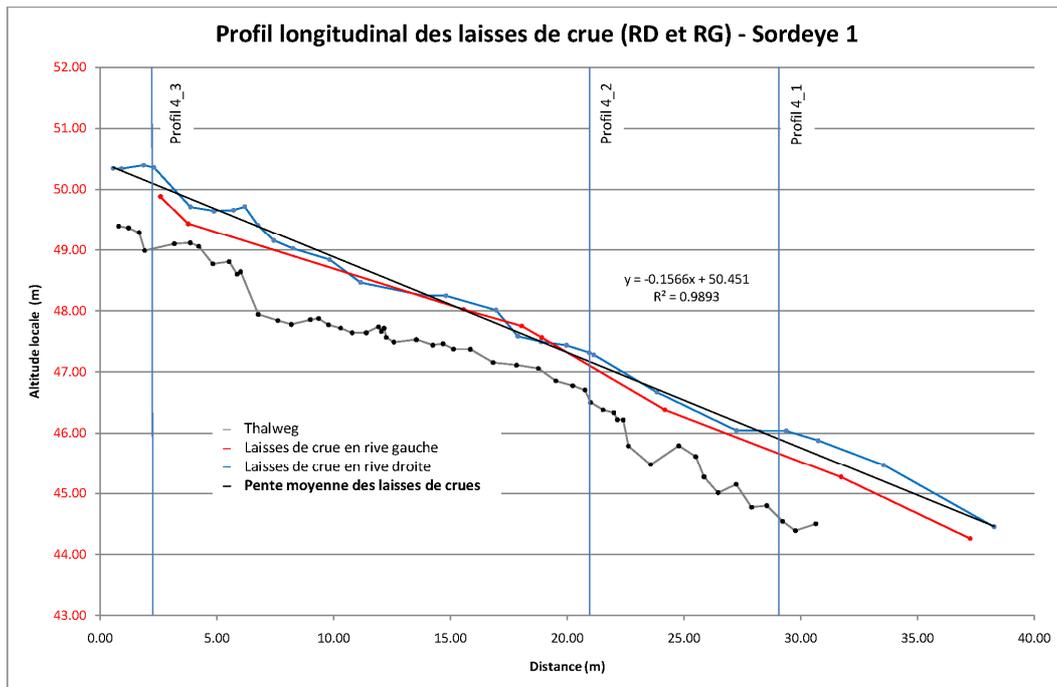


Figure 5-25 : Profil longitudinal du site aval du ruisseau de Sordeye



Figure 5-26 : Evolution du site aval du ruisseau de Sordeye (source : L. Schmitz)

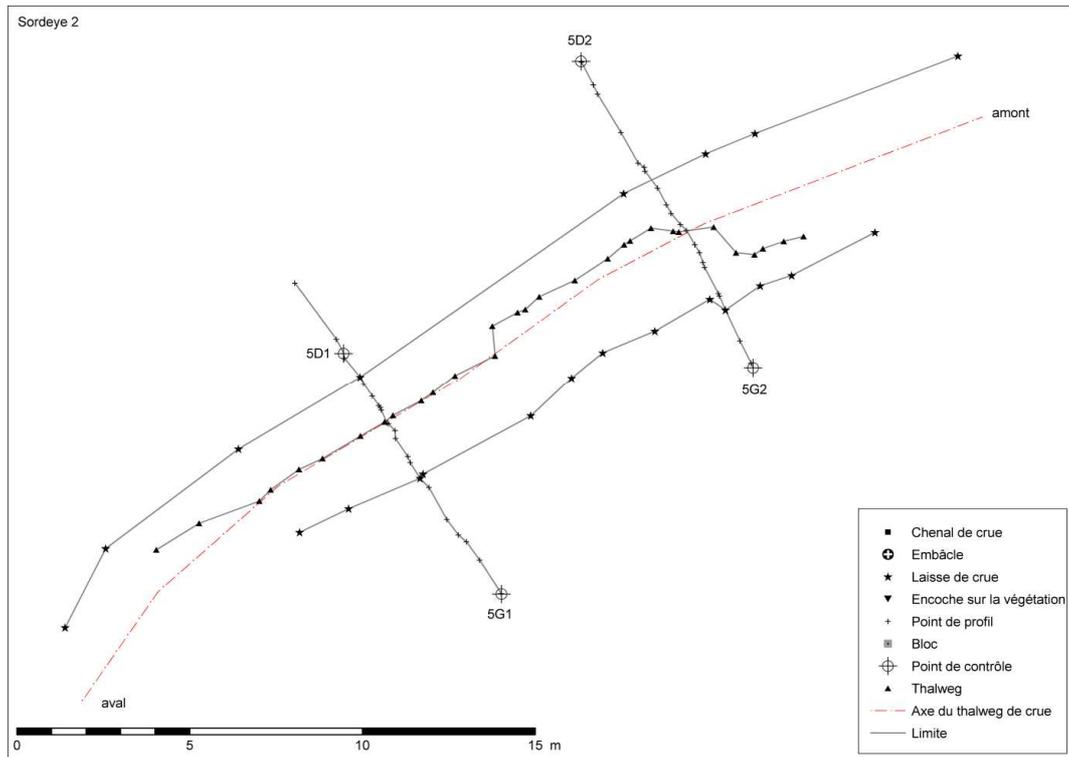


Figure 5-27 : Levé topographique du site amont du ruisseau de Sordeye

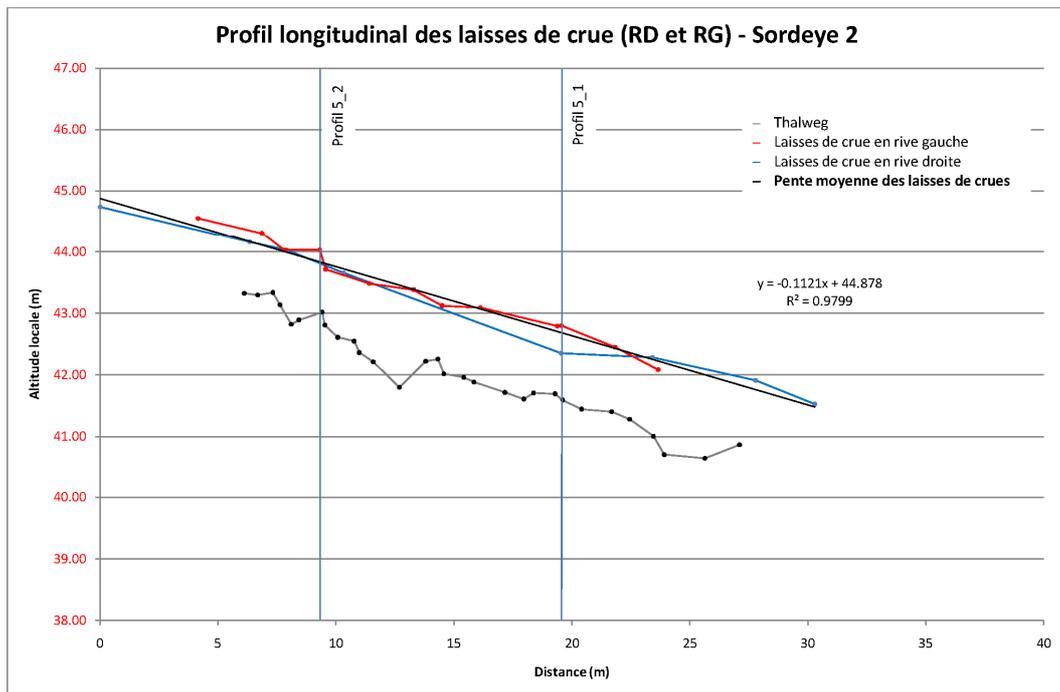


Figure 5-28 : Profil longitudinal du site amont du ruisseau de Sordeye

Les perspectives de travail sur ces levés topographiques se limitent maintenant à une étude complémentaire des secteurs situés entre les tronçons étudiés. La hauteur d'eau ne peut plus y être relevée, étant donné l'effacement des laisses de crues. Cependant, l'incision peut encore être définie tant que les rejets végétaux n'ont pas recolonisé complètement les racines mises à nu.

5 - 2 - 4. Estimation des débits et des puissances

Le tableau 5-2 reprend l'ensemble des paramètres des profils étudiés et présentés au point précédent. En définissant un coefficient de rugosité adéquat, le débit peut être estimé. Ce coefficient dépend de la présence de roche en place, de végétation ou d'autres obstacles à l'écoulement.

Tableau 5-2 : Récapitulatif des caractéristiques des profils transversaux, des vitesses, débits et puissances

Localisation	Profil n°	Section totale (m ²)	Périmètre total (m)	Rayon hydraulique (m)	n Manning	Pente locale (m/m)	Vitesse max. (m/s)	Débit max. (m ³ /s)	Puissance max. (W/m ²)
Ruisseau du Blanc Gravier (aval)	1_1	2,51	13,63	0,18	0,06	0,0361	1,03	2,6	145
	1_2	3,06	9,57	0,32	0,06	0,0736	2,11	6,5	361
	1_3	12,12	15,34	0,79	0,06	0,0681	3,72	45,1	1728
	1_4	2,52	6,00	0,42	0,06	0,092	2,83	7,1	607
Ruisseau du Blanc Gravier (central)	2_1	7,26	8,59	0,84	0,06	0,0835	4,30	31,2	4329
	2_2	9,51	9,02	1,05	0,06	0,0704	4,58	43,5	5383
	2_3	6,61	7,43	0,89	0,06	0,0846	4,48	29,6	4254
Ruisseau du Blanc Gravier (amont)	3_1	4,88	6,90	0,71	0,06	0,1402	4,95	24,2	4228
	3_2	7,26	8,49	0,86	0,06	0,0812	4,28	31,1	4626
	3_3	5,97	7,40	0,81	0,06	0,063	3,63	21,7	5531
Ruisseau de Sordeye (aval)	4_1	4,86	8,35	0,58	0,06	0,0977	3,63	17,6	4952
	4_2	1,57	4,54	0,35	0,06	0,2012	3,68	5,8	1857
	4_3	1,79	5,78	0,31	0,06	0,1844	3,27	5,8	1949
Ruisseau de Sordeye (amont)	5_1	1,92	4,36	0,44	0,06	0,1118	3,22	6,2	2401
	5_2	3,27	5,93	0,55	0,06	0,1344	4,11	13,4	2898
Ruisseau de Renory (aval)	6_1	3,44	5,40	0,64	0,06	0,1017	3,93	13,5	3637
	6_2	3,87	9,05	0,43	0,06	0,1617	3,80	14,7	1986
	6_3	4,29	7,06	0,61	0,06	0,0355	2,25	9,7	2891
Ruisseau de Renory (central)	7_1	4,73	12,31	0,38	0,06	0,0406	1,78	8,4	1787
	7_2	10,91	14,93	0,73	0,06	0,1077	4,44	48,4	5182
	7_3	2,71	5,29	0,51	0,06	0,1629	4,31	11,7	3537
Ruisseau de Renory (amont)	8_1	2,26	6,34	0,36	0,06	0,1353	3,08	7,0	1674
	8_2	2,95	5,30	0,56	0,06	0,1603	4,51	13,3	4686
	8_3	1,56	4,79	0,33	0,06	0,1357	2,91	4,5	1566
Ruisseau du Fond du Moulin (aval)	9_1	3,20	7,22	0,44	0,06	0,0341	1,79	5,7	686
	9_2	2,44	5,69	0,43	0,06	0,0435	1,98	4,8	635
	9_3	3,29	5,42	0,61	0,06	0,0802	3,38	11,1	1426
	10_1	1,85	3,81	0,49	0,06	0,0582	2,49	4,6	961
	10_2	1,54	3,58	0,43	0,06	0,1472	3,64	5,6	1229
Ruisseau du Fond du Moulin (amont)	11_1	2,34	7,95	0,29	0,06	0,0602	1,81	4,2	337
	11_2	2,04	6,23	0,33	0,06	0,0602	1,95	4,0	453
	11_3	1,33	7,08	0,19	0,06	0,0602	1,34	1,8	154

La vitesse, le débit et la puissance indiqués ici sont des valeurs maximales (incertitude sur la hauteur d'eau).

On peut aisément constater que le débit maximum ayant pu être atteint dépasse localement plusieurs dizaines de m³/s. Les débits maximaux moyens obtenus sont les suivants :

- Ruisseau du Blanc Gravier : 24,3 m³/s
- Ruisseau de Renory : 14,6 m³/s
- Ruisseau de Sordeye : 9,8 m³/s
- Ruisseau du Fond du Moulin : 5,2 m³/s

En l'absence de station limnigraphique dans ces sous-bassins, il est difficile de valider ces valeurs. Cependant, des estimations avaient été réalisées dans le cadre des cahiers du Sart Tilman, dans le bassin du Blanc Gravier. Le débit de crue extrême estimé par la méthode du Service de Conservation des Sols des USA au niveau de l'exutoire du ruisseau du Blanc Gravier est de 25 m³/s (BV : 2,41 km²) (Université de Liège, 1965). Cette valeur est très proche des résultats obtenus par l'étude hydraulique des profils transversaux et longitudinaux.

D'autres méthodes d'estimation de la crue maximale observable existent dans la littérature. Nous citerons notamment la méthode des courbes-enveloppes de Francou-Rodier (1967). *A partir des crues maximales observées lors des deux derniers siècles sur 1400 bassins répartis dans le monde, et ayant des superficies dans la fourchette 10² à 10⁶ km², Francou et Rodier ont établi la courbe-enveloppe dont la formulation est la suivante :*

$$\frac{Q}{Q_0} = \left(\frac{S}{S_0}\right)^{4-\frac{k}{10}}$$

où : Q : débit de pointe de la crue (en m³/s) ;
 S : superficie du bassin versant (en km²) ;
 $Q_0 = 10^6$ et $S_0 = 10^8$.

Le paramètre k est un paramètre régionalisé : il varie en France de 5,5 (zone méditerranéenne) à 3,5 (zone océanique du nord de la France). S'agissant de l'enveloppe des crues maximales observées, ces estimations de débit ne sont pas affectées d'une fréquence d'apparition. Les auteurs indiquent cependant qu'une bonne partie des points qui ont servi à paramétrer k , correspondent à une période de retour de 100 ans (extrait de Lang M. et Lavabre J., 2007).

L'utilisation de cette formule, avec un paramètre $k = 3,5$ sur les bassins étudiés dans le cadre de cette convention donne les résultats présentés au tableau 5-3.

Ces débits sont estimés à l'exutoire des bassins hydrographiques. On observe une bonne corrélation entre les débits calculés par ce biais et les débits issus de nos observations de terrain en ce qui concerne le ruisseau du Blanc Gravier, le ruisseau de Renory et le ruisseau de Sordeye. La zone urbaine du ruisseau du Fond du Moulin n'étant pas prise en compte dans notre estimation, le débit en zone forestière est égal à 13,9 m³/s ($S = 0,98$ km²). Le débit estimé par la méthode des profils est nettement moindre (5,2 m³/s). La présence d'une canalisation ayant opéré en charge au niveau du tronçon forestier a sans doute perturbé l'écoulement à ce niveau.

Tableau 5-3 : Estimation de la crue maximale à l'exutoire selon Francou et Rodier, 1967.

Bassins versants	Surface (km ²)	Q max. (m ³ /s)
Ruisseau du Blanc Gravier	2,51	25,7
Ruisseau de Renory	1,18	15,7
Ruisseau de Sordeye	0,65	10,7
Ruisseau du Fond du Moulin	2,53	25,8

Par ailleurs, parmi les vidéos de l'événement, le flux d'eau a pu être observé dans la zone urbanisée du ruisseau du Fond du Moulin. A partir des éléments visibles sur cette vidéo, la vitesse du courant et la hauteur d'eau atteinte ont pu être estimées. Le débit transitant sur la voirie au pied du ruisseau du Fond du Moulin est de l'ordre de 12 m³/s. La valeur estimée dans le tronçon forestier amont (5,2 m³/s) est compatible avec ce dernier résultat, mais semble trop faible par rapport à l'estimation du tableau 5-3. La difficulté de mesurer la vitesse du flux torrentiel sur une vidéo est probablement à l'origine de cette différence.

Enfin, la puissance développée par cette crue dans chacun des sous-bassins est généralement supérieure à plusieurs kW/m². Cette intensité importante a permis le transport de blocs de plus de 70 cm. Des compléments d'informations au sujet de l'organisation et de la granulométrie des dépôts seront apportés au paragraphe 5 - 3.

5 - 2 - 5. Phénomène d'incision

Nous avons déjà présenté d'autres éléments géomorphologiques, qui ont également été relevés sur le terrain. Il s'agit des encoches visibles sur les arbres présents dans la plaine alluviale. Ces encoches sont liées aux chocs qui peuvent se produire entre la charge de fond et la végétation au niveau du sol ou entre les bois flottants et les arbres en place. L'épaisseur de la couche de charriage et/ou la profondeur d'eau atteinte peuvent ainsi être déduites de la même manière, selon la répartition spatiale et verticale des encoches. On distingue généralement deux zones d'impacts, une zone basse constituée d'impacts de galets, une zone haute correspondant à des chocs de bois flottants. Ces encoches sont bien entendu positionnées préférentiellement sur le flanc amont des troncs impactés. En outre, nous avons déjà mentionné que de nombreuses racines avaient été mises à jour par l'incision. Certains secteurs sont plus touchés que d'autres. Les sites dont le substrat était constitué de matériaux meubles ont été beaucoup plus incisés que les secteurs où le bedrock affleure. Des chemins creux adjacents aux cours d'eau ont parfois servi de collecteur d'eau de ruissellement et se sont incisés d'environ 50 cm, dans un substrat généralement meuble, constitué de dépôts de pente (colluvions). Ce chapitre aborde, sur un site test (Blanc Gravier, secteur central), l'estimation du volume de sol incisé, par l'intermédiaire du levé topographique des racines dégagées (représentant l'emplacement du sol avant incision) et l'altitude du thalweg après incision. Notons que ces valeurs sont approximatives. Une densité de points très importante serait nécessaire afin de reconstituer avec une grande précision et d'un point de vue tridimensionnel la plaine alluviale.

Un modèle 3D (TIN) a été créé à partir des points constituant les berges (laisses de crues, points mesurés sur le versant) et le thalweg. Un plan passant par les points relatifs aux racines qui ont été mises à jour a également été défini. La différence d'altitude entre ce plan

et la topographie du site donne en chaque point l'épaisseur du substrat érodé. Ceci ne tient pas compte de l'éventuel encaissement du ruisseau avant la crue. Le volume est dès lors probablement légèrement surestimé.

La figure 5-29 montre les résultats obtenus sur un tronçon de 21,4 m de long. Le volume érodé atteint 35 m³. L'incision a donc été au maximum de 1,65 m³/m linéaire de cours d'eau sur le site central du ruisseau du Blanc Gravier. Une simple multiplication sur l'ensemble du tracé du Blanc Gravier conduirait à un volume de 4000 m³ incisés, mais il s'agit d'une grossière approximation étant donné l'hétérogénéité du tracé et de l'importance de l'incision.

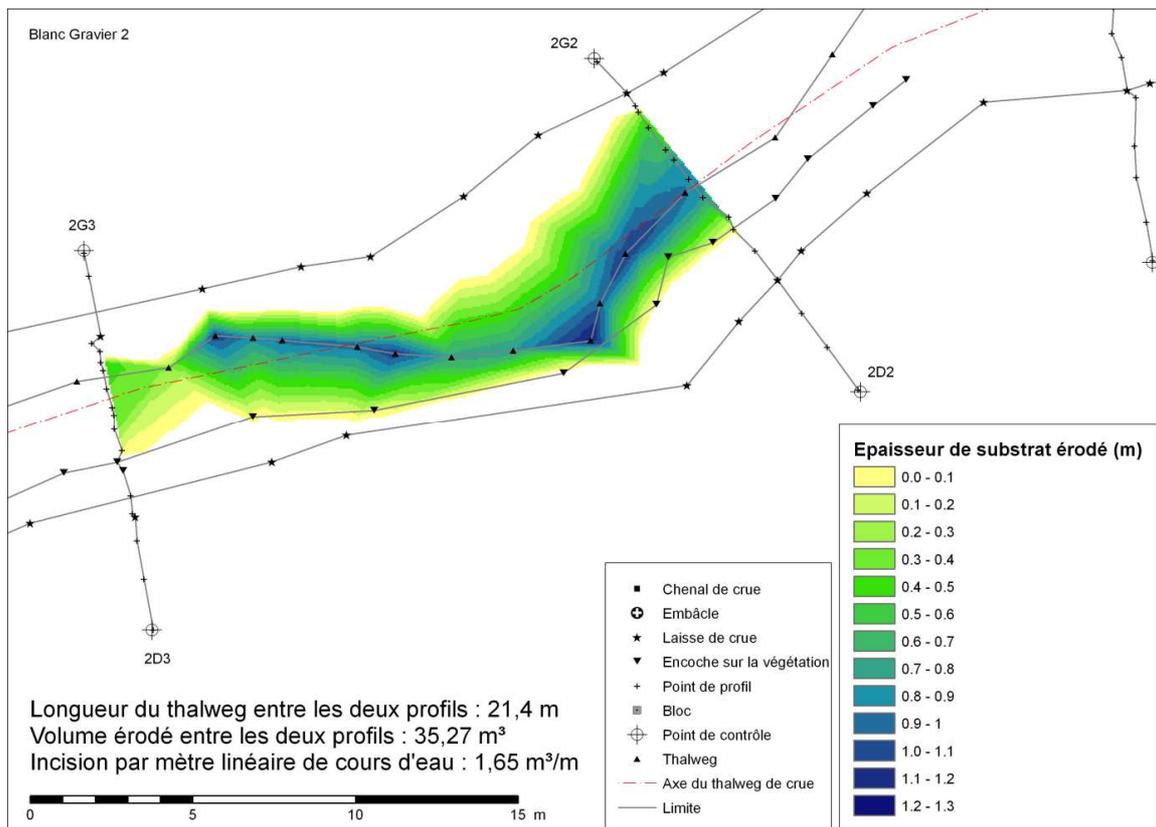


Figure 5-29 : Estimation du volume de substrat érodé entre deux profils du site central du Blanc Gravier

5 - 3. Aspects granulométriques et sédimentologiques

5 - 3 - 1. Granulométrie des dépôts

L'épisode de flash-floods a entraîné une mobilisation massive des éléments constituant le lit des ruisseaux. Les observations de terrain ont permis de relever de nombreux dépôts de blocs parfois pluri-décimétriques mis en place lors de cet événement.

Afin d'apprécier la taille du matériau mobilisé lors des flash-floods, des mesures ont été réalisées au niveau des différents sites étudiés. La taille des éléments les plus grossiers de chaque site a été caractérisée suivant trois dimensions perpendiculaires : la longueur (axe a), la largeur (axe b) et l'épaisseur (axe c). Afin de s'assurer de ne prendre en compte que des blocs mobilisés, les mesures se sont limitées aux blocs montrant des indices de mobilisation : la présence de débris végétaux récents coincés sous les blocs (voir figure 5-30), les éléments en position instable, ou ceux inclus dans des dépôts récents.



Figure 5-30 : Blocs déposés sur des végétaux, ruisseau de Sordeye (source : LHGF)

De plus, une granulométrie linéaire (technique Wolman, 1954 consistant à mesurer l'axe b de 100 blocs à intervalle régulier le long d'un guide) a été effectuée sur des dépôts présents dans ces secteurs de ruisseaux. De cette façon, une courbe granulométrique a été établie pour chaque site. Un exemple de dépôt échantillonné est présenté à la figure 5-31.



Figure 5-31 : Granulométrie Wolman réalisée dans le secteur aval du ruisseau du Blanc Gravier (source : LHGF)

La figure 5-32 reprend la courbe granulométrique et les indices correspondants mesurés au niveau du site amont du ruisseau du Blanc Gravier.

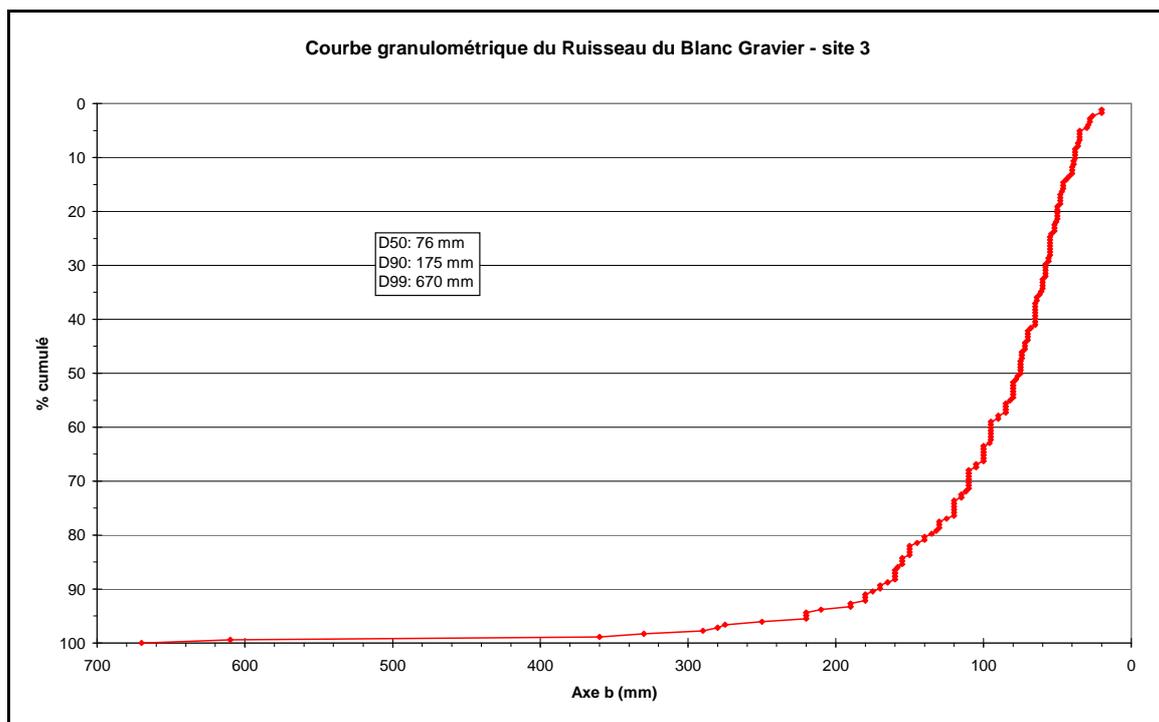


Figure 5-32 : Granulométrie des dépôts présents sur le site amont du ruisseau du Blanc Gravier

Des courbes granulométriques des dépôts mobilisés ont été établies pour chaque ruisseau. Afin de permettre une interprétation rapide de ces courbes granulométriques, le percentile 50 (D_{50}), le percentile 90 (D_{90}) et le percentile 99 (D_{99}) ont été calculés. Les valeurs obtenues sont reprises au tableau 5-4.

Tableau 5-4 : Récapitulatif des indices granulométriques des ruisseaux

Cours d'eau	Site	D_{50} (mm)	D_{90} (mm)	D_{99} (mm)
Ruisseau du Blanc-Gravier	Aval (site 1)	107	200	280
Ruisseau du Blanc-Gravier	Amont (site 3)	76	180	660
Ruisseau de Sordeye	Aval (site 4)	78	174	479
Ruisseau de Sordeye	Amont (site 5)	70	201	460
Ruisseau de Renory	Aval (site 6)	62	160	360
Ruisseau de Renory	Central (site 7)	60	145	390
Ruisseau de Renory	Amont (site 8)	69	190	400
Ruisseau du Fond du Moulin	Aval (site 9)	81	186	308
Ruisseau du Fond du Moulin	Amont (site 10)	70	171	390

Les ruisseaux du Sart Tilman ont charrié des éléments compris dans un large éventail granulométrique. Les indices granulométriques montrent que les dépôts échantillonnés sont mal classés, l'écart est important entre le D_{50} et le D_{90} de chaque site. Les sédiments sont

relativement grossiers. En effet, les valeurs de D_{50} sont comprises entre 60 et 107 mm tandis que les D_{90} sont pratiquement deux fois plus volumineux, de l'ordre de 150 à 200 mm. Enfin, les éléments plus massifs échantillonnés sont des blocs, le plus gros atteint 660 mm d'axe b.

A l'exception du secteur aval du Ruisseau du Blanc Gravier, la charge mobilisée, du point de vue du D_{50} , est relativement similaire entre les cours d'eau. Par contre, des différences notables apparaissent du point de vue des éléments charriés les plus grossiers. Le contexte géologique étant quasi similaire pour les différents cours d'eau, cette différence de taille mobilisée doit provenir des variations de compétence développée par les ruisseaux.

Les mesures des plus gros éléments mobilisés repérés sur chaque site sont présentées et utilisées dans la partie suivante. Elles vont servir de base pour estimer la puissance spécifique et le débit atteint par les ruisseaux.

Parallèlement à la mobilisation de la charge de fond dans le tronçon principal des différents cours d'eau, des observations réalisées par les riverains montrent l'importance du transport de blocs provenant des affluents à pente forte qui recoupent perpendiculairement la voirie dans le bassin versant du ruisseau du Fond du Moulin. Les photographies suivantes (de la figure 5-33 à la figure 5-35) mettent en évidence l'accumulation de blocs en aval sur la voirie.



Figure 5-33 : Dépôt de blocs au niveau du pertuis obstrué durant l'événement d'un affluent du ruisseau du Fond du Moulin (source : riverain)

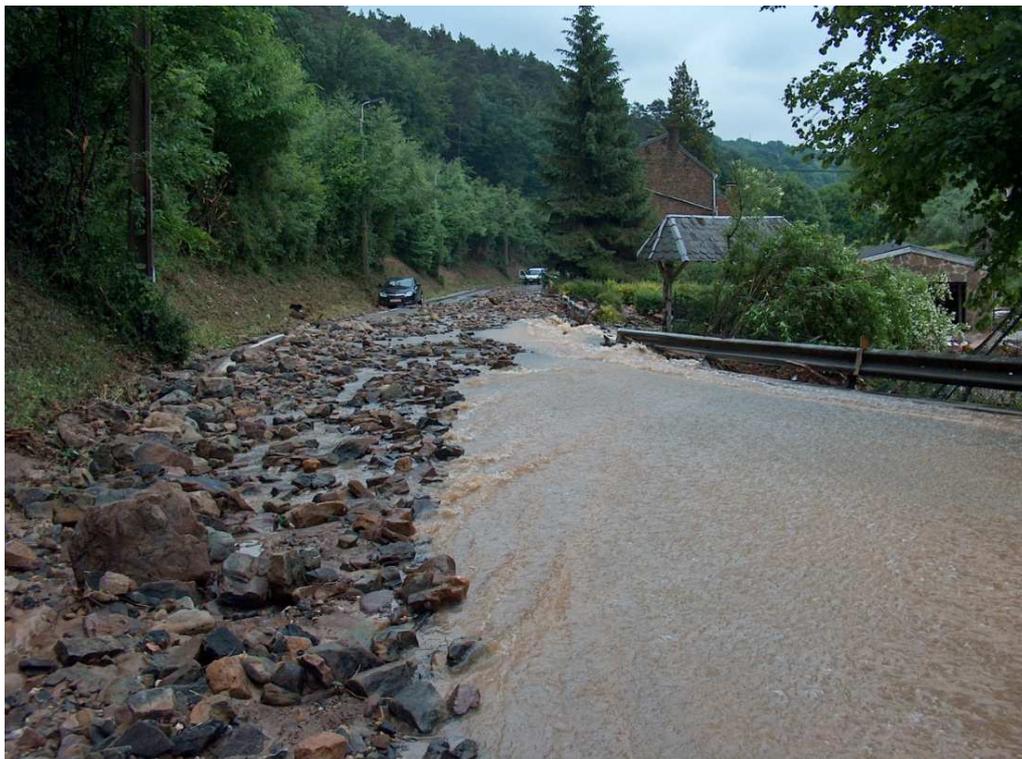


Figure 5-34 : Dépôt de blocs charriés sur la voirie (ruisseau du Fond du Moulin) – vue depuis l’amont (source : riverain)



Figure 5-35 : Vue depuis l’aval du dépôt de blocs (ruisseau du Fond du Moulin) (source : riverain)

5 - 3 - 2. Estimation des débits et des puissances à partir des informations granulométriques

Au paragraphe 5 - 2 - 4, des valeurs de débits ont été proposées à partir des hauteurs d'eau mesurée au niveau des différents profils. D'autres ont été proposées à partir de la superficie des différents bassins versants.

La taille des éléments mobilisés lors d'une crue peut être mise en relation avec la puissance spécifique nécessaire à leur mise en mouvement. Il existe peu de relations établies pour des rivières charriant des éléments supérieurs à 500 mm. Citons celles de Costa (1983) sur des cours d'eau du Bassin du Colorado et de Williams (1983) établie à partir d'observations publiées dans la littérature. Plus récemment, ce type de relation a été proposé pour des cours d'eau des régions méditerranéennes (Jacob, 2003 ; Gob *et al.*, 2003 ; Gob, 2005 et Jacob *et al.*, 2006).

Toutes ces relations se présentent sous la forme suivante :

$$\omega_0 = aD_i^b$$

où : ω_0 = puissance spécifique critique de mise en mouvement (W/m^2) ;
 D_i = taille du matériau mobilisé (mm) ;
 a et b = paramètres de l'équation.

Ces relations sont établies sur base de la mobilisation d'éléments individuels (D_i). Il a été arbitrairement choisi d'utiliser l'axe b du plus gros bloc retrouvé sur chaque site. En effet, les éléments grossiers permettent d'apprécier la compétence maximale des événements mobilisateurs.

Plusieurs essais ont été menés. Tout d'abord sur base de la relation de Costa (1983) établie sur plusieurs rivières dont les bassins versant sont compris entre 1,6 et 29 km² et pour une gamme d'éléments mobilisés compris entre 50 et 1000 mm. Dans un second temps, les débits sont estimés à partir de la relation obtenue par Jacob (2003) sur une rivière des Cévennes.

Les résultats obtenus pour les ruisseaux du Sart Tilman sont compris dans la relation établie par Costa (1983). Celle-ci prend la forme suivante :

$$\omega = 0,009D_i^{1,69}$$

Dans le tableau 5-5, les informations nécessaires au calcul des puissances et des débits sont reprises. A savoir pour chaque site : la pente moyenne (en m.m⁻¹), la largeur moyenne (en m), ces valeurs sont obtenues à partir des profils présentés ci-dessus (voir paragraphe 5 - 2 - 3), et l'axe b (en mm) du plus gros bloc mesuré sur chaque site.

Tableau 5-5 : Calcul des puissances et des débits à partir de la relation de Costa (1983)

Cours d'eau	Site	Axe b (mm)	Pente moyenne (m/m)	Puissance spécifique (W/m ²)	Largeur moyenne (m)	Débit (m ³ /s)
Ruisseau du Blanc-Gravier	Aval (site 1)	660	0,068	524	10,6	8,4
Ruisseau du Blanc-Gravier	Amont (site 3)	670	0,095	537	5,7	3,3
Ruisseau de Sordeye	Aval (site 4)	500	0,161	328	5,1	1,1
Ruisseau de Sordeye	Amont (site 5)	460	0,123	285	3,7	0,9
Ruisseau de Renory	Aval (site 6)	550	0,100	385	5,2	2,0
Ruisseau de Renory	Central (site 7)	590	0,104	433	8,7	3,7
Ruisseau de Renory	Amont (site 8)	490	0,144	317	4,0	0,9
Ruisseau du Fond du Moulin	Aval (site 9-10)	540	0,054	373	4,3	3,0
Ruisseau du Fond du Moulin	Amont (site 11)	410	0,060	234	6,5	2,6

Les puissances obtenues représentent la puissance minimale pouvant mettre en mouvement le bloc pris en compte dans la relation. Ces valeurs sont élevées comparées à celles calculées pour une série de rivières ardennaises, pour lesquelles les puissances maximales sont comprises entre 100 et 200 W/m² (Petit *et al.*, 2005). Les débits moyens obtenus par cette méthode sont les suivants :

- Ruisseau du Blanc Gravier : 5,8 m³/s
- Ruisseau de Sordeye : 1 m³/s
- Ruisseau de Renory : 2,2 m³/s
- Ruisseau du Fond du Moulin : 2,8 m³/s

Ces débits sont nettement plus faibles que ceux obtenus sur base des hauteurs d'eau. Ces derniers étaient compris entre 24,3 m³/s et 5,2 m³/s.

Cependant, Petit *et al.* (2005) ont montré que les caractéristiques des cours d'eau influençaient fortement le seuil de mise en mouvement. Dans les cours d'eau de dimensions modestes, les puissances nécessaires à la mise en mouvement de la charge de fond doivent être plus importantes du fait qu'une part de l'énergie est perdue suite à la résistance des formes du lit.

Le Chassezac étudié par Jacob (2003) est une rivière à *step-pools*. Dans ce type de lit, la rugosité engendrée par les formes du lit est importante. La mise en mouvement de la charge de fond nécessite donc des puissances importantes. Dans ce cas, les puissances spécifiques de mise en mouvement sont nettement supérieures à celles observées pour des rivières à alternances seuil -mouilles.

Les résultats obtenus sur base de la relation de Jacob (2003) :

$$\omega = 0,025D_i^{1,647}$$

sont présentés au tableau 5-6.

Tableau 5-6 : Calcul des puissances et des débits à partir de la relation de Jacob (2003)

Cours d'eau	Site	Axe b (mm)	Pente moyenne (m/m)	Puissance spécifique (W/m ²)	Largeur moyenne (m)	Débit (m ³ /s)
Ruisseau du Blanc-Gravier	Aval (site 1)	660	0,068	1101	10,6	17,6
Ruisseau du Blanc-Gravier	Amont (site 3)	670	0,095	1128	5,7	6,9
Ruisseau de Sordeye	Aval (site 4)	500	0,161	697	5,1	2,2
Ruisseau de Sordeye	Amont (site 5)	460	0,123	607	3,7	1,9
Ruisseau de Renory	Aval (site 6)	550	0,100	815	5,2	4,3
Ruisseau de Renory	Central (site 7)	590	0,104	915	8,7	7,8
Ruisseau de Renory	Amont (site 8)	490	0,144	674	4,0	1,9
Ruisseau du Fond du Moulin	Aval (site 9-10)	540	0,054	791	4,3	6,4
Ruisseau du Fond du Moulin	Amont (site 11)	410	0,060	503	6,5	5,5

On constate que les puissances de mise en mouvement sont nettement supérieures à celles obtenues sur base de la relation de Costa (1983). Elles sont comprises entre 550 et 1100 W/m². De telles valeurs de puissances spécifiques sont extrêmement rares dans des cours d'eau ardennais, même pour une crue centennale. Le fait que des puissances spécifiques aussi élevées aient pu être engendrées dans de petits bassins confirme qu'il s'agit bien d'un phénomène de flash-floods. Les débits moyens par ruisseau sont :

- Ruisseau du Blanc Gravier : 12,3 m³/s
- Ruisseau de Sordeye : 2,1 m³/s
- Ruisseau de Renory : 4,7 m³/s
- Ruisseau du Fond du Moulin : 5,9 m³/s

Les valeurs obtenues en se basant sur la granulométrie des éléments charriées sont certes inférieures à celles obtenues à la partie 5 - 2 - 4, que ce soit à partir des hauteurs d'eau observées ou des relations théoriques définies à partir de la superficie des bassins versants. Cependant, elles restent dans un ordre de grandeur comparable vu les approximations qui résultent de l'absence d'observations directes du phénomène et l'utilisation de relations théoriques obtenues pour des cours d'eau de contextes différents.

5 - 3 - 3. Sédimentation dans l'étang du Blanc Gravier



Janvier 2003



Janvier 2004



Janvier 2005



Janvier 2007



Janvier 2009

**Figure 5-36 : Evolution du lac du Blanc Gravier
(L. Schmitz)**

Les photographies prises annuellement par le conservateur du domaine du Sart Tilman indiquent entre 2003 et 2005 un remplissage sédimentaire important de l'étang situé dans la partie aval du ruisseau du Blanc Gravier (figure 5-36).

Un curage a été effectué, vraisemblablement en 2006. Malheureusement, nous ne disposons pas de la profondeur d'eau restant dans l'étang avant et après curage. La seule information disponible nous indique que le volume total de sédiments extraits durant le curage est de 360 m³.

L'analyse des photographies de l'époque et la comparaison avec la situation actuelle semble indiquer que le remplissage sédimentaire avant le curage était légèrement supérieur à celui observé après que la crue ait déposé de nouveaux sédiments fins le 29 mai 2008.

Nous estimons donc grossièrement le volume de sédiments apportés par cette crue à environ 300 m³. Une campagne de levé exhaustive serait nécessaire en vue d'affiner cette valeur. Considérant une densité de 1,6 tonne/m³, la masse de sédiments contenus dans l'étang serait de 480 tonnes. Nous verrons par la suite que cette valeur semble faible vis-à-vis du dépôt de blocs étudié au point 5 - 3 - 3. En outre, il est important de noter qu'une grande quantité de sédiments est passée outre l'étang et s'est déposée sur la voirie longeant l'Ourthe au pied de la vallée du Blanc Gravier. L'épaisseur dépassait 20 à 30 cm, sur une zone deltaïque de plusieurs dizaines, voire centaines de mètres. Une illustration de la zone inondée au pied du thalweg du Blanc Gravier est présentée ci-dessous (figure 5-37).



Figure 5-37 : Extrait RTBF (29/05/2008)

D'autres photographies ont été réalisées dans l'après-midi du 29 mai 2008 au pied du versant du Blanc Gravier et sur la voirie après la diminution partielle du niveau d'eau dans cette zone inondée. On peut y observer la grande quantité de sédiments fins en cours d'accumulation par décantation (figure 5-38 et suivante).



Figure 5-38 : Zone d'accumulation de sédiments fins au pied du thalweg du ruisseau du Blanc-Gravier (source : LHGF, 29/05/2008, 15h55)



Figure 5-39 : L'épaisseur de sédiments dépasse 10 à 15 cm sur les marges de la zone de décantation (source : LHGF)



Figure 5-40 : Evolution du dépôt de l'étang du Blanc Gravier (source : L. Schmitz)

A l'entrée du ruisseau dans l'étang, un dépôt de graviers et de blocs s'est mis en place suite à la crue. La figure 5-40 compare la situation avant et après l'épisode.



Figure 5-41 : Dépôt deltaïque dans l'étang (mai 2009)

La majorité des blocs de grande taille (entre 20 et 70 cm) se sont déposés au niveau de la rupture de pente située en aval de l'ancien canal de jaugeage. Des graviers et blocs de plus petite taille ont été charriés jusqu'à l'étang (figure 5-41). En aval de celui-ci, les sédiments observés sur la voirie sont de plus en plus fins et correspondent à la sédimentation des matières en suspension transportées par les eaux torrentielles.

5 - 3 - 4. Estimation du volume du dépôt en amont de l'étang du Blanc Gravier



Figure 5-42 : Evolution du site aval du Blanc Gravier (sources : L. Schmitz et LHGF)

Suite à la présence de nombreux embâcles et à la rupture de pente, un dépôt de blocs s'est accumulé environ 35 m en amont de l'étang en aval du Blanc Gravier. La figure 5-42 montre la constitution du dépôt. Un levé topographique précis a été effectué sur le dépôt présent sur la photo. La figure 5-43 délimite les éléments de la plaine alluviale. On peut constater que le cours d'eau a changé de tracé suite à la crue : il coule désormais le long du versant en rive droite alors qu'auparavant, il recoupait en oblique la zone du dépôt avant que celui-ci ne se constitue. Le volume de blocs est estimé à 74 m^3 , ce qui représente une masse d'environ 122 tonnes réparties sur 232 m^2 . La densité de référence est estimée à 1,65, compte tenu de

la porosité du dépôt. Il s'agit d'une valeur de référence pour les cours ardennais. Le volume est reconstitué à partir d'une interpolation du sol sous-jacent. Il ne tient pas compte de l'encaissement initial du cours d'eau, visible sur la photo, mais difficilement quantifiable d'un point de vue topographique et est donc légèrement sous-estimé.

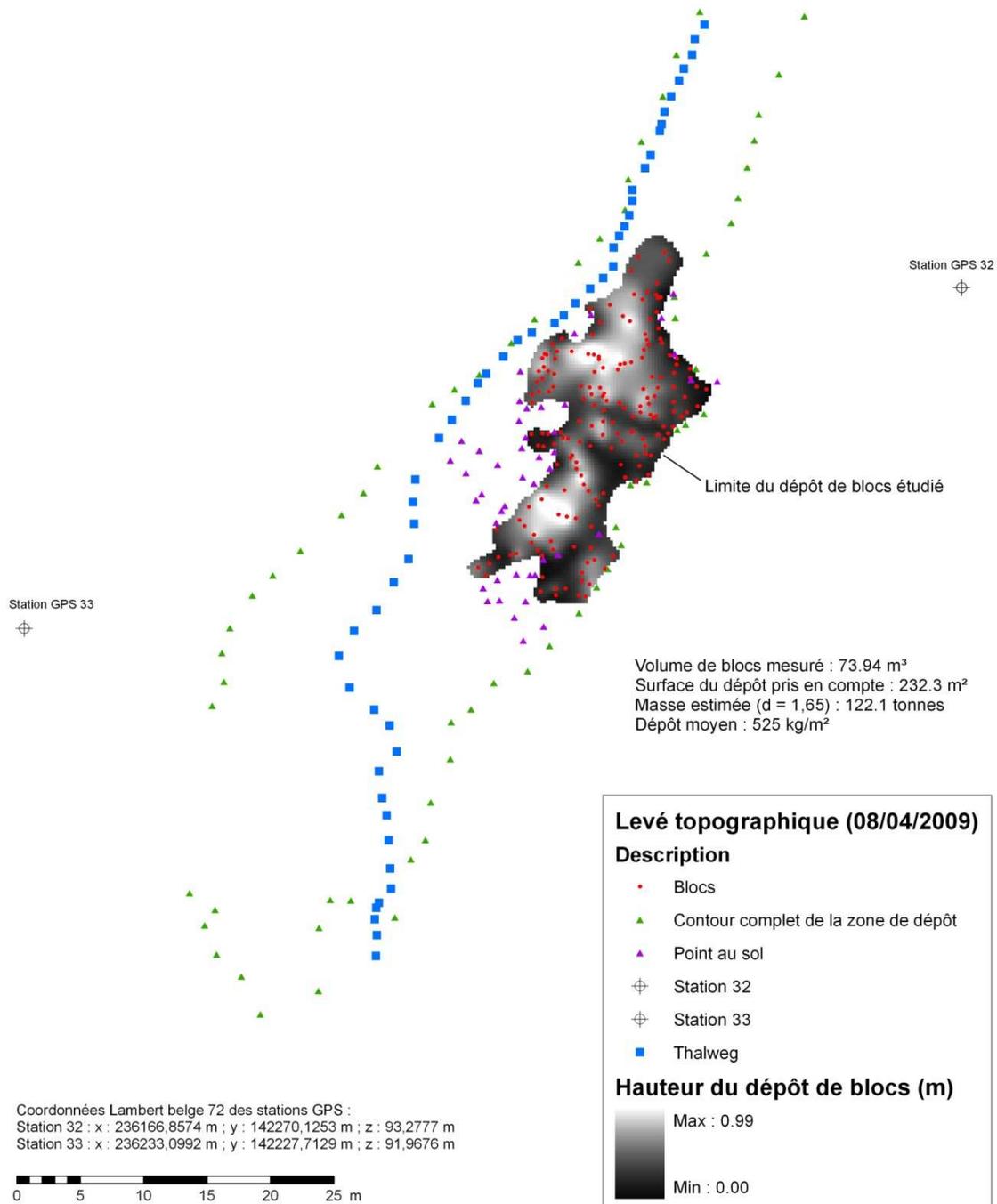


Figure 5-43 : Estimation volumétrique du dépôt de blocs (site aval du ruisseau du Blanc Gravier)

Le débit solide spécifique peut être calculé pour ce seul dépôt de blocs. En effet, le charriage d'une masse totale de 122 tonnes en ce point du bassin versant, dont la superficie atteint 2,51 km², correspond à un débit solide spécifique de 49 t.km⁻² pour ce seul événement extrême. La littérature nous donne comme référence des valeurs moyennes de charriage en rivières ardennaises de l'ordre de 3 t.km⁻².an⁻¹ (pour une année complète, avec les différentes crues qu'elle comporte) ou encore 4 t.km⁻² pour un événement isolé, à savoir une crue décennale sur l'Ourthe orientale (Houbrechts *et al.*, 2006). La valeur atteinte ici, proche de 50 t.km⁻², pour un seul dépôt échantillonné (mais le plus important observé dans le bassin du Blanc Gravier en terme de quantité) montre clairement le caractère exceptionnel de cet événement torrentiel. L'estimation complète de la masse des éléments mobilisés sur l'ensemble du tracé du Blanc Gravier conduirait invariablement à des débits solides spécifiques extrêmes.



D. Modélisation hydrologique

Etant donné que l'eau intervient dans l'ensemble du fonctionnement du milieu naturel, elle est le vecteur privilégié d'éléments transportés en solution ou en suspension.

D'où provient l'eau des ruisseaux ? Quels sont les chemins parcourus depuis l'instant où une goutte de pluie rencontre la surface de la terre ? Telles sont au contraire les questions fondamentales qui se posent à l'hydrologie depuis plus d'une trentaine d'années.

Historiquement, il était surtout demandé aux hydrologues de prédire le débit à l'exutoire d'un bassin versant. Les approches globales se sont d'abord imposées; elles sont dites empiriques ou conceptuelles.

De nombreuses études de terrain, conduites à l'échelle du versant ou des petits bassins versants, ont apporté une bien meilleure compréhension des cheminements de l'eau, qui à son tour a permis, grâce aux progrès concomitants des moyens informatiques, le développement d'une nouvelle génération de modèles dits distribués ou spatialisés. Contrairement aux modèles globaux, ceux-ci appréhendent le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant en tentant de représenter les processus du ruissellement dans l'espace.

L'intérêt des équations physiques réside dans le fait que leurs paramètres sont en principe mesurables ou du moins interprétables.

C'est dans ce contexte que se place le logiciel WOLF, développé au sein de l'unité d'Hydrologie, Hydrodynamique Appliquée et Constructions Hydrauliques, et plus particulièrement son module WOLF HYDRO. Ce modèle permet une bonne représentation des écoulements quasi-horizontaux de manière à apporter une réponse efficace à la problématique habituelle des modèles classiques qui ne tiennent pas compte explicitement du parcours de l'eau sur le sol.

WOLF HYDRO est clairement orienté vers la représentation des phénomènes de crues. Bien qu'il possède une représentation multicouches sur un axe vertical, alimentée par des relations physiques de transfert, sa conception est d'abord dictée par une représentation détaillée transferts rapides quasi-horizontaux de surface ou de subsurface. Dans ce contexte, il est particulièrement bien adapté à la représentation des épisodes pluvieux subis par les bassins versants situés au Sart Tilman.

Les équations hydrodynamiques utilisées dans WOLF HYDRO sont celles dites de l'onde diffusive, simplification des équations complètes des « Shallow Water ». Pratiquement, cela signifie que le débit transféré de maille en maille est dépendant des caractéristiques du terrain, via un coefficient de frottement, et de la pente de surface libre.

Pour que cette approximation soit valable, il est nécessaire que les effets d'inertie soient négligeables dans les écoulements représentés. C'est habituellement le cas pour les écoulements en fines lames que sont les phénomènes de ruissellement de surface. Par contre, dès que les flux se concentrent en ruisseaux et rivières, la dynamique peut fondamentalement évoluer. Les termes d'inertie ne peuvent plus être négligés et il est alors nécessaire de recourir à une modélisation intégrée sur la section mouillée de l'écoulement. Cette seconde représentation permet d'appréhender les transferts dans l'entière du réseau drainant sur le bassin versant en tenant compte des nombreuses confluences de celui-ci.

Cette réalité physique est modélisée par la suite WOLF grâce à l'adjonction d'un module de calcul en réseau de rivières, WOLF1D.

1. Contexte de modélisation

Le site du Sart Tilman est composé de nombreux petits bassins versants qui ne disposent pas d'instrumentation spécifique dédiée à la mesure de débits ou de hauteurs d'eau dans les ruisseaux et les rivières.

L'utilisation d'un modèle hydrologique physiquement basé et spatialement distribué est donc un avantage déterminant pour la compréhension du phénomène subi en mai 2008. En effet, un modèle conceptuel de type boîte noire doit obligatoirement être calé sur base d'événements historiques pour lesquels la pluie et le débit à l'exutoire sont connus. Les paramètres de tels modèles n'ont en effet pas de signification physique et il est donc a priori impossible d'en déterminer les valeurs sur base de caractéristiques propres du bassin versant. D'autant plus que des notions telles que le coefficient de ruissellement dépend à la fois du type de sol, de l'occupation du celui-ci mais également de la pente et de l'intensité des pluies.

Il faut cependant nuancer ces propos car, même si une représentation physique est déterminante pour chaque paramètre disponible, il n'en demeure que ceux-ci varient dans une gamme de valeurs connues qui peut parfois être relativement importantes. L'analyse hydrogéologique du site en est d'ailleurs une excellente illustration. Dès lors, une modélisation d'un bassin versant doit donc obligatoirement passer par une phase de calibration, certes plus légère, et de validation du modèle de manière à obtenir un jeu de paramètres optimisés.

Dans le cadre de cette étude et plus précisément de l'événement particulier subi, l'objectif de la modélisation sera de fournir les ordres de grandeur des débits évacués par les rivières principales de trois bassins versants différents (Ruisseau de Renory, Fond du Moulin et Blanc Gravier). Dans ce but, une valeur moyenne des paramètres physiques de modélisation sera employée. Les résultats seront ensuite comparés à d'autres méthodes d'estimation pour valider la méthodologie.

Par la suite, des variantes seront modélisées de manière à mieux cerner les fonctionnements intrinsèques de chaque bassin.

2. Pluies

La donnée de pluie est bien entendu primordiale pour cette étude. Etant donné que le phénomène a démarré très rapidement et a été de courte durée (environ 2 heures), le pas d'échantillonnage temporel est très important car il doit permettre de reproduire les fluctuations subies. Dans ce but, l'utilisation de la donnée la plus précise à 5 minutes d'intervalle est évidemment retenue.

Il a été démontré plus haut que la répartition spatiale de la pluie pouvait être considérée comme uniforme (voir chapitre C.1. : « Présentation de l'événement pluviométrique »).

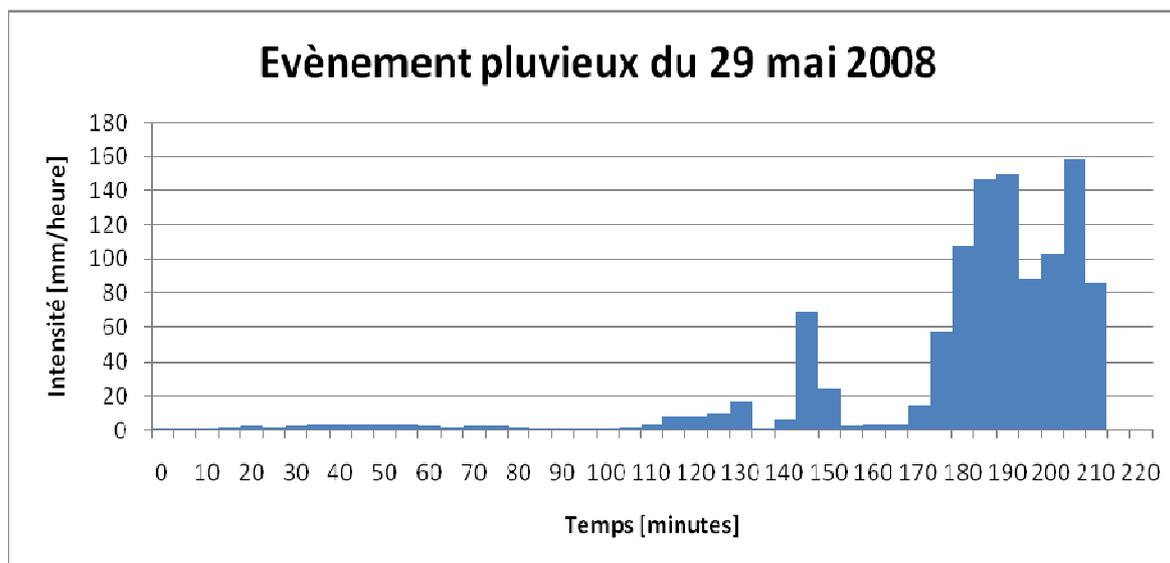


Figure 6-1 : Hyétogramme de l'évènement pluvieux du 29 mai 2008 (pas temporel de 5 minutes)

Une analyse fréquentielle de l'épisode pluvieux démontre sans ambiguïté l'aspect exceptionnel de celui-ci. Les volumes maxima tombés sur des intervalles successifs de 10, 20, 30 minutes, 1 heure et 2 heures sortent des périodes de retour habituelles des relations QDF (200 ans max). L'extrapolation exacte de la période de retour est extrêmement délicate mais elle très clairement multi-centennale.

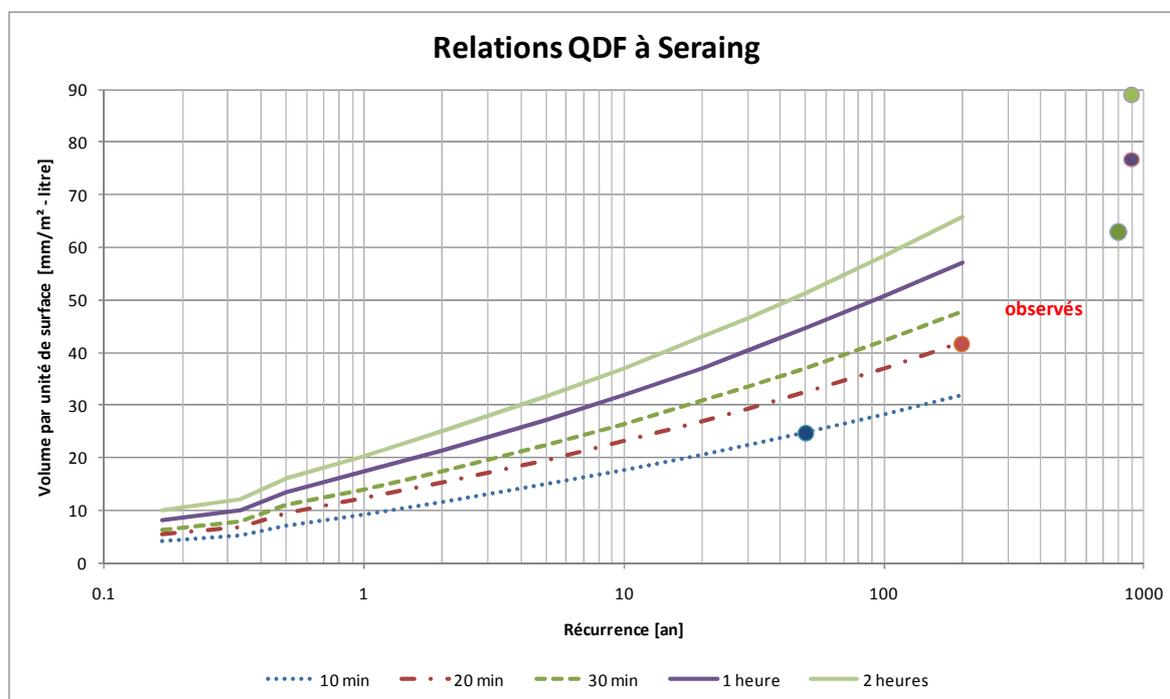


Figure 6-2 : Relations QDF pour la commune de Seraing (source SPW)

Un aspect supplémentaire et défavorable est que la période de retour de l'événement est monotonement croissante avec les intervalles temps choisis pour le cubage.

Le Sart Tilman a donc du faire face non pas à un pic de pluie de quelques minutes mais bien à un orage extrêmement violent pendant toute sa durée alors que les intensités préalables et postérieures à celui-ci sont quasi nulles.

Cette absence de pluies antérieures a conduit à considérer que les conditions d'humidité de sol sont « normales », c'est-à-dire que le sol dispose d'une capacité d'infiltration initiale importante ce qui doit permettre un effet réducteur sur les premiers instants de pluie. Par la suite, le sol étant progressivement saturé en surface, les fonctions d'infiltration évalueront ce qui induira un ruissellement par dépassement de cette capacité infiltrante.

Il est intéressant de noter qu'alors que le Sart Tilman devait supporter ce déluge, les autres pluviographes de la région n'enregistraient que de faibles précipitations, sauf à Louveigné, et dans une moindre mesure, à Bierset.

Tableau 6-1 : Précipitations globales enregistrées à différentes stations (source SPW)

Station	Balmoral	Louveigné	Coo inf	Coo sup	Sart Tilman	Bierset
Lambert X [km]	258.126	244.558	257.075	255.062	235.004	226.46
Lambert Y [km]	134.269	134.832	120.991	120.107	142.432	147.928
Rivière	Hoëgne	Amblève	Amblève	Amblève	Ourthe	Meuse
P cumulé sur la journée [mm]	35,8	65	39,2	36	91,4	53,1
Début des précipitations	29 mai 6h	29 mai 6h				
Fin des précipitations	29 mai 12h	29 mai 12h	29 mai 13h	29 mai 12h	29 mai 12h	29 mai 13h
Durée des précipitations [h]	6	6	7	6	6	7
Période de retour	2	93	2,5	2	>200	21

3. Hauteurs d'eau et débits des rivières

En termes de hauteurs d'eau, un rapport interne du GTI (**G**roupe **T**ransversal **I**nondation) mentionne :

« Sur l'Ourthe, la hauteur d'eau est passée de 0.5m en moyenne à plus d'un mètre à certains endroits. L'eau est montée de plus de 70cm en moins de 12 heures. Pour la Vesdre, au niveau de Chaudfontaine, l'eau est montée d'environ 90cm. Le cours d'eau est passé de 0.55m à 1.46m en 5 heures et il est monté de 47cm en 1 heure. L'Amblève est montée de 70cm en environ 12 heures au niveau de Martinrive, elle a atteint 1.52m. »

Tandis que pour les débits mesurés :

Tableau 6-2 : Indications sur l'évolution des débits dans les rivières proches du site

Station	Sauheid	Chaufontaine	Martinrive
Rivière	Ourthe	Vesdre	Amblève
Date début de la crue	29 mai 8h	29 mai 8h	29 mai 8h
Q initial (m3/s)	15	4	6
Date du pic de l'hydrogramme	29 mai 20h	29 mai 13h	29 mai 16h
Q max (m3/s)	103.4	37.7	75.4
Durée de montée de crue (h)	12	5	8
delta Q (m3/s)	88.4	33.7	69.4
Q seuil pour la pré-alerte de crue (m3/s)	230	70	100

« Les précipitations ont commencé le matin vers 6h, le débit des différents cours d'eau a progressivement augmenté pour atteindre un pic de débit dans la journée. Dans le cas de l'Ourthe, le pic s'est produit en début de soirée, plus tard par rapport à l'Amblève et à la Vesdre.

Le débit de l'Ourthe a été multiplié par 6 en 12 heures, celui de la Vesdre par 8 en 5 heures et celui de l'Amblève par 12 en 8 heures. Les débits ont progressivement diminué dans la journée du 31 mai et ne sont pas redescendus à leur valeur initiale. En particulier, le débit de l'Ourthe mesuré à Sauheid est encore de 25 m3/s le 2 juin, contre 15 m3/s le 28 mai.

Le débit maximum de chaque cours d'eau relevé ici est **bien inférieur** au débit seuil déclenchant la phase de pré-alerte de crue. »

L'ampleur des précipitations locales a donc eu un impact sur les rivières principales mais heureusement pas d'une façon comparable à celui subi par les riverains directs des ruisseaux et rivières des bassins du Sart Tilman.

4. Bassin versant du Rénory - Principe de modélisation

Le principe de modélisation de WOLF HYDRO sera expliqué dans sa filière complète sur le bassin versant du Rénory. Pour les autres bassins versants, certaines étapes préparatoires ne seront dès lors pas décrites intégralement.

Pour effectuer une modélisation hydrologique physiquement basée et spatialement distribuée, il est nécessaire de disposer de nombreuses informations issues de sources différentes. Certaines pourront être exploitées de manière directe, telle que la topographie, ou bien de manière combinée, comme la pédologie, l'occupation du sol et les données hydrogéologiques, pour en déduire des valeurs des paramètres de la loi d'infiltration utilisée dans WOLF HYDRO (loi de Green-Ampt).

Les paragraphes suivants illustrent la manière dont chaque information a été utilisée.

4 - 1. Modèle numérique de terrain

Pour que les équations utilisées soient valables, il est nécessaire d'utiliser une taille de mailles de modélisation de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres. Vu la faible taille des bassins versants à étudier (quelques km²), une maille de 20 mètres de côté a été choisie de manière à obtenir une finesse de discrétisation néanmoins nécessaire.

Le modèle numérique de terrain ainsi généré par l'équipe de géométrie (voir chapitre C.4 : « Création de modèles numériques de terrain (MNT) ») pour le bassin versant du Rénoy est ainsi illustré à la figure 6-3.

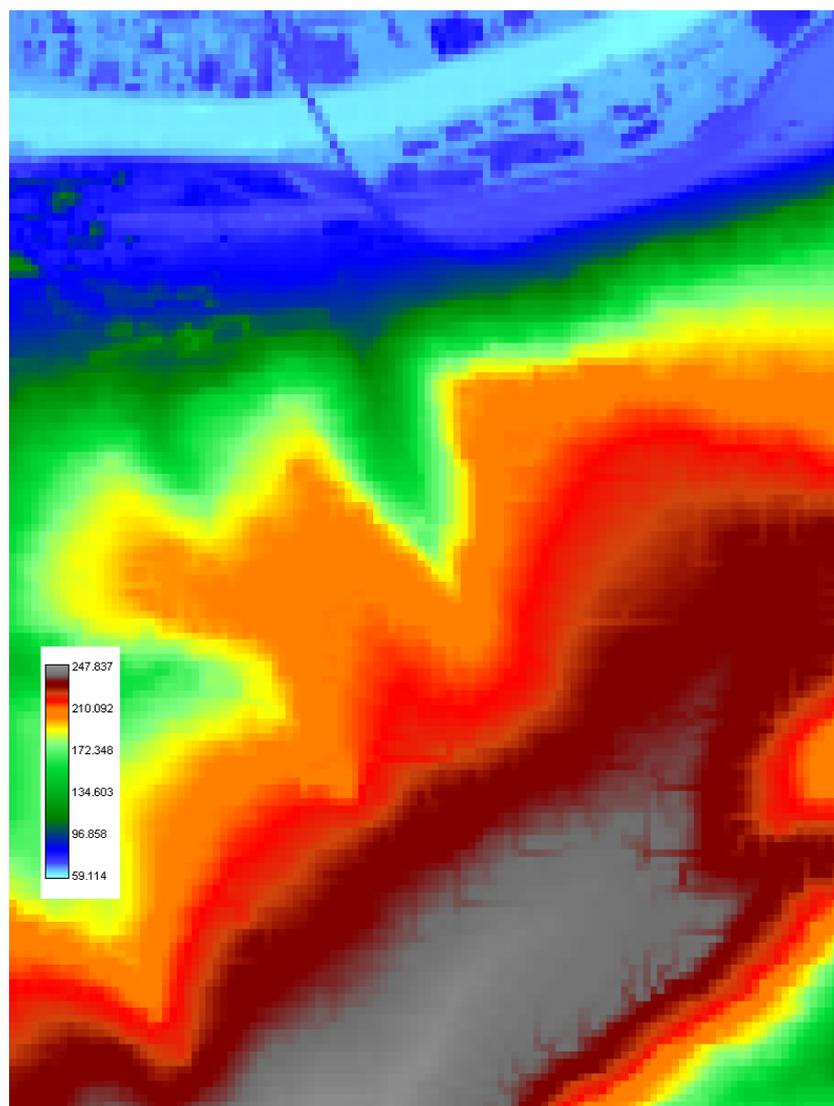


Figure 6-3 : Modèle numérique de terrain pour le bassin versant du Rénoy
Coordonnées de référence LT72 (233309, 141977)
Nombre de mailles en X = 115 et en Y = 153

4 - 2. Orthophotoplans (PPNC)

Les orthophotoplans permettent d'ajouter une interprétation visuelle globale à la situation modélisée. Le positionnement et le repérage d'ouvrages particuliers (bassins d'orage, sites industriels, zones commerciales, ...) sont ainsi grandement facilités.

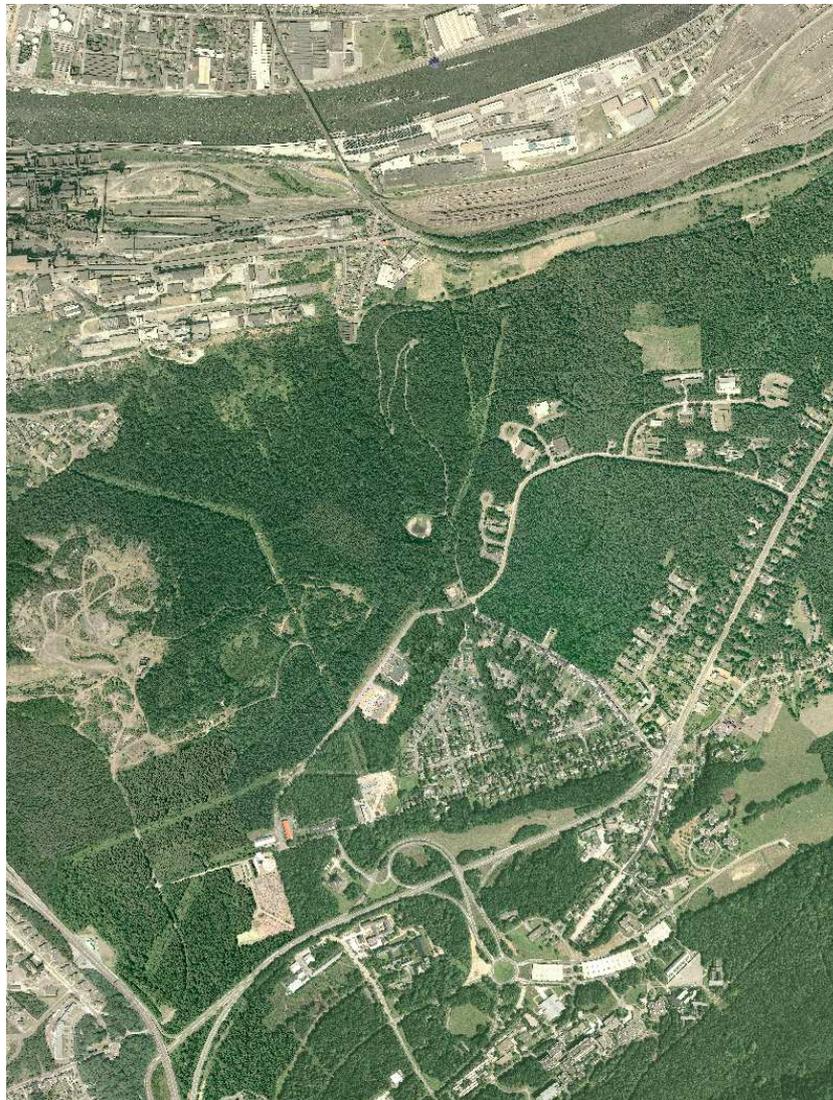
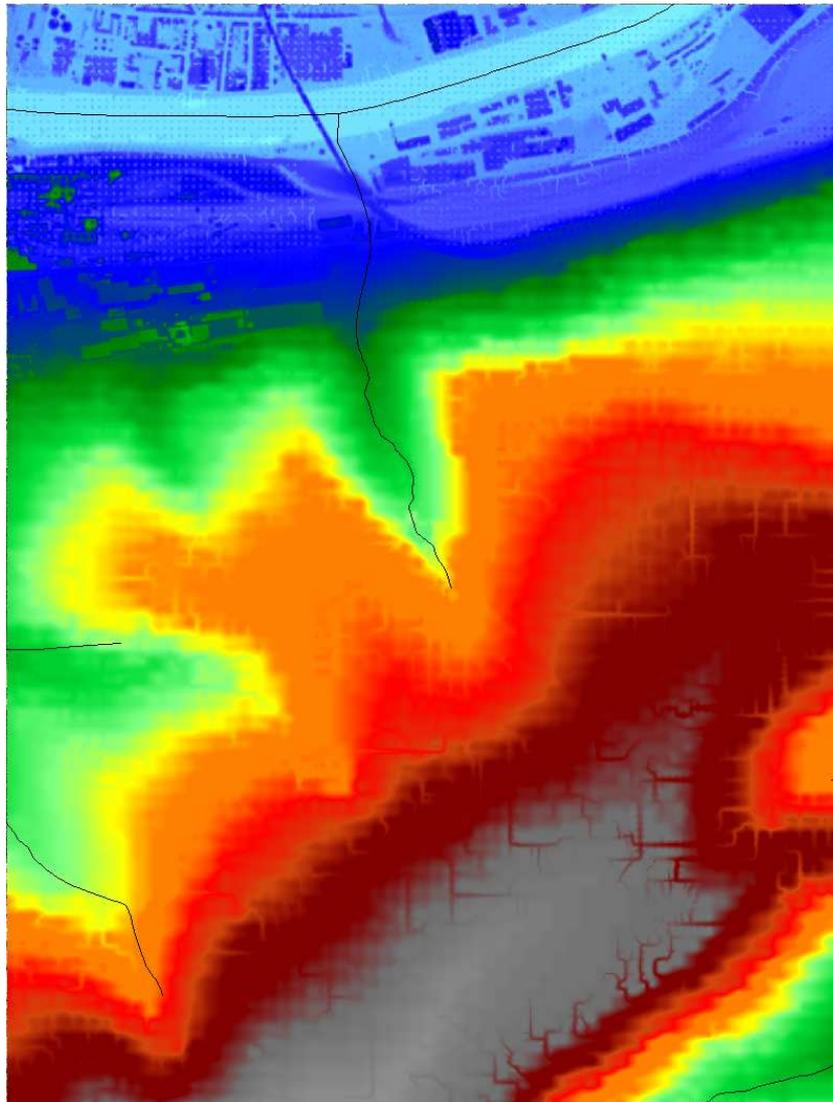


Figure 6-4 : Vue combinée de plusieurs images PPNC pour le bassin versant du Rénory

4 - 3. Réseau hydrographique digitalisé

La superposition à la topographie du réseau hydrographique digitalisé de la Région Wallonne permet également de distinguer très rapidement les ruisseaux répertoriés. Cette information est pertinente pour valider le réseau drainant qui sera déterminé de manière automatique par les opérations préalables à la modélisation des flux.



**Figure 6-5 : Superposition du réseau hydrographique digitalisé avec la topographie –
Bassin versant du rénory**

4 - 4. Occupation du sol

L'information d'occupation du sol est extrêmement précieuse pour le modèle hydrologique. En effet, elle va servir à alimenter plusieurs paramètres distincts :

- le coefficient de rugosité ;
- les coefficients de la loi d'infiltration de Green-Ampt pour laquelle l'occupation du sol est combinée à la pédologie et à l'hydrogéologie.

Cette information est disponible via plusieurs sources dont la première est la Carte d'Occupation du Sol de Wallonie (COSW) fournie sous un format vectoriel.

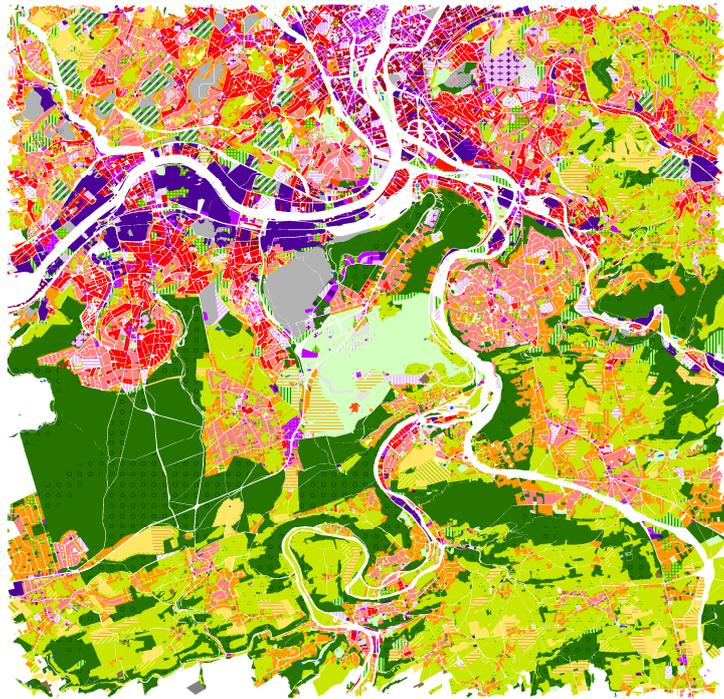


Figure 6-6 : Carte d'occupation du Sol de Wallonie pour l'entièreté de la zone d'étude

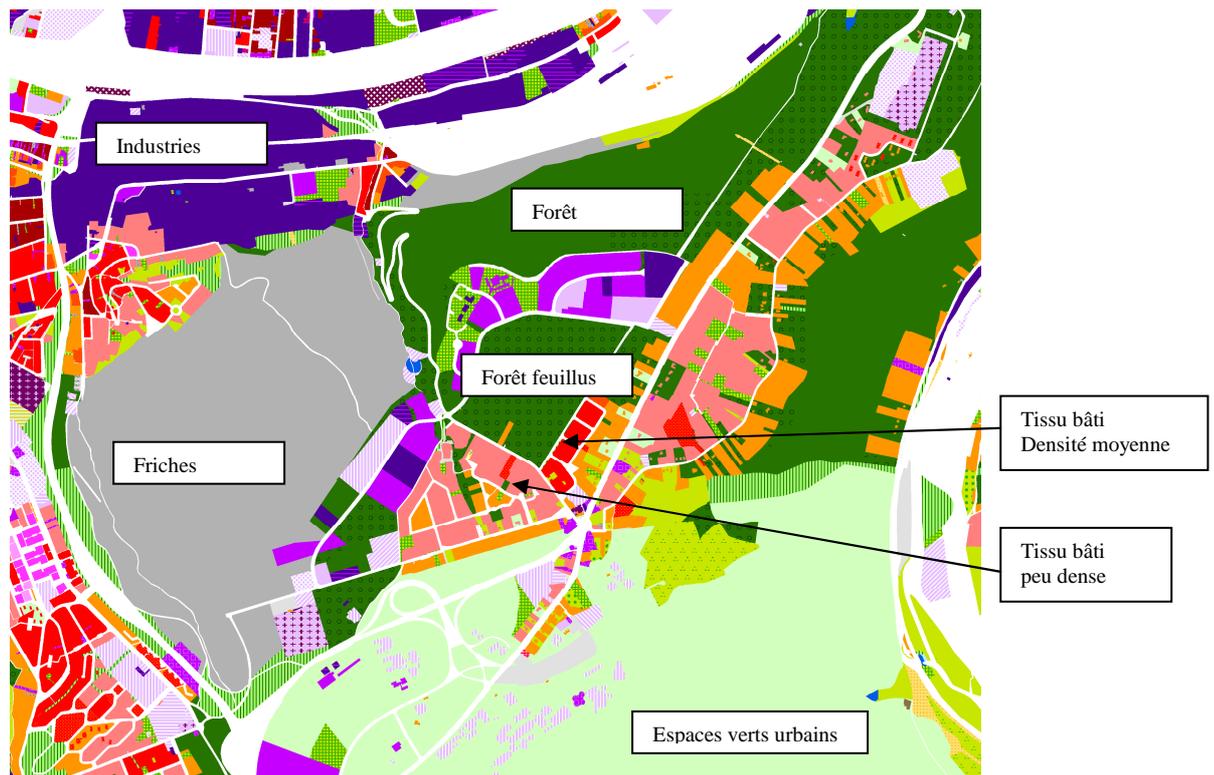


Figure 6-7 : Carte d'occupation du Sol de Wallonie pour le bassin versant du Rénoy

Ces cartes fournissent sous format numérique les occupations des sols, selon une classification en 5 niveaux qui, malgré sa pertinence pour des applications de gestion, est

trop complexe en tant que telle pour une modélisation hydrologique. Il est donc nécessaire de les regrouper selon une structure plus restreinte permettant d'y associer des coefficients en nombre raisonnable.

Elles sont donc reclassées dans les catégories d'occupation de sol du SCS (Soil Conservation Service), ce qui permettra d'en déduire les valeurs des CN (Curve Numbers) qui sont exploitées pour un premier calcul du coefficient de perméabilité du modèle de Green-Ampt.

Tableau 6-3 : Classification d'occupation du sol retenue

N° classe	Dénomination
1	Terrain résidentiels
2	Habitat et services
3	Mines, décharges et espaces abandonnés
4	Espace vert artificialisés
5	Autres terrains artificialisés
6	Terres arables
7	Cultures permanentes
8	Surfaces enherbées
9	Friches agricoles
10	Forêts
11	Couvertures basses
12	Roches nues
13	Zones humides
14	Eaux continentales
15	Non classé

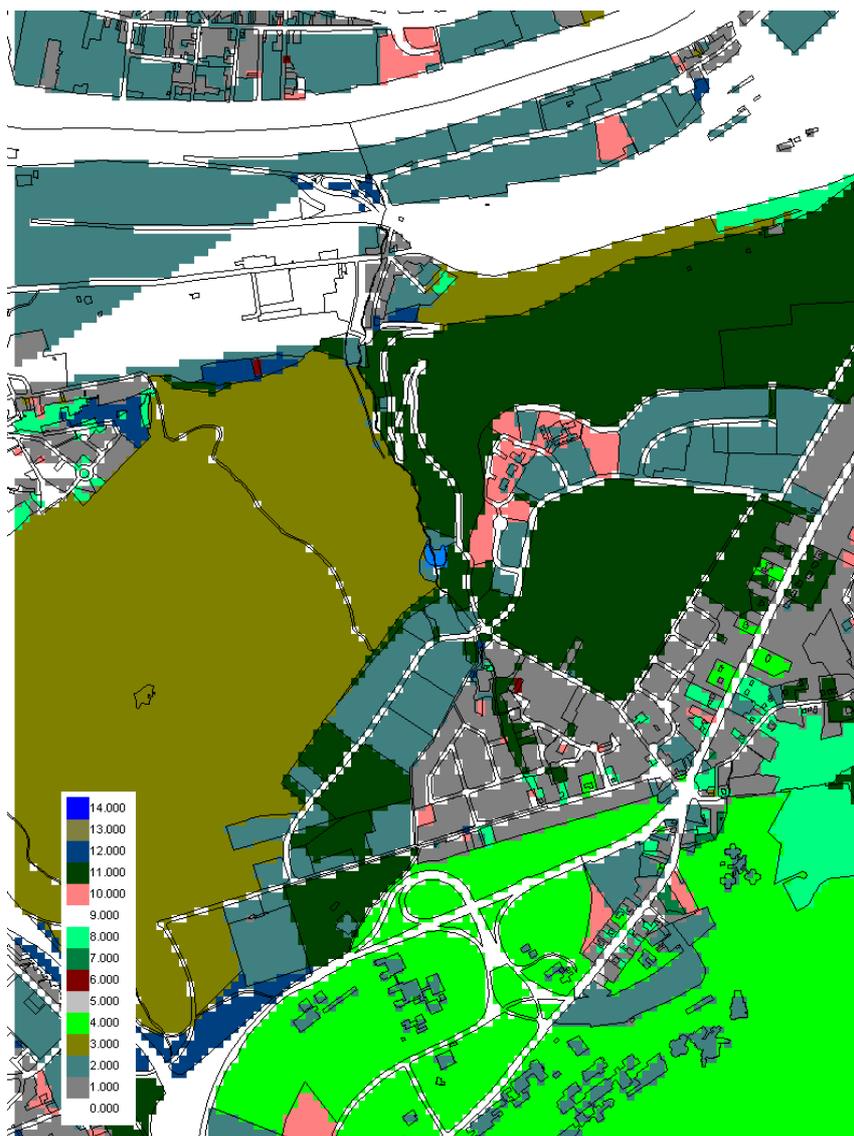


Figure 6-8 : COSW convertie selon la structure SCS

La seconde source d'information provient des données IGN Vectorielles (Top10vGIS). Ces cartes contiennent, entre autres, une base de données d'occupation du sol. Généralement, la précision de ces données est semblable à celle des COSW, à l'exception des zones urbanisées où les cartes IGNv fournissent une information locale bien plus détaillée. En effet, dans celles-ci, chaque bâtiment (ou groupe de bâtiments semblables jointifs) est représenté individuellement. Bien que ce niveau de détail soit un atout pour des aspects de gestion et d'analyse d'impacts, il soulève néanmoins la question de l'agglomération de ces données à la taille de maille hydrologique.

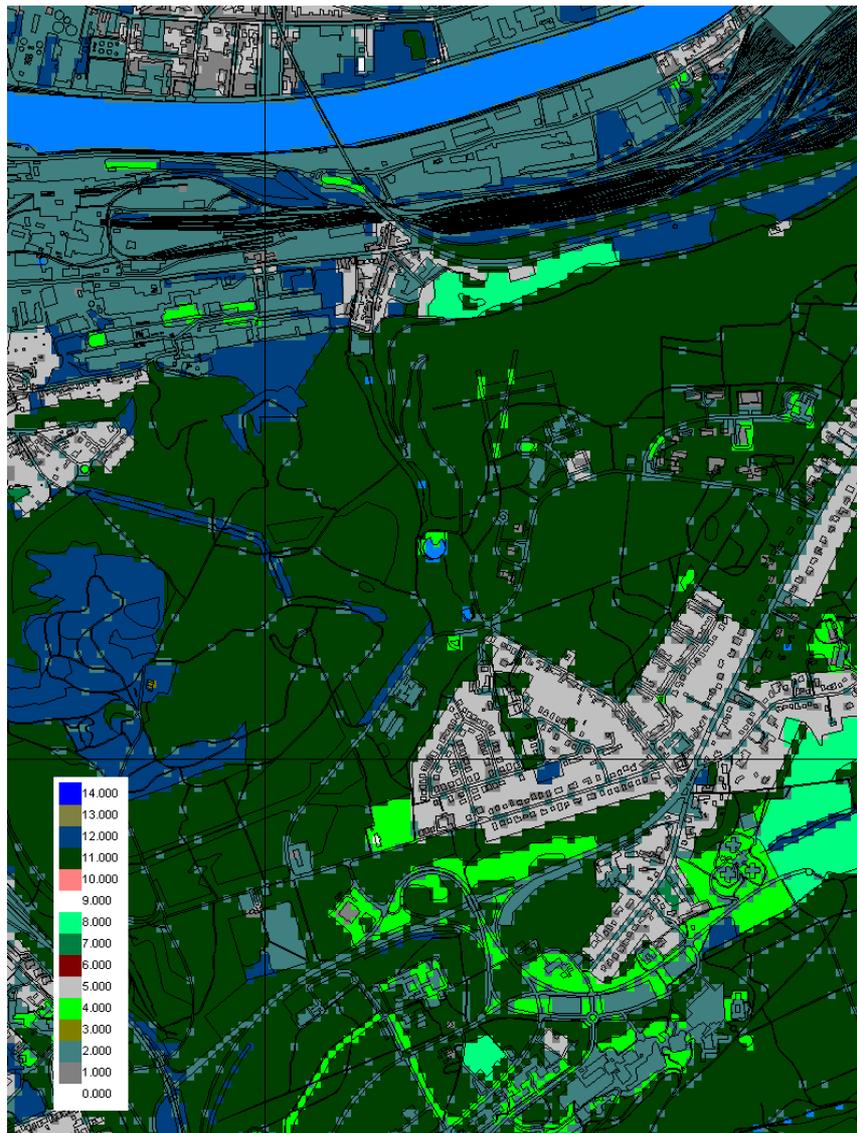


Figure 6-9 : Occupation du sol IGN convertie selon la structure SCS

Après reclassement dans le même système de référence (SCS), des différences sensibles peuvent être remarquées entre les deux sources de données. Il s'agit principalement de la non classification des zones publiques (cours d'eau, routes, ...) dans la COSW alors que l'IGN répertorie l'ensemble de l'espace géographique.

Néanmoins, la classification utilisée dans la COSW est très étendue et disponible pour l'ensemble de la Région Wallonne. Elle devrait devenir à court terme la référence pour l'occupation du sol et, pour ces raisons, sera utilisée dans l'ensemble des traitements futurs de cette étude.

En fonction de cette donnée, il est possible de faire une statistique et de comparer les trois bassins d'étude dès ce moment.

Deux classifications distinctes peuvent être envisagées :

- la classification SCS : 15 classes
- 3 catégories globales : terrains « artificialisés » (zones urbanisées, industrielles, ...), espaces « naturels » (forêts, prairies, cultures, ...), terrains imperméables (routes, plans d'eau, zones humides, ...)

Tableau 6-4 : Répartition de l'occupation du sol sur les trois bassins étudiés

		Renory	Blanc Gravier	Fond du Moulin
	Surface (Ha)	132	280	290
1	Terrain résidentiels	18,9%	3,4%	14,7%
2	Habitat et services	10,5%	8,2%	4,5%
3	Mines, décharges et espaces abandonnés	14,6%		
4	Espace vert artificialisés	7,6%	81,5%	29,8%
5	Autres terrains artificialisés			0,5%
6	Terres arables			0,6%
7	Cultures permanentes	1,1%		5,1%
8	Surfaces enherbées	0,1%	0,3%	
9	Friches agricoles	3,3%		0,6%
10	Forêts	33,1%		38,3%
11	Couvertures basses	0,1%	0,5%	
12	Roches nues			
13	Zones humides			
14	Eaux continentales	0,2%	0,1%	
15	Non classé	10,4%	5,9%	5,9%
	Terrains "artificialisés"	29,4%	11,7%	19,7%
	Espaces "naturels"	60,0%	82,4%	74,4%
	Terrains imperméables	10,7%	6,0%	5,9%

Le Blanc Gravier est sans conteste le bassin versant le plus naturel. A l'opposé, le bassin versant du Rénory est le plus anthropisé. Cela s'explique notamment par la présence du parc scientifique à son amont mais également de zones résidentielles. De plus, étant donné que sa superficie est la plus faible, la pression des routes, par exemple, est de suite beaucoup plus marquée.

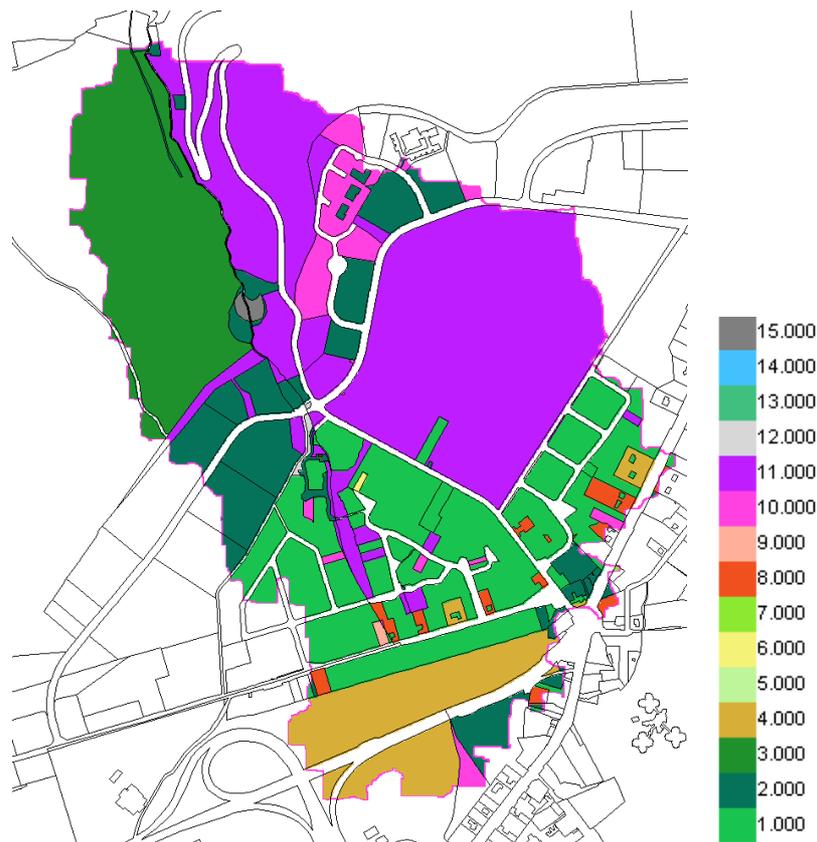
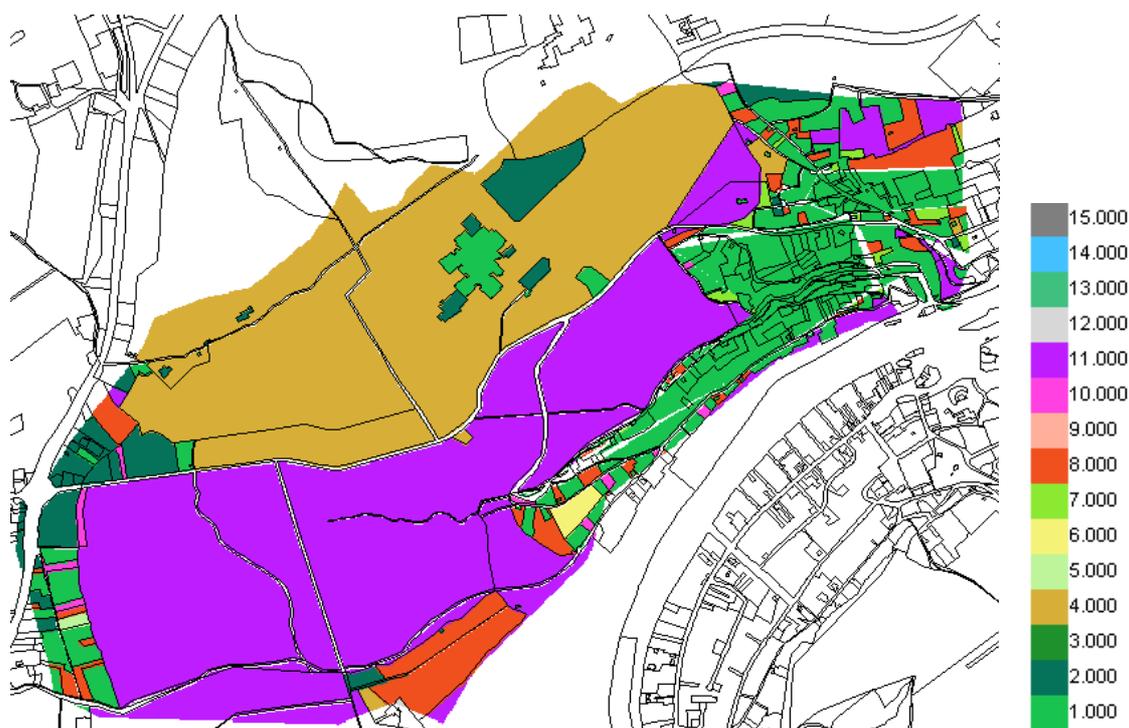


Figure 6-10 : Bassin de Rénoiry

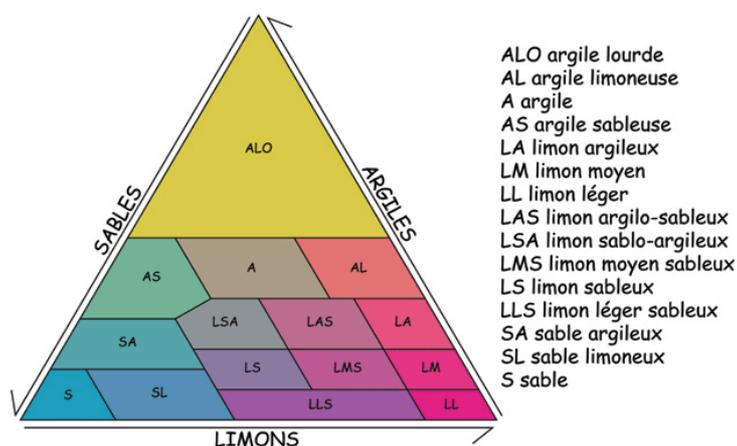


Figure 6-11 : Bassin versant du Blanc Gravier



4 - 5. Cartographie numérique des sols (PCNSW)

Dans un premier temps, la carte pédologique¹ va servir à connaître le type de sol près de la surface. Différentes caractéristiques vont alors pouvoir être extraites et utilisées pour alimenter la loi d'infiltration.



¹ Données extraites du PCNSW (Projet de Cartographie Numérique des Sols de Wallonie), projet piloté par la Direction Générale de l'Agriculture (Ministère de la Région wallonne) et mis en œuvre par la Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux.

Il existe des fonctions de pédotransfert permettant de déterminer les paramètres nécessaires en fonction du type de sol. Notons cependant que cela n'est pas trivial, car les classes de sol utilisées dans les cartes pédologiques ne sont pas nécessairement identiques à celles utilisées dans ces fonctions de pédotransfert. Parmi les propriétés extraites, on notera la porosité du sol, le coefficient de perméabilité, le paramètre de succion,...

Comme l'a démontré le chapitre C.2 (« Contexte géologique et hydrogéologique »), il est impossible d'obtenir ces paramètres avec une précision absolue suffisante. Deux sols d'une même classe peuvent posséder des propriétés fortement différentes, ce qui laisse une marge de variabilité importante. Etant donné qu'aucune mesure hydrodynamique et hydrogéologique n'est disponible pour caler précisément ce modèle, le choix de valeurs moyennes pour chaque classe sera effectué initialement. Elles seront ensuite revues si les ordres de grandeurs obtenus ne peuvent être validés par les calculs menés via d'autres approches et les observations de terrain.

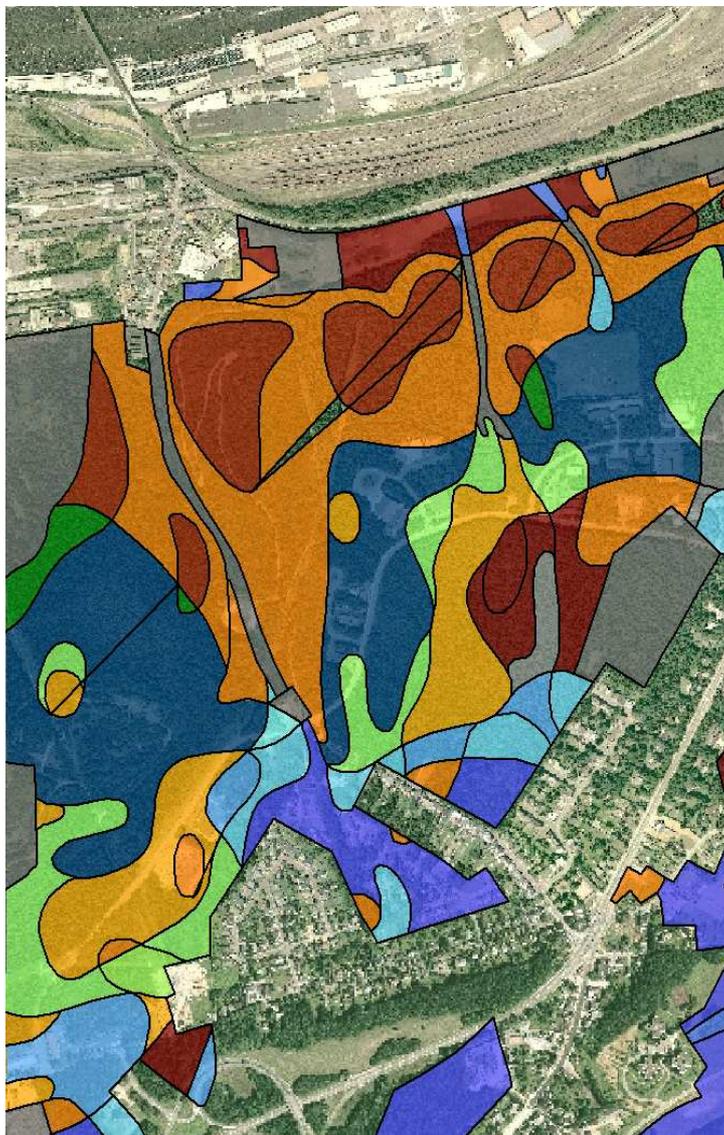


Figure 6-14 : Carte pédologique pour le bassin du Rénoiry

4 - 6. Cartes de perméabilité

Grâce à la combinaison des cartes précédentes et des données fournies par les autres équipes, il est possible d'établir une carte spatialisée de perméabilité prenant en compte l'occupation du sol. Il s'agit ici du coefficient de perméabilité à utiliser dans la formulation de Green-Ampt compte tenu des différents paramètres en jeu.

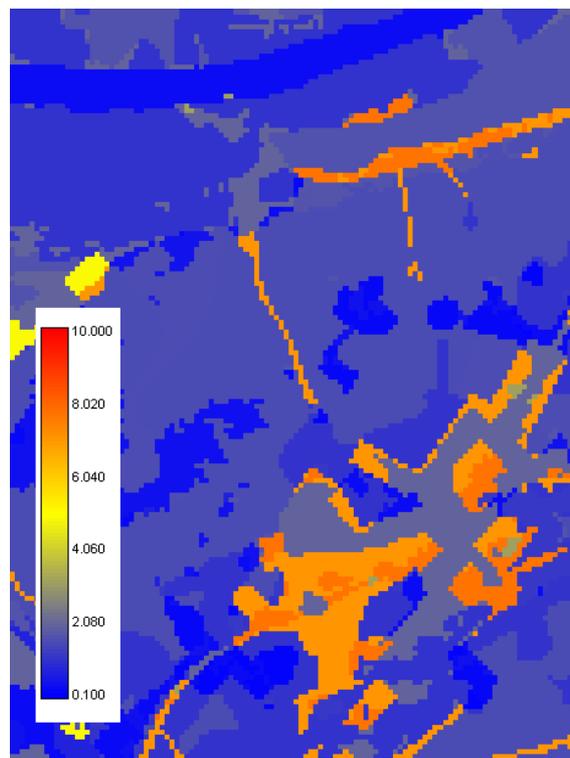


Figure 6-15 : Répartition des coefficients de perméabilité sur le bassin de Rénory

4 - 7. Détermination du bassin versant

Sur base du modèle numérique de terrain et en accord avec les hypothèses de modélisation et de résolution numérique du logiciel, il est possible de déterminer les chemins de ruissellement diffus sur l'ensemble de la carte. Ces voies d'écoulement sont représentatives des tracés naturels sur les bassins versants. Elles peuvent cependant être fortement remaniées ou totalement déviées par la pression anthropique. C'est notamment le cas pour le ruisseau de Rénory qui continue sa course en pertuis sous la rue du Sart Tilman. Néanmoins, c'est sur cette base que la plupart des modèles hydrologiques déterminent le bassin versant pour un exutoire donné.

Pour ce cas d'étude, l'exutoire retenu est l'entrée de ce pertuis. La surface du bassin considéré est donc de 132 ha.

La partie aval non modélisée du bassin versant est entièrement urbanisée et de faible largeur. De plus, vu les sédiments charriés lors de l'événement de mai 2008, le comportement réel du pertuis ne peut être connu.

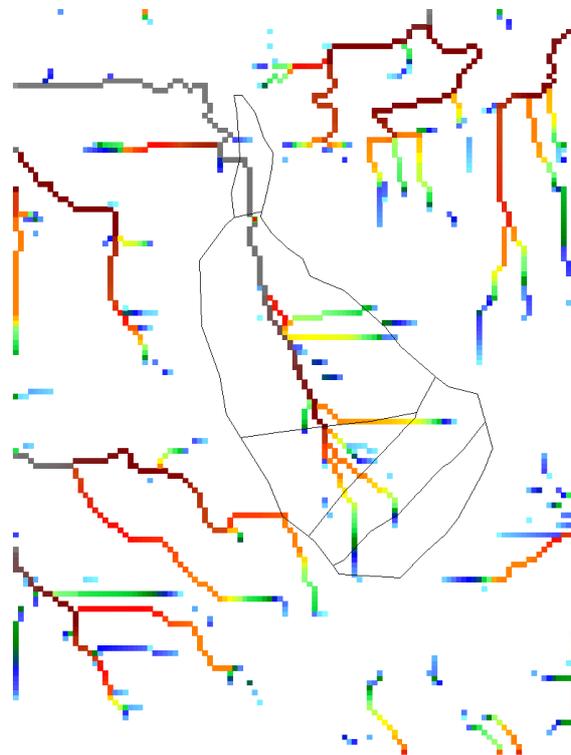


Figure 6-16 : Réseau de convergences hydrauliques pour le bassin versant de Rénory

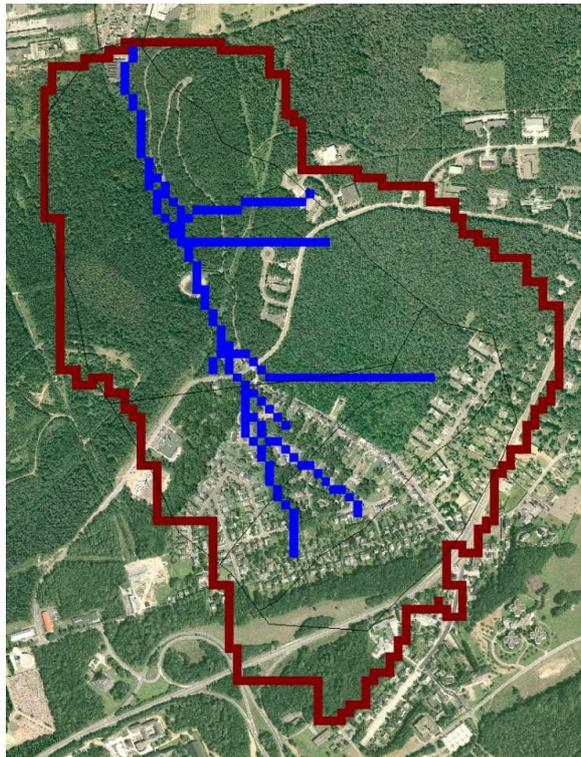


Figure 6-17 : Bassin versant lié à l'entrée du pertuis de Rénory

Une comparaison du bassin versant ainsi déterminé peut être réalisée avec les contours vectoriels utilisés dans les autres chapitres. Des différences parfois importantes peuvent survenir entre ces éléments. En effet, il faut garder à l'esprit que chaque bassin a principalement été déterminé sur une base topographique. Des modifications dans la précision de ces données a donc une influence directe sur le résultat.

Une fois que le bassin versant est connu, il peut servir de masque pour l'ensemble des autres données numériques discrétisées.

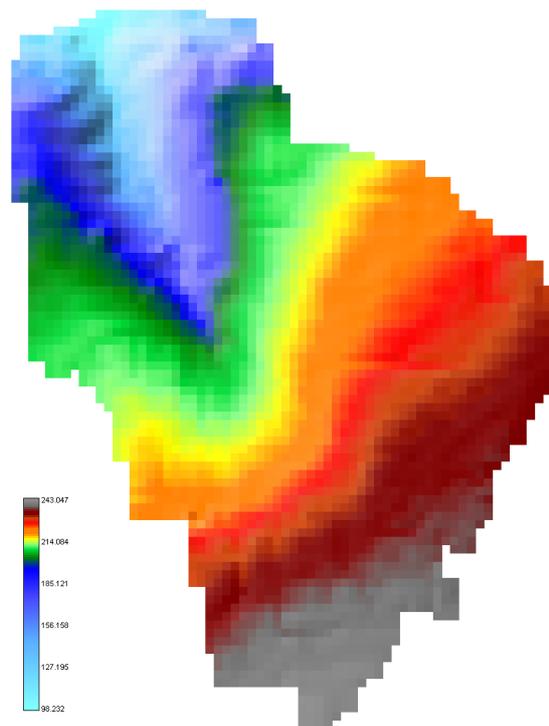


Figure 6-18 : Topographie restreinte du bassin versant du Rénory

Outre la partie aval non modélisée du bassin, un effet anthropique est par exemple lié aux canalisations d'égouttage qui peuvent être appréhendées grâce aux **Plans d'Assainissement par Sous-bassins Hydrographiques (PASH)** disponibles via le site cartographique de la Région Wallonne. Dans ce cas, il apparaît clairement que l'ensemble de la zone urbanisée de la partie amont du bassin est égouttée via un réseau se regroupant en un collecteur unique globalement parallèle au fond de vallée et donc au ruisseau.

Il n'est pas mentionné d'indication sur les interconnexions possibles de ces collecteurs avec les deux bassins d'orage présents sur le site.

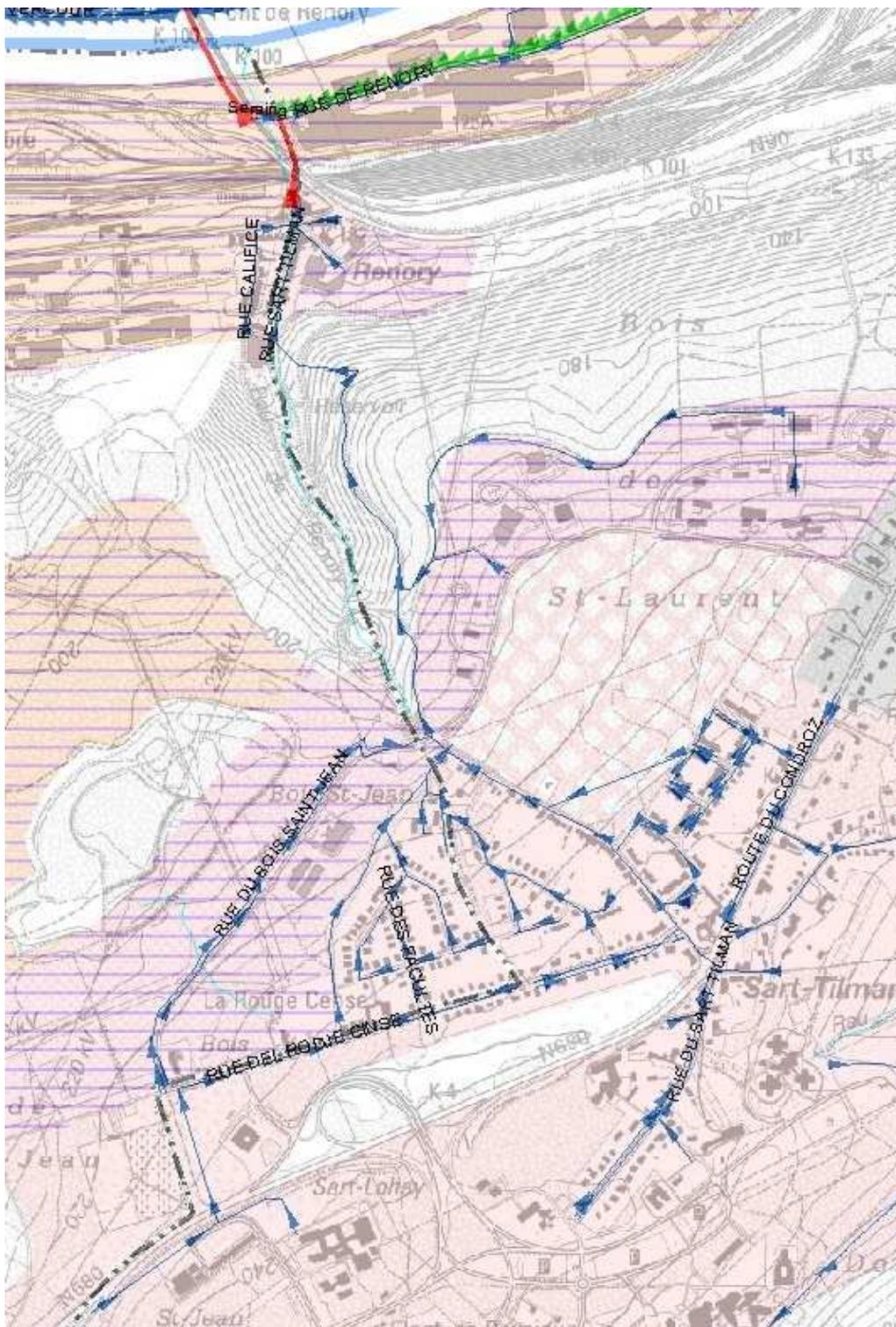


Figure 6-19 : Extrait des PASH pour le bassin versant du Rénoiry

4 - 8. Pentes

Une analyse des pentes locales peut être réalisée de manière distribuée sur le bassin. Elle apporte donc des renseignements additionnels par rapport au chapitre précédent (voir paragraphe C.5 - 2 : « Levés topographiques »).

Globalement, le bassin versant présente une croissance des pentes locales de l'amont vers l'aval. La pente locale moyenne est élevée (10,2 %) avec un écart-type de 0,1226. La pente médiane est quant à elle de 5%.

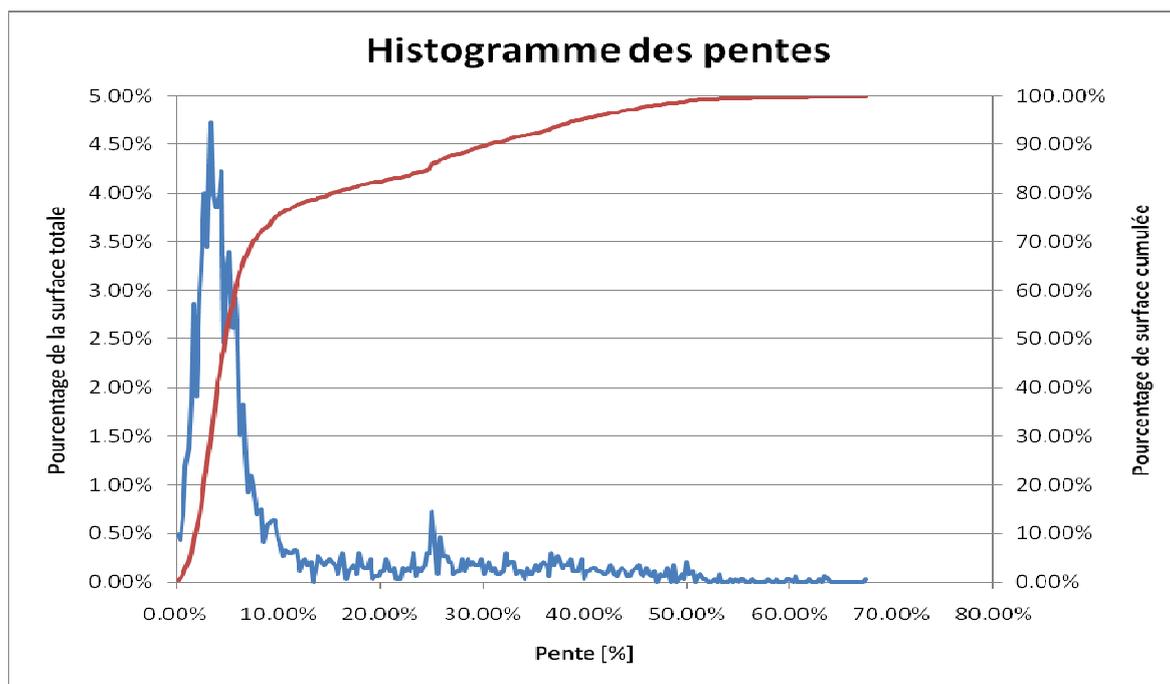


Figure 6-20 : Histogramme des pentes pour le bassin versant du Rénoy

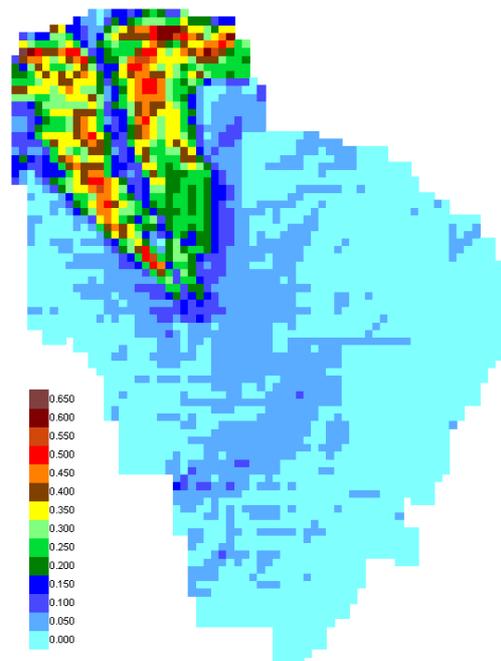


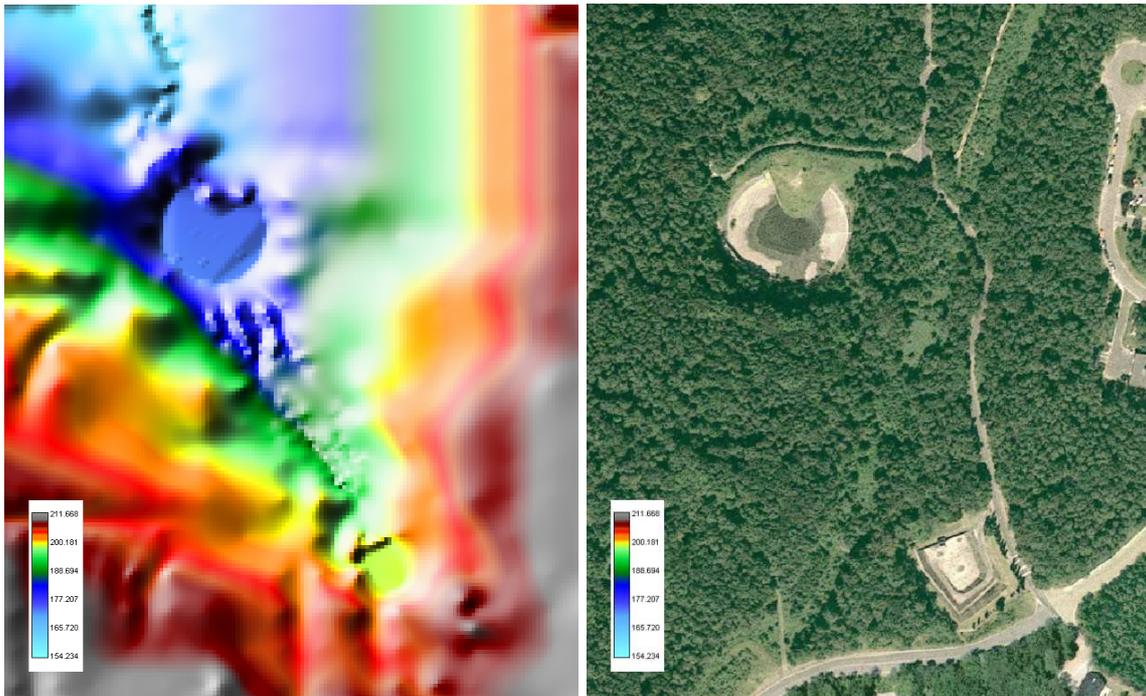
Figure 6-21 : Distribution spatiale des pentes sur le bassin versant du Rénoiry

La distribution des pentes présentes dans la partie amont est sensiblement moins marquée que dans la partie aval. Du point de vue dynamique de transfert, des différences marquantes peuvent dès lors être attendues vis-à-vis d'un bassin versant présentant des pentes plus homogènes. Cela est d'autant plus vrai dans ce cas que les zones les plus productives de ruissellement (zones urbanisées) sont situées à l'amont. Les flux produits pourraient donc être « utilement » ralentis.

Du point de vue des conditions limites à imposer au modèle, la présence de pentes fortes à l'exutoire permet d'y laisser un écoulement libre vu son caractère supercritique. Il est ainsi seulement dépendant des caractéristiques provenant de l'amont et les conditions d'écoulement en aval n'auront donc pas d'influence sur lui. Cette remarque est valable pour les trois bassins étudiés.

4 - 9. Ouvrages de protection existants - Bassins d'orages

Deux bassins d'orages sont situés à l'intérieur de la zone d'étude de Rénoiry. Leurs dimensions respectives ainsi que les relations de cubage peuvent être déduites des informations topographiques sur le maillage d'une résolution de deux mètres de côté généré par l'équipe de géométrie.



**Figure 6-22 : Représentation des bassins d'orages sur le Rénoiry :
Vue ombrée de la matrice de topographie à une résolution de 2 m
Vue aérienne extraite des PPNC**

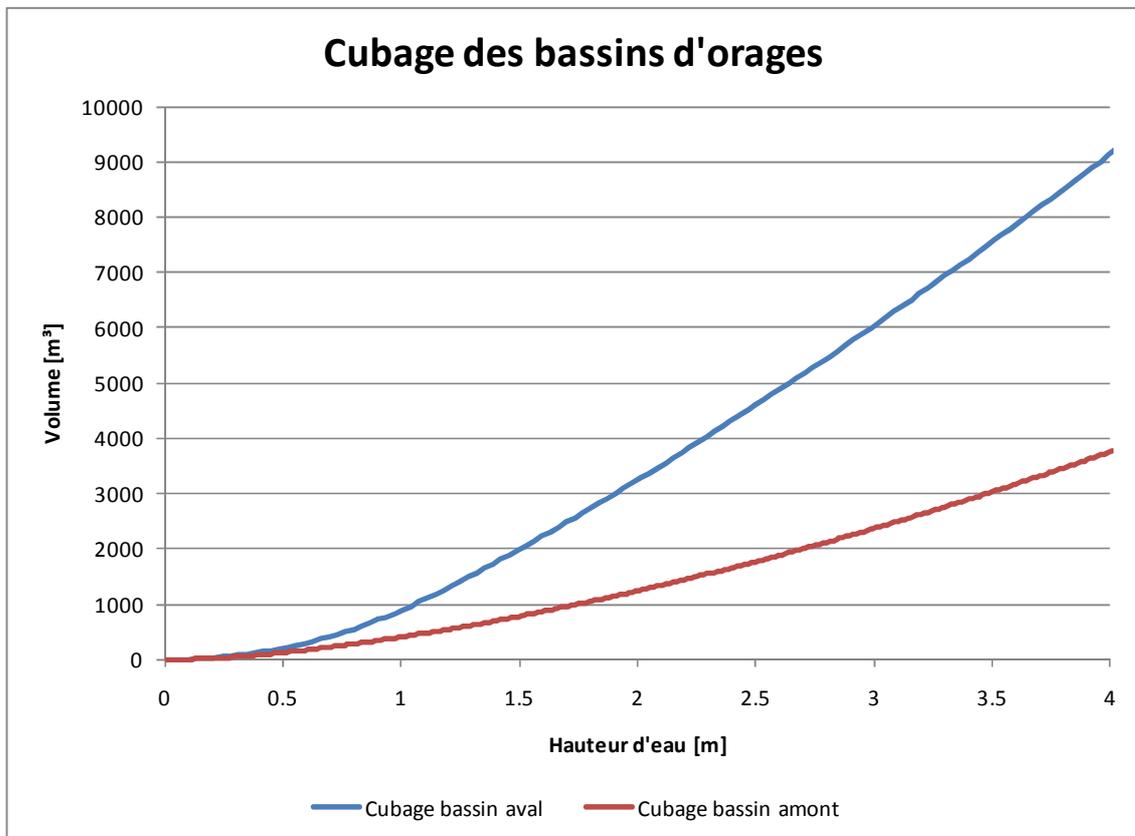


Figure 6-23 : Cubage des bassins d'orage sur le Rénoiry

Pour le bassin aval, la hauteur maximale de retenue a été levée à une valeur de 4.00 m. Le volume stockable est donc de l'ordre de 10 000 m³ pour une superficie de bassin versant de 60 ha.

Pour le bassin amont, la hauteur maximale a été levée à une valeur de 3,70 m. Le volume stockable est donc de l'ordre de 3400 m³ pour une superficie de bassin versant de 35 ha.

	Capacité maximale estimée
Bassin d'orages aval	10000 m ³
Bassin d'orage amont	3400 m ³

Un premier calcul simplifié peut déjà être mené à ce stade.

Sur base des superficies drainées par chaque bassin d'orage, il est possible d'en déduire un volume cumulé de pluies sur l'ensemble de la précipitation :

Volume total de pluie	Volume estimé avec un coefficient de 0.3
54840 m ³	16452 m ³
31295 m ³	9389 m ³

En appliquant un coefficient de production moyen de 0.3, les volumes ainsi déterminés sont largement supérieurs aux volumes stockables dans chacun des bassins, qu'ils soient pris individuellement ou de manière combinée.

En faisant fi des temps de transfert, il est donc probable que les bassins d'orages, qu'ils soient parfaitement fonctionnels ou non, seront dépassés par les volumes engendrés par l'événement du 29 mai.

4 - 10. Partie urbanisée aval du bassin

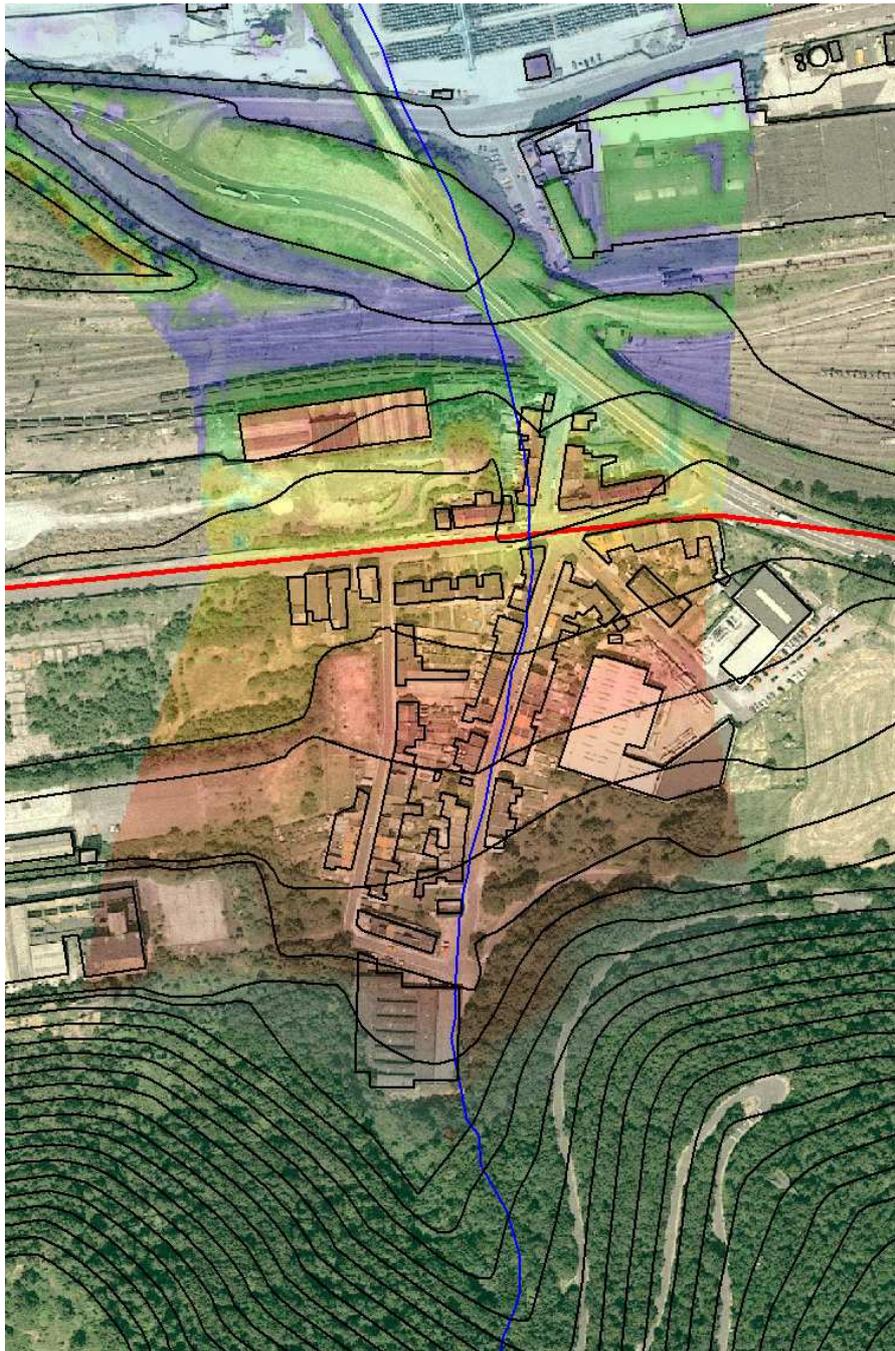


Figure 6-24 : Partie urbanisée en aval du bassin versant du Rénory

La rue du Sart Tilman, dans la partie urbanisée aval du bassin versant, présente une forte pente d'environ 8% de moyenne. Lors de l'événement, cette rue a été délavée comme l'illustre les photos prises à ce moment (voir figure 6-26).

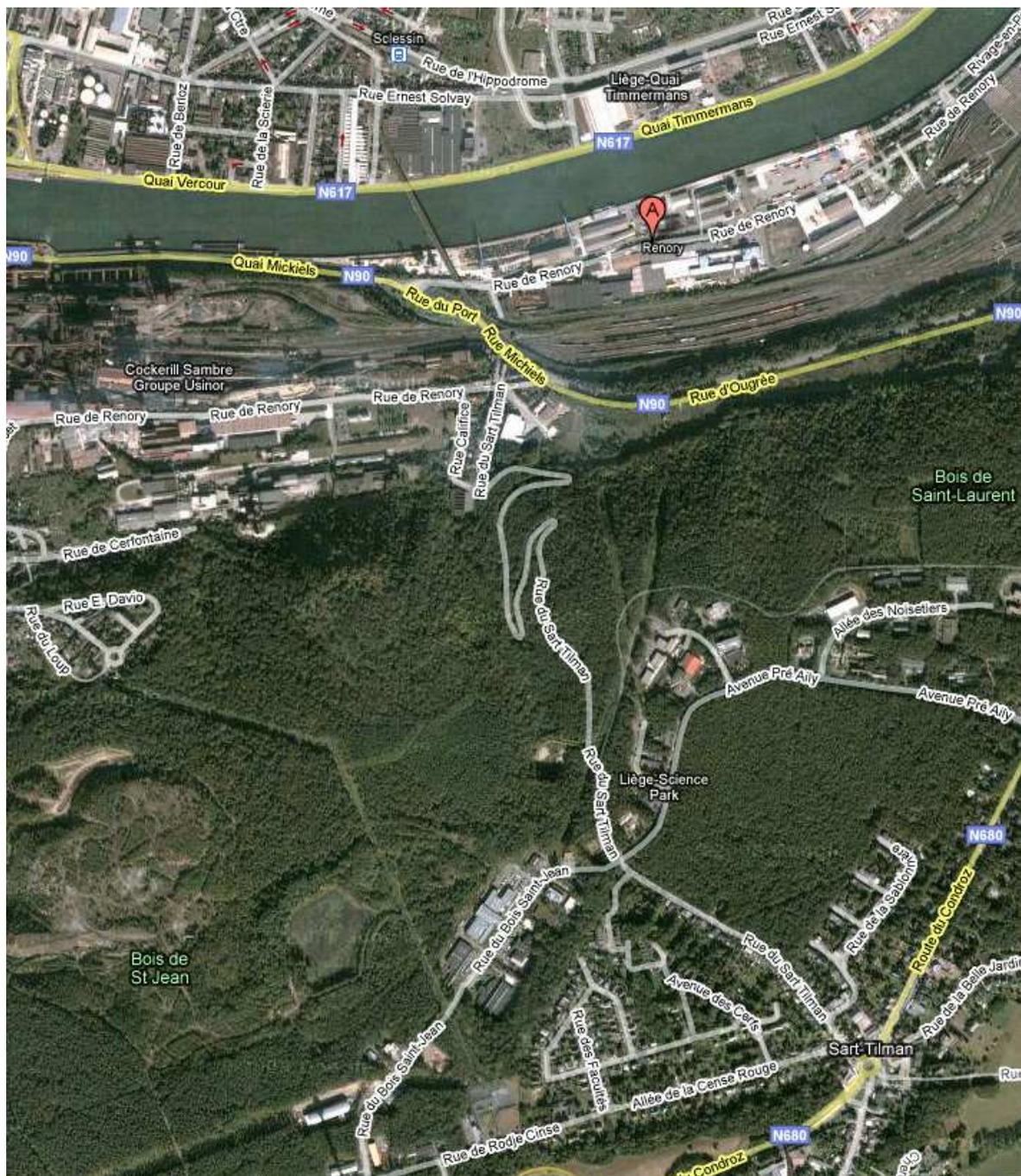


Figure 6-25 : Vue aérienne de la zone urbaine du bassin versant du Rénoiry (source GoogleMap)



Figure 6-26 : Images de l'inondation du 29 mai 2009

Pour se fixer un ordre de grandeur du débit rencontré à cet endroit, un calcul simplifié peut également être mené. Etant donné que l'écoulement est torrentiel (pente de 8%), il s'agit d'estimer le débit correspondant pour une hauteur d'eau uniforme.

Avec comme hypothèse un coefficient de frottement de Strickler de 50, il est possible de calculer le débit en fonction de la hauteur d'eau et de la largeur mobilisée avec un maximum de 20 m, environ deux rues.

Tableau 6-5 : Estimation du débit [m³/s] en fonction de la hauteur d'eau et de la largeur mobilisée selon une loi de hauteur uniforme

		L [m]						
		3	4	5	6	7	14	20
h [m]	0,05	0,08	0,11	0,14	0,16	0,19	0,38	0,54
	0,1	0,26	0,34	0,43	0,52	0,60	1,20	1,72
	0,15	0,51	0,68	0,84	1,01	1,18	2,36	3,38
	0,2	0,82	1,09	1,36	1,64	1,91	3,82	5,45

Ce calcul initial permet de fixer un débit probable de plusieurs m³/s à cet endroit en complément des transferts passant toujours par le pertuis.

4 - 11. Modélisation hydrologique de mai 2008

Une fois que l'ensemble des données a été traité pour générer le modèle hydrologique, le hyétogramme correspondant à l'événement de mai 2008 peut être entré comme donnée de pluie et simulé.

Par défaut, les deux bassins sont supposés être pleinement fonctionnels et avoir un débit passant de 0,5 m³/s. Ce débit limité peut sembler sécuritaire pour l'aval mais oblige le bassin à stocker très rapidement ce qui peut l'amener à se remplir trop vite et donc à ne plus être efficace lors du pic de crue. Dans le cas de l'événement considéré, avec de très gros volumes ruisselés, le comportement de chaque bassin devra ainsi être analysé à la lumière d'une étude de sensibilité.

Etant donné que le modèle utilisé est spatialement distribué, les débits peuvent être obtenus en chaque point du réseau drainant. Les résultats seront ici présentés en trois points caractéristiques :

- aval du bassin versant (entrée du pertuis et amont de la rue du Sart Tilman) ;
- aval direct des deux bassins d'orage.

Aucune mesure directe ne permet de valider objectivement les hydrogrammes générés. Il est ainsi obligatoire de tester l'influence de différents paramètres sur les résultats des simulations de manière à obtenir une vision réaliste du phénomène. Dans cet objectif, plusieurs scénarios ont été modélisés :

- bassin versant avec deux bassins d'orages pleinement fonctionnels et initialement vides ;
- bassin versant sans aucun système de protection ;
- dysfonctionnement du seul bassin amont (pas de stockage et donc transfert immédiat du débit) ;

- dysfonctionnement du seul bassin aval (pas de stockage et donc transfert immédiat du débit) ;
- débit de laminage de chaque bassin de 1 m³/s ;
- section transversale de rivières plus large, ce qui conduit à un écrêtement en long plus important ;
- coefficient de frottement de Manning majoré en vue de tester un sol plus rugueux.

Pour rappel, le hétérogramme modélisé est le suivant :

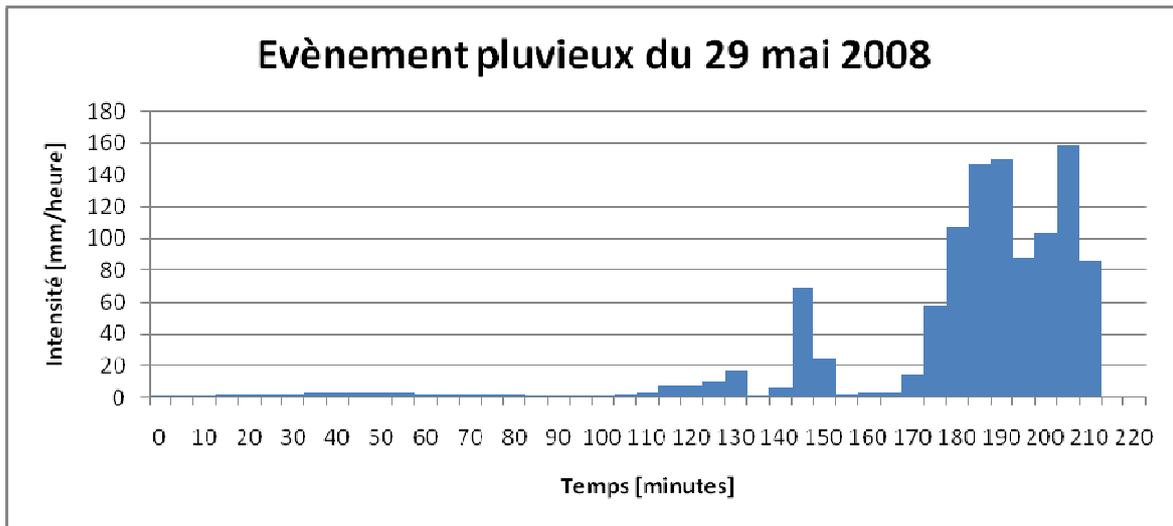


Figure 6-27 : hétérogramme modélisé de l'événement pluvieux du 29 mai 2008

Les résultats pour chaque scénario sont synthétisés dans les hydrogrammes des figures 6-28 à 6-30.

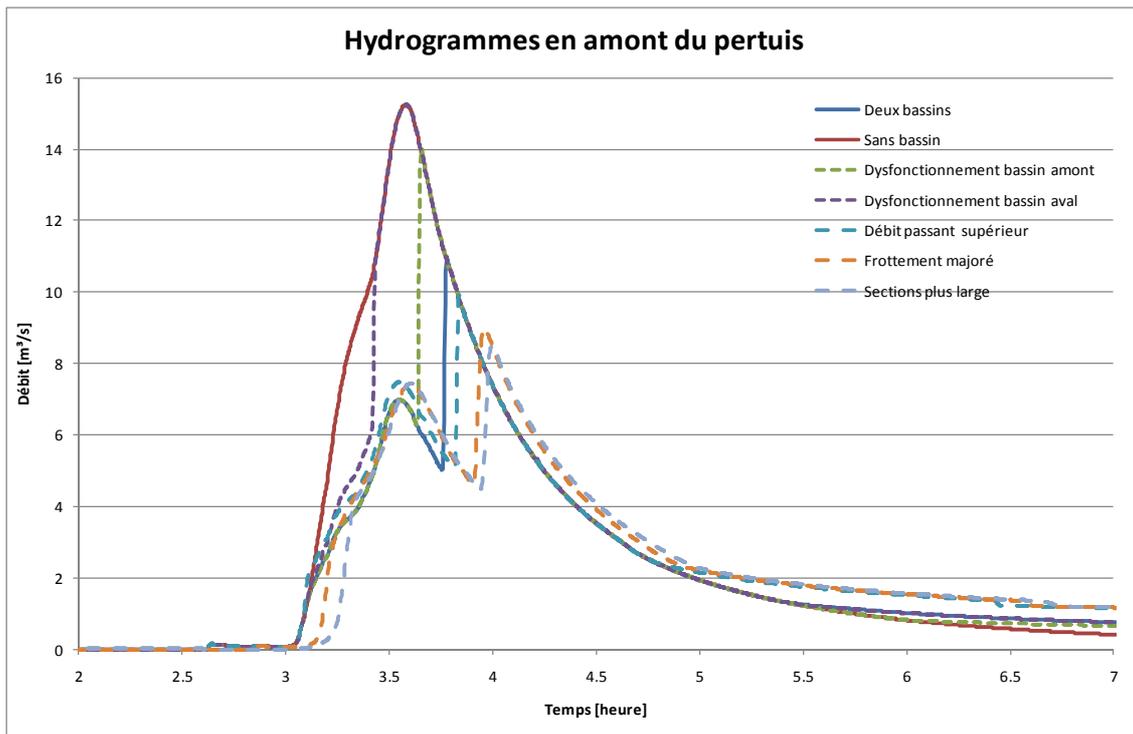


Figure 6-28 : Hydrogrammes en amont du pertuis

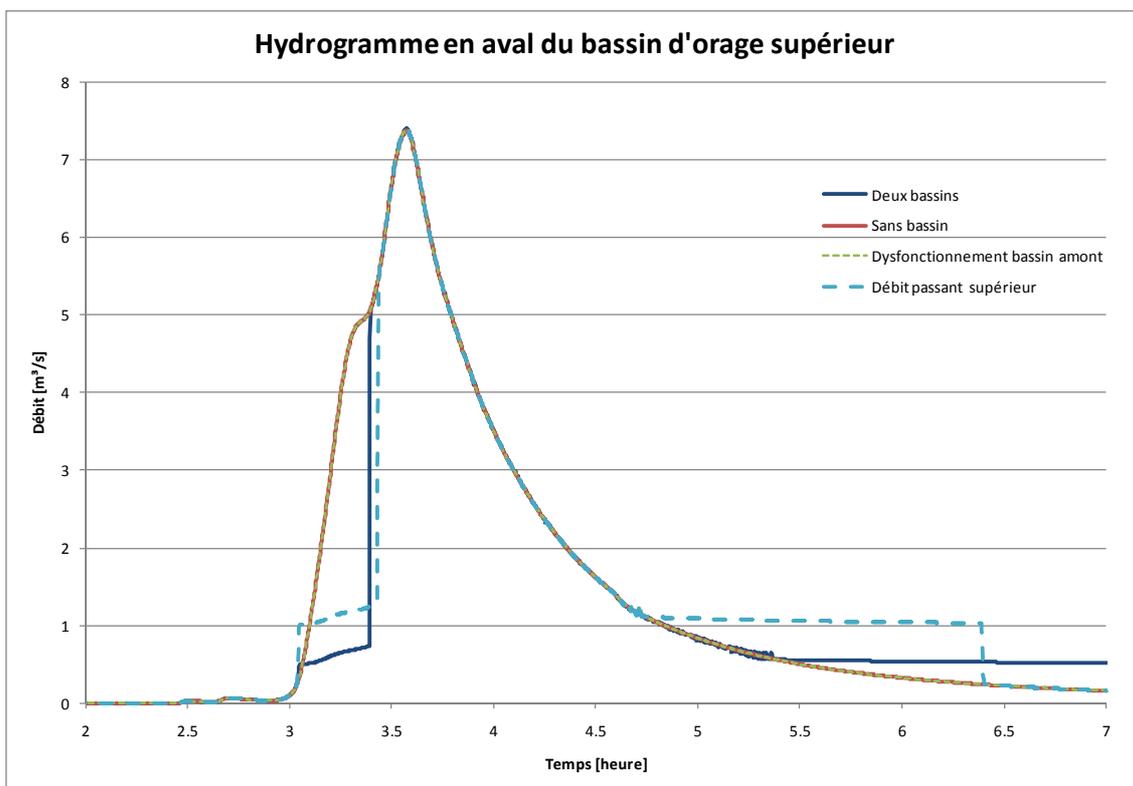


Figure 6-29 : Hydrogrammes en aval du bassin d'orage supérieur

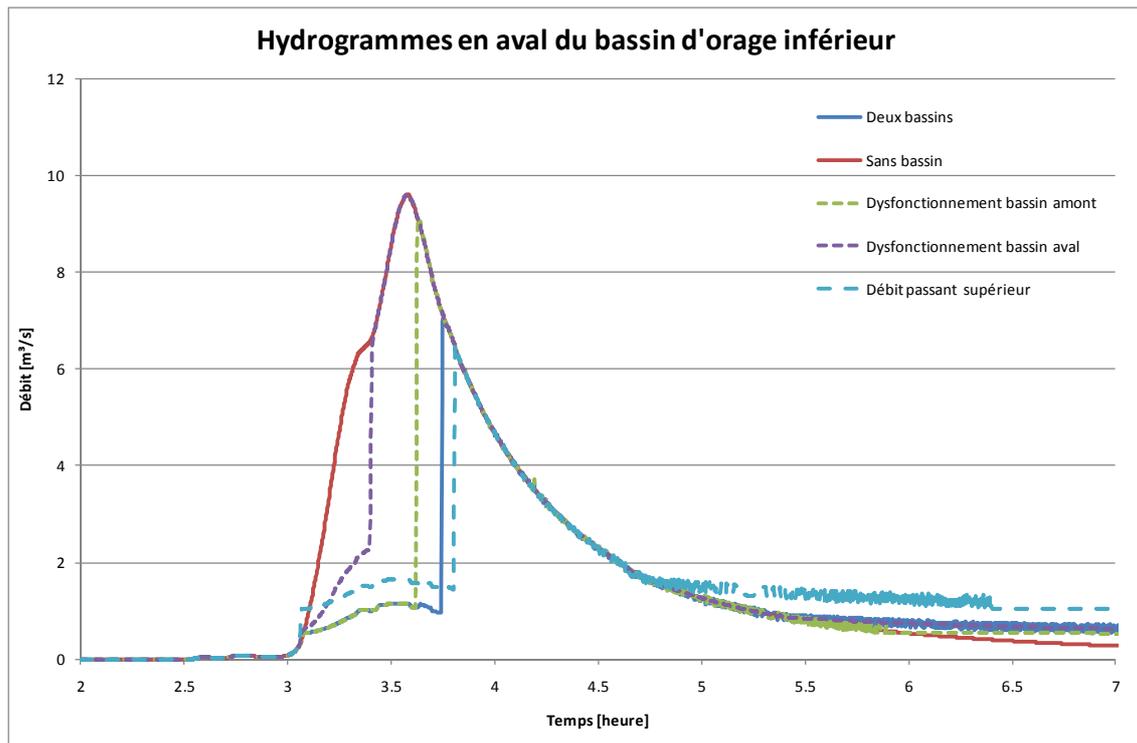


Figure 6-30 : Hydrogrammes en aval du bassin d'orage inférieur

Les observations suivantes peuvent être réalisées :

- aucun débit significatif n'est produit avant le début de la 3^{ème} heure de modélisation alors qu'environ 20% de la pluie est déjà tombée. Ce phénomène provient de l'humidification progressive du sol qui ne génère de ruissellement qu'une fois que sa capacité d'absorption est dépassée. Pour rappel, des conditions normales d'humidité antérieure sont employées dans les modélisations ;
- la partie la plus importante de l'événement va donc se produire sur un sol déjà humide et donc conduire très rapidement à du ruissellement ;
- la montée en crue est rapide et le pic apparaît après environ 40 minutes ce qui correspond à la durée effective de la pluie intense ;
- dans l'hydrogramme sans moyen de protection, une cassure est présente dans la courbe de montée en crue. Elle est très probablement due aux portions de bassin versant présentant des pentes sensiblement différentes ;
- la décroissance, avec une dynamique plus lente caractéristique, s'étale sur environ 3 heures pour revenir à une intensité faible.

Une analyse des scénarios montre que :

- sans présence de bassins d'orages, le pic de crue estimé est d'environ 15 m³/s ;
- dans le scénario comprenant les bassins d'orages pleinement fonctionnels, le pic de crue est réduit à environ 11 m³/s ;
- alors qu'après les 40 premières minutes de montée en crue, le débit plafonnait à 7 m³/s, les bassins se sont totalement remplis et n'ont donc pas pu continuer à jouer leur rôle d'écrêtement. Le plein débit a donc été retrouvé à

l'aval mais heureusement après que la pluie se soit arrêtée et donc en phase de décrue ;

- les scénarios de dysfonctionnement sont également révélateurs. En cas de dysfonctionnement du bassin inférieur, le plus grand en volume, le remplissage est atteint avant le pic de crue et la valeur maximale n'est donc pas modifiée. Pour l'autre scénario, le volume est juste suffisant pour passer le pic de crue mais fournit tout de même une valeur de $14 \text{ m}^3/\text{s}$;
- une augmentation du débit passant à chaque bassin illustre que, si le pic de débit intermédiaire est logiquement supérieur de $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$, le remplissage total est retardé ce qui permet d'atteindre un pic maximal de $9.7 \text{ m}^3/\text{s}$ puisque la décrue peut se poursuivre un peu plus longtemps ;
- le raisonnement est similaire dans les deux configurations de frottement majoré ou de sections transversales plus importantes. Dans chaque cas, le stockage temporaire est accru mais n'empêche aucunement d'obtenir un remplissage total des deux bassins d'orages. Les pics modélisés sont respectivement de 8.8 et $8.2 \text{ m}^3/\text{s}$;
- les deux derniers scénarios précédents démontrent que le modèle ne présente pas une grande sensibilité à ces deux paramètres.

En comparaison des ordres de grandeurs de débit déjà présentés dans le rapport (voir tableau 5-2 et tableau 5-3), les pics obtenus par WOLF HYDRO sont tout à fait concordants. Ces éléments permettent donc de valider globalement l'approche proposée.

L'avantage déterminant du modèle est qu'il fournit une information temporelle et permet une étude de sensibilité utile à la compréhension du phénomène extrême.

4 - 12. Modélisation hydrologique de pluies de projet

Pour permettre une analyse objective de l'événement subi, il est possible de modifier le scénario de pluies sur le bassin versant de Rénory en se définissant des pluies de projet possédant une récurrence fixée, approche habituelle dans les études d'inondation.

Ces pluies de projet peuvent être établies à partir des courbes IDF qui lient l'intensité moyenne d'une pluie avec la durée de celle-ci, pour une récurrence donnée.

Plus d'une méthode permet de construire ces pluies (pluies courtes et intenses, pluies moins intenses mais plus longues,...). La seule contrainte est que le hyétogramme envisagé doit avoir une forme telle qu'il possède la même récurrence quelle que soit l'intervalle de pluie considéré.

Plusieurs récurrences ont été envisagées pour tester la sensibilité du bassin versant :

- 200 ans ;
- 100 ans ;
- 50 ans ;
- 20 ans.

Par similarité de l'événement de mai 2008, une valeur de deux heures est choisie comme durée totale de pluie et permet de construire les hyétogrammes suivants :

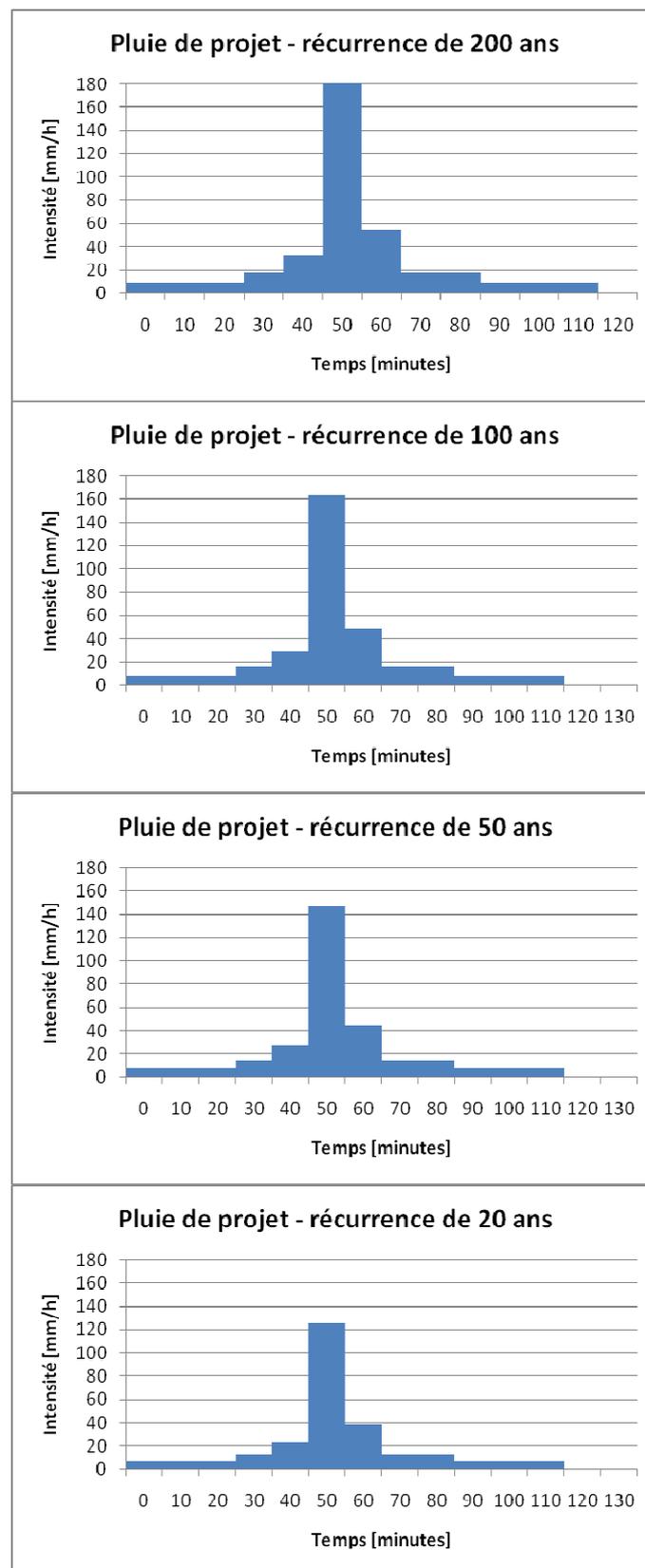


Figure 6-31 : Pluies de projet pour différentes récurrences

La réponse du bassin versant à son point aval est synthétisée dans le graphe suivant :

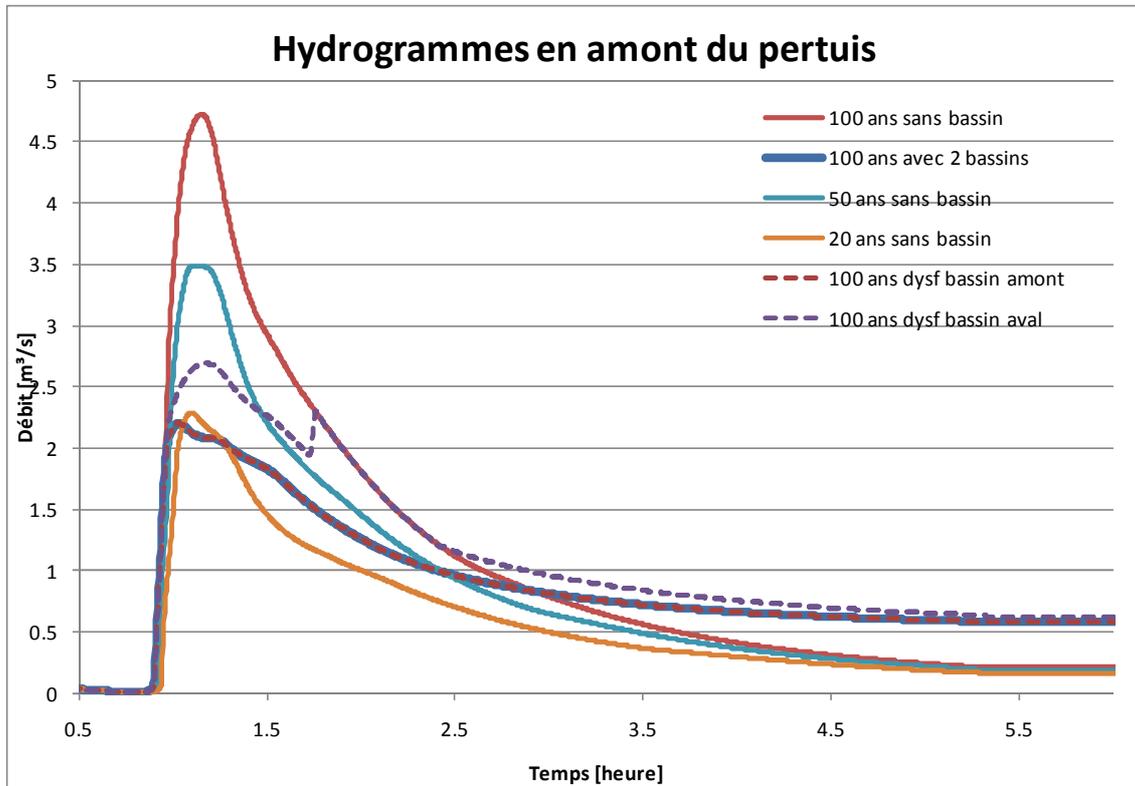


Figure 6-32 : Hydrogrammes en amont du pertuis pour les scénarios envisagés

Tout comme pour l'événement réel, plusieurs observations peuvent être réalisées :

- si les bassins d'orages ne sont pas pris en compte, les pics de crue pour les récurrences de 100, 50 et 20 ans sont respectivement de 4.7, 3.5 et 2.2 m³/s. Ces valeurs sont à comparer aux 15 m³/s pour le même scénario de mai 2008.
- Deux scénarios additionnels, pour la récurrence de 100 ans, modélise une prise en compte des deux bassins ou d'un seul bassin. Les pics sont alors de l'ordre de grandeur de 2.5 m³/s. La modélisation tend à démontrer que la présence ou non du bassin amont n'a pas d'influence sur le pic obtenu, le seul bassin aval pouvant stocker le volume nécessaire sans être limitant. Par contre, le bassin amont est quant à lui situé légèrement trop haut et a une capacité insuffisante pour ce type d'événement. Il est bon cependant de rappeler que la plupart des bassins d'orages ne sont pas prévus pour une période de retour aussi élevée.

4 - 13. Coefficients de production moyens

Les coefficients de production moyens correspondent au rapport entre le volume total de l'hydrogramme passant à l'exutoire et le volume de pluie tombée.

Ce coefficient permettra de comparer entre eux les 3 bassins étudiés.

Tableau 6-6 : Coefficients de production moyens pour le bassin du Rénory

	Volume hydrogramme (m ³)	Volume pluie (m ³)	Coefficient de production
100 ans	20256	74844	0,27
50 ans	16213	67452	0,24
20 ans	11492	58080	0,20
Mai 2008	53461	121770	0,44

5. Bassin du Blanc Gravier

5 - 1. Topographie

En utilisant la même démarche que celle présentée pour le bassin de Rénory, le bassin versant correspondant à l'aval du Blanc Gravier peut être déterminé. Sa surface totale est de 280 ha.

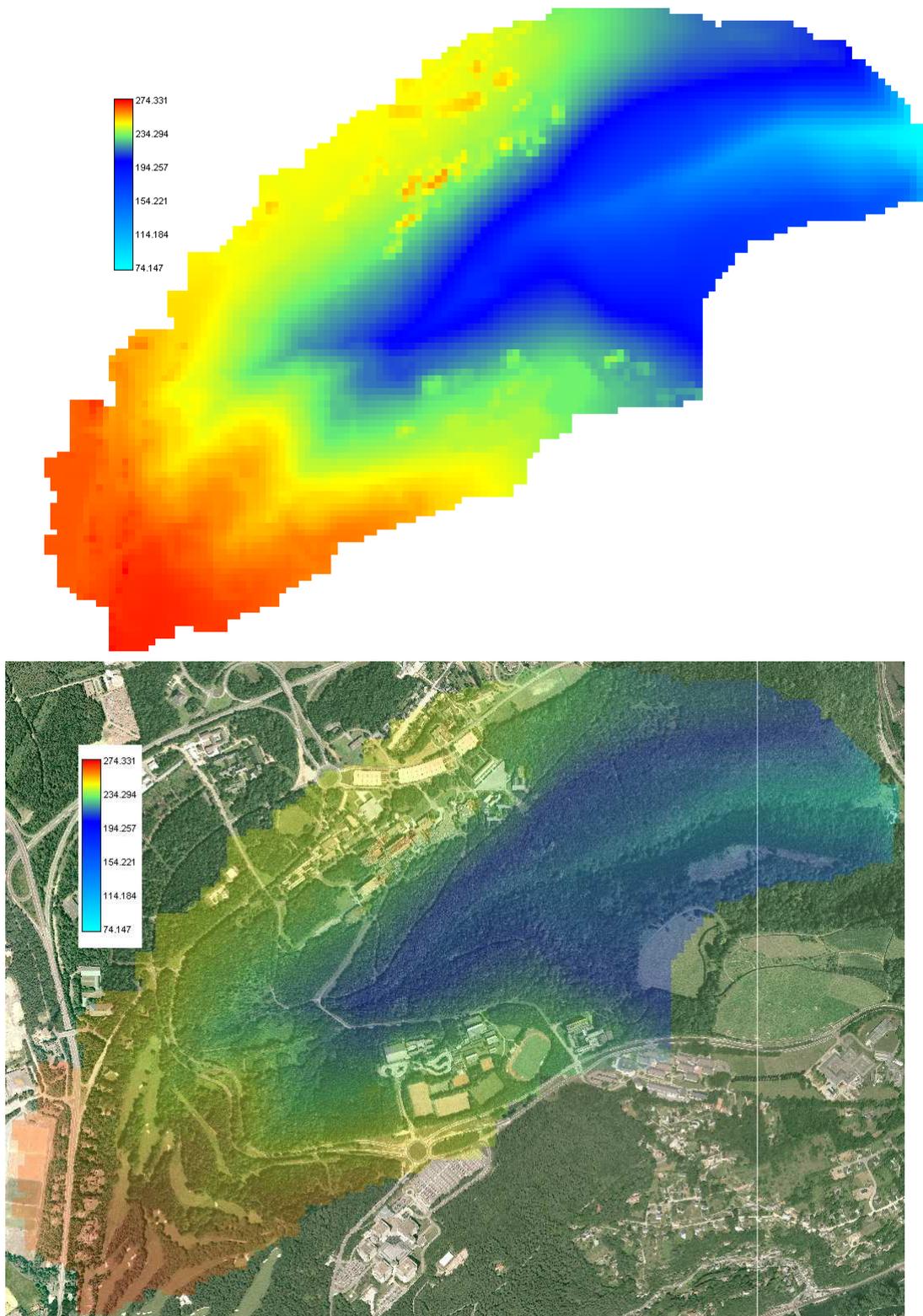


Figure 6-33 : Topographie et superposition aux PPNC pour le bassin du Blanc Gravier

5 - 2. Pentes

Globalement, le bassin versant présente une croissance des pentes de l'amont vers l'aval. La pente moyenne est élevée (13,4 %) avec un écart-type de 0,123. La pente médiane est quant à elle de 9.7%.

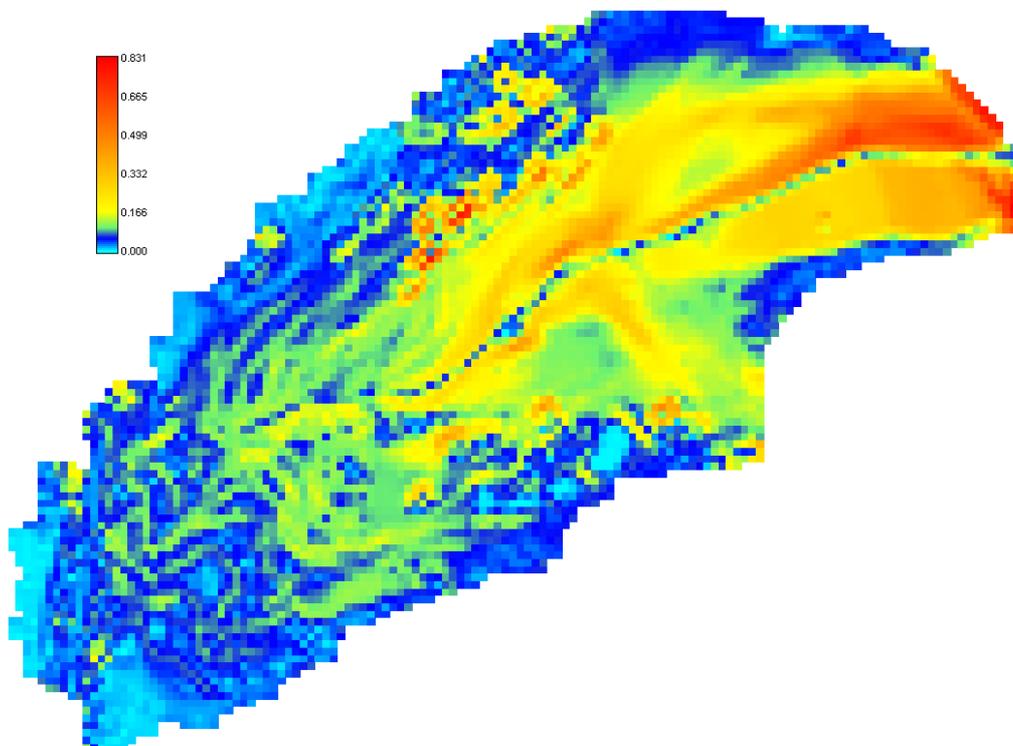


Figure 6-34 : Distribution des pentes pour le bassin du Blanc Gravier

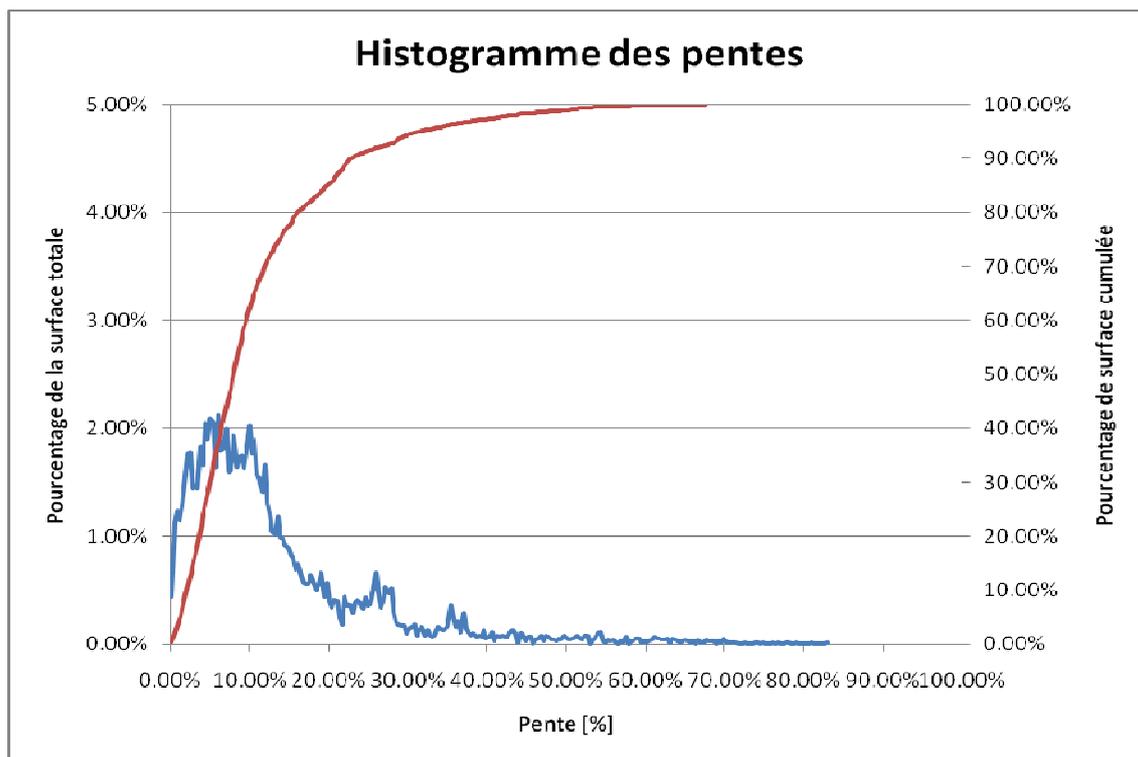


Figure 6-35 : Histogramme des pentes pour le bassin du Blanc Gravier

La distribution des pentes est plus régulière que dans le cas du ruisseau de Rénory mais également plus importante.

5 - 3. Occupation du sol

L'ouest du bassin versant comprend une partie importante du golf du Sart Tilman. (27 ha).

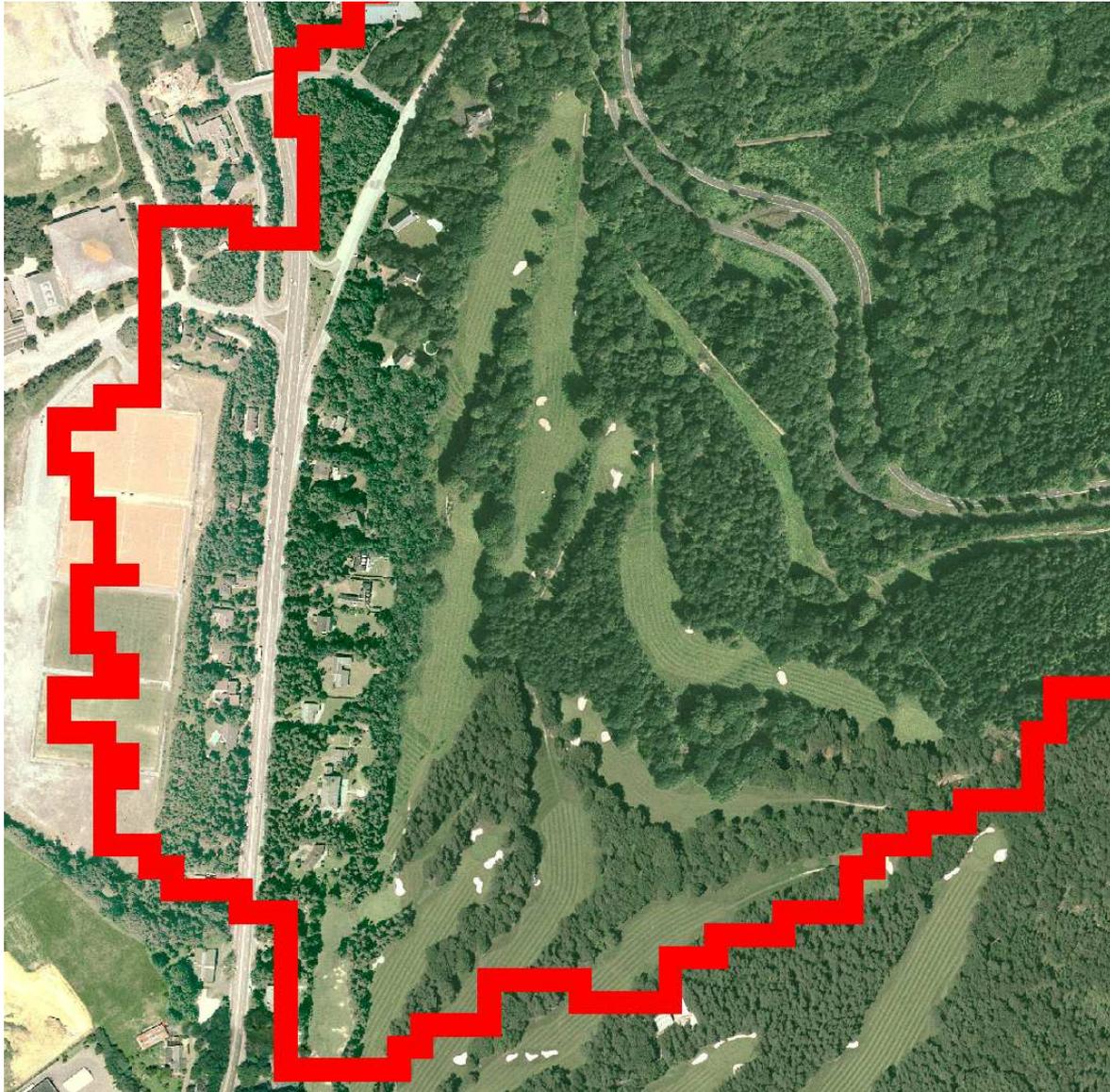


Figure 6-36 : Site du Golf du Sart Tilman – superposition de la limite du bassin versant (rouge)

Le site universitaire quant à lui couvre une surface estimée à 46 ha (27 ha au nord + 19 ha au sud). Le système d'égouttage de l'ULg reprend normalement les eaux pour les acheminer à l'exutoire du bassin versant via une canalisation souterraine sous le thalweg du Blanc Gravier. Etant donné les quantités importantes de sédiments (terre, branches, pierres, ...) charriées lors de l'événement, beaucoup d'avaloirs ont présenté des défaillances ce qui a notamment conduit à de nombreuses inondations de bâtiments. Pour être conservatif, il sera donc considéré que les eaux de ruissellement resteront en surface pour l'événement historique de mai 2008.

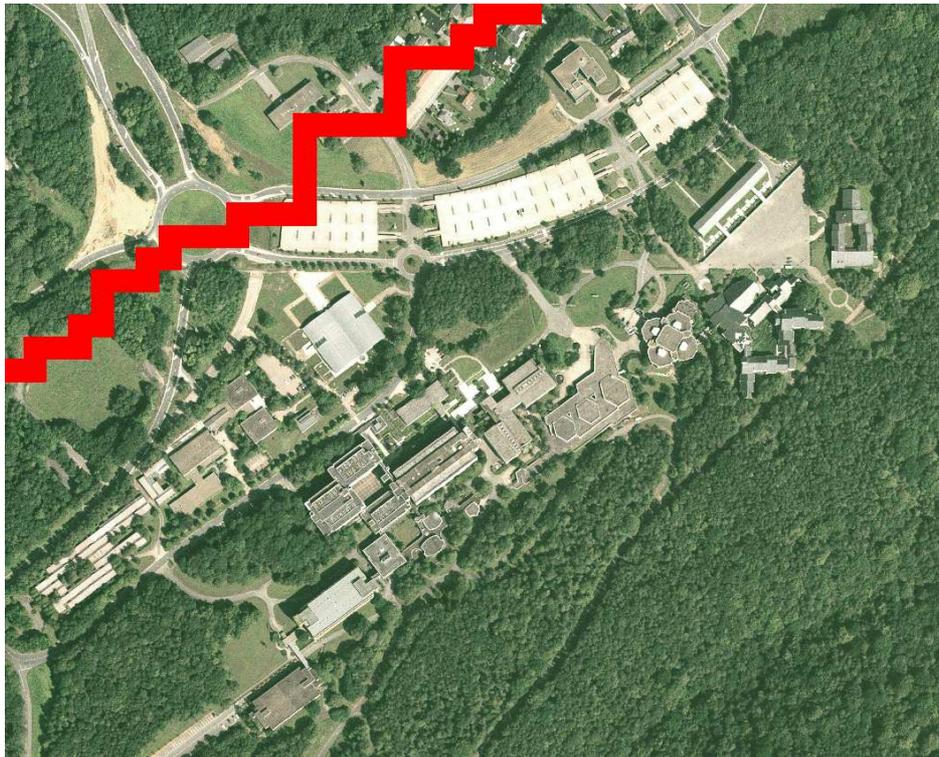


Figure 6-37 : Vue aérienne du campus de l'ULg – Site des grands amphithéâtres

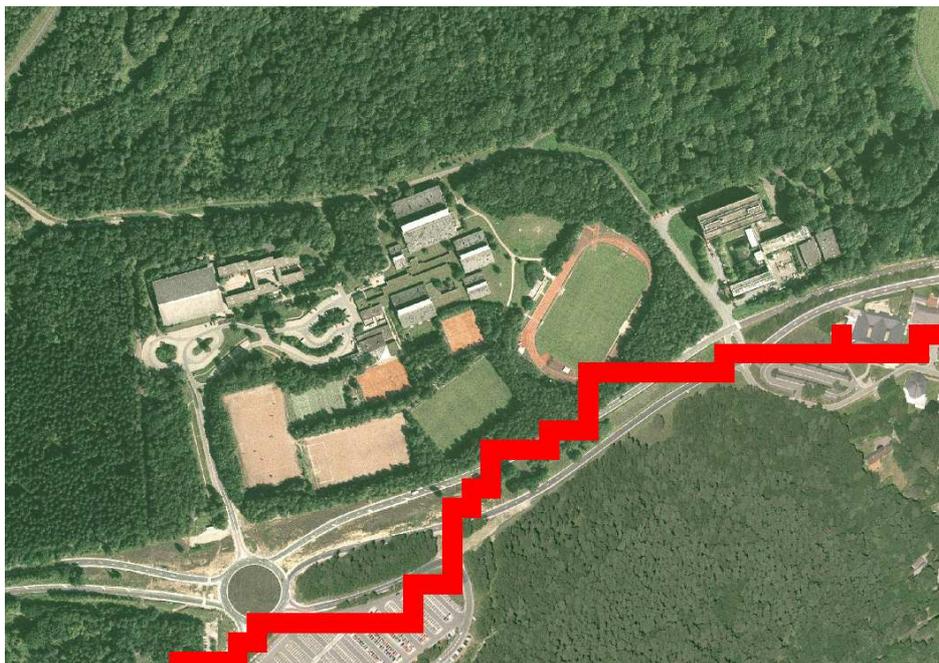


Figure 6-38 : Vue aérienne du campus de l'ULg – Site du Blanc Gravier

5 - 4. Réseau drainant

Le bassin versant ainsi que le réseau drainant considéré dans la modélisation sont représentés sur la figure 6-39.

Les sections transversales utilisées ont été générées sur base de quelques profils obtenus lors de la première phase de l'étude.

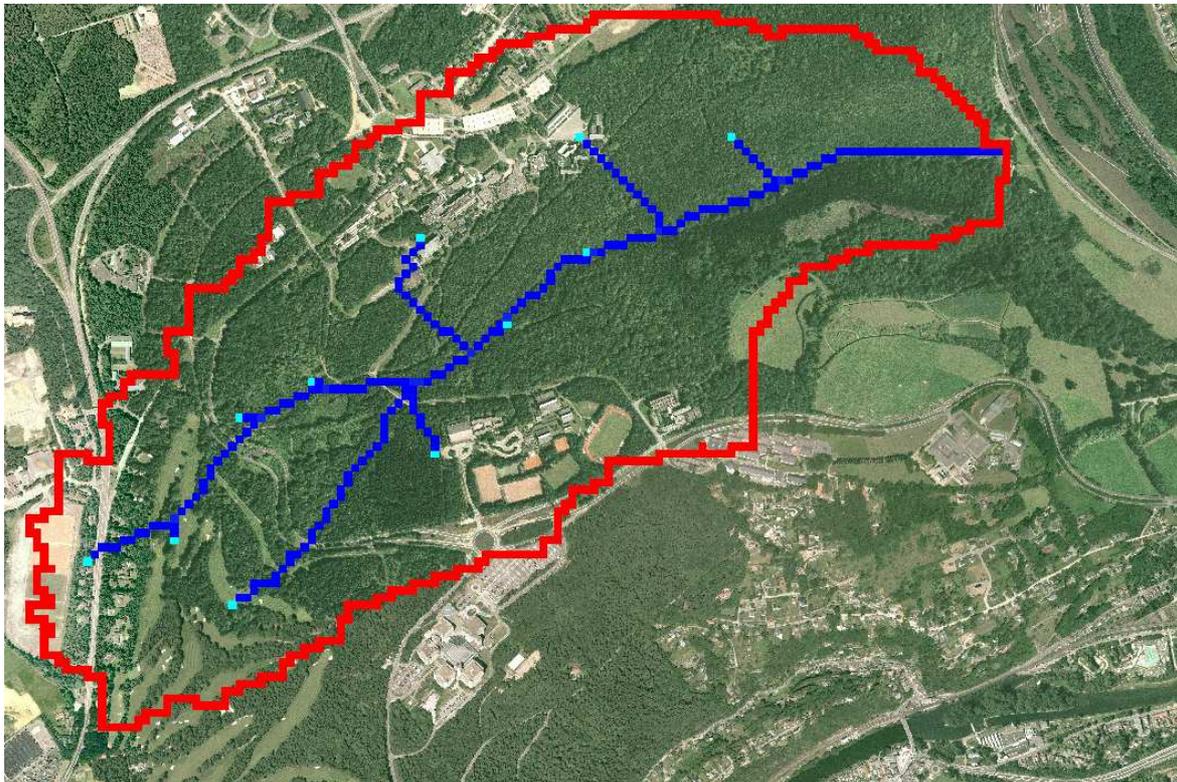


Figure 6-39 : bassin versant et réseau drainant du Blanc Gravier considéré dans la modélisation

5 - 5. Modélisations hydrologiques - Mai 2008

Pour ce bassin versant, plusieurs scénarios ont été envisagés :

- Événement de mai 2008 ;
- Événement de mai 2008 « inversé temporellement » ;
- Modification de l'occupation du sol ;
- Pluies de projet.

Pour le premier scénario, l'hydrogramme à l'exutoire modélisé présente un pic de crue à 36 m³/s. Tout comme pour le bassin de Rénory, les premières pluies ne génèrent pas de ruissellement mais sont complètement infiltrées.

Le deuxième scénario est destiné à illustrer cet effet. Considérons le même événement mais avec une dynamique totalement inverse à savoir des pluies extrêmes au début et ensuite

une pluie plus faible. D'un point de vue statistique, cette pluie est totalement identique puisque les volumes tombés et les fréquences d'apparition sont égaux. La modélisation démontre cependant que le pic n'est plus le même puisqu'il atteint 30.5 m³/s contre 36 m³/s précédemment (16% de variation). Les volumes totaux ruisselés sont également inférieurs de l'ordre de 4000 m³ sur 173000 m³ (2.2%). La dynamique de pluie montre donc ici toute son importance.

Le troisième scénario permet de tester l'influence de l'occupation du sol sur un bassin comme le Blanc Gravier. Il est généré en remplaçant les paramètres d'occupation du sol des terrains « artificialisés » (frottement, perméabilité, succion et porosité) par ceux du terrain naturel avoisinant. Dans ce cas, le hyétogramme de mai 2008 génère un pic de crue légèrement inférieur à 30 m³/s et un volume total inférieur d'environ 14.7 %.

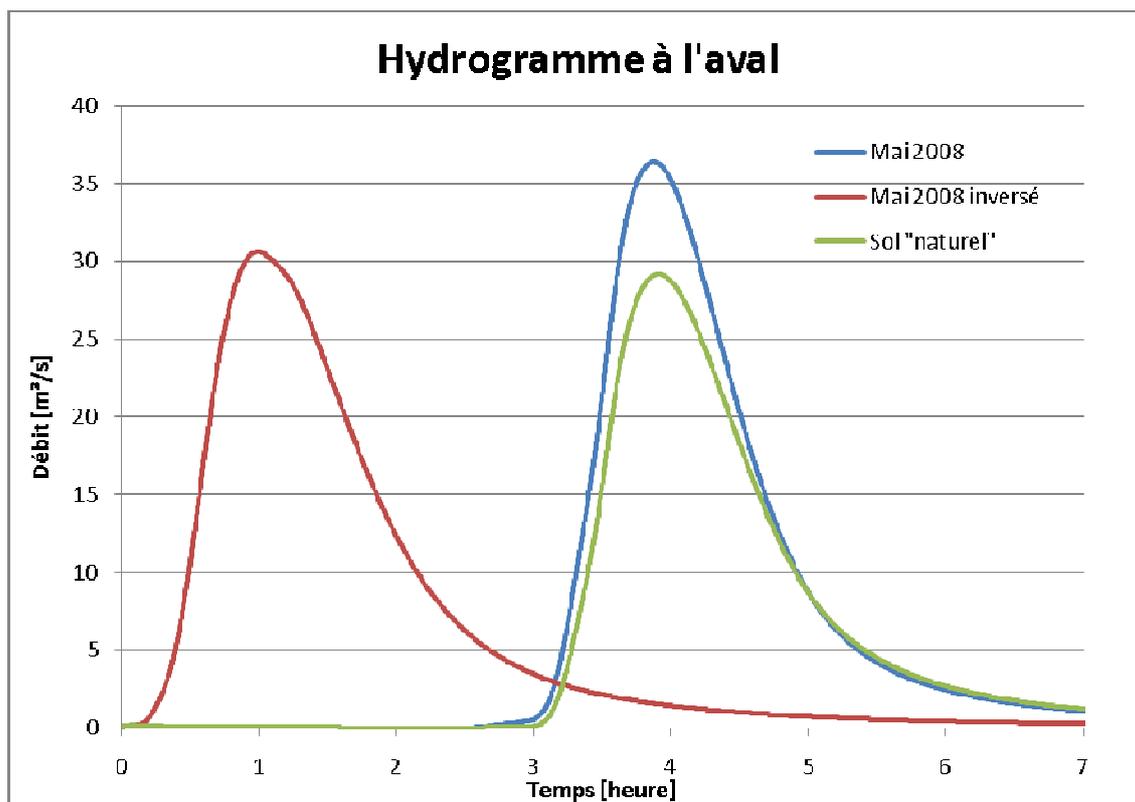


Figure 6-40 : Hydrogrammes à l'exutoire du Blanc Gravier – Mai 2008 et scénarii

5 - 6. Modélisations de pluies de projet - 20, 50, 100, 200 ans

Comme pour le bassin versant de Rénory, des pluies de récurrences fixées pour une durée de deux heures peuvent être simulées. Dans ce cas, les périodes de retour de 20, 50, 100 et 200 ans ont été simulées.

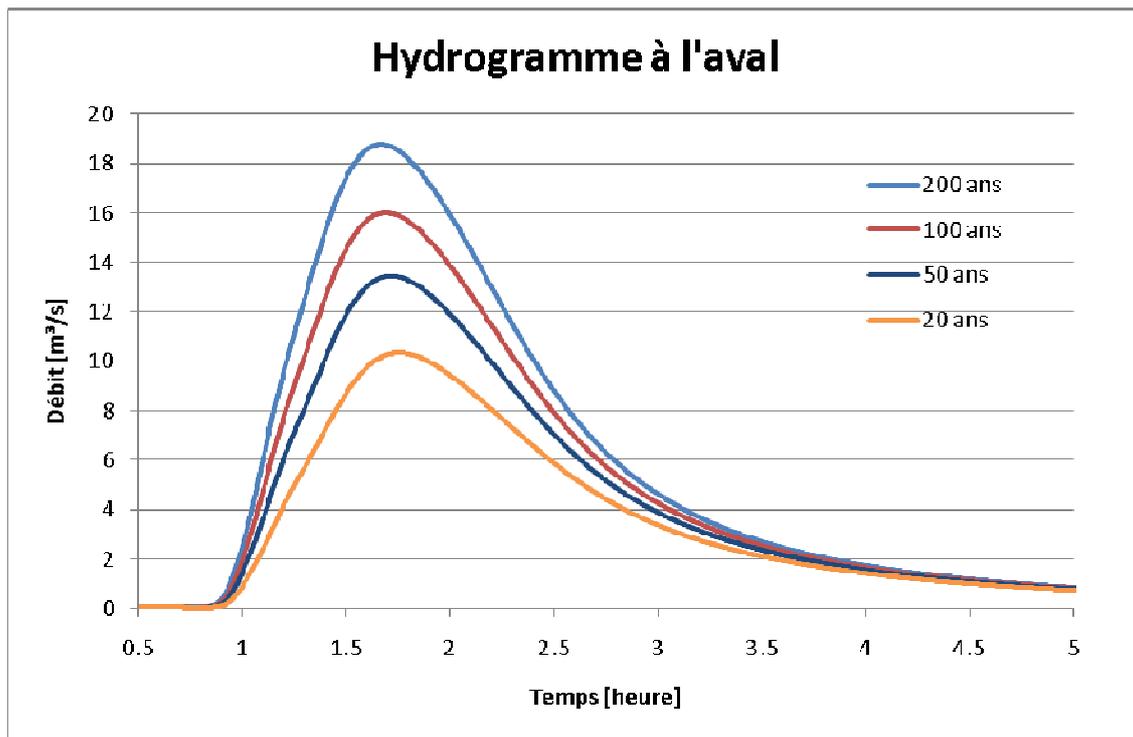


Figure 6-41 : Hydrogrammes à l'exutoire du Blanc Gravier – pluies de projet

Dans tous les cas, les pics de crues ne dépassent pas les 20 m³/s.

5 - 7. Coefficients de production moyens

Tableau 6-7 : Coefficients de production moyens pour le bassin du Blanc Gravier

	Volume hydrogramme	Volume pluie	Coefficient de production
200 ans	101715	174720	0,58
100 ans	88893	158760	0,56
50 ans	76667	143080	0,54
20 ans	61477	123200	0,50
Mai 2008	172929	258300	0,67
Mai 2008 inversé	168980	258300	0,65
Sol "naturel"	147448	258300	0,57

Les coefficients de production pour le bassin versant du Blanc Gravier sont sensiblement plus importants que ceux du bassin versant de Rénory alors que l'urbanisation de ce dernier est supérieure. L'explication la plus plausible vient des pentes et surtout de leur distribution. En effet, alors que le bassin versant de Rénory présente une topographie en deux « phases » (plus plate dans la partie urbanisée), le bassin du Blanc Gravier est beaucoup plus uniforme et, avec des gradients totaux supérieurs, le ruissellement y est donc amplifié.

6. Bassin du Fond du Moulin

6 - 1. Topographie

La surface totale est de 290 ha.

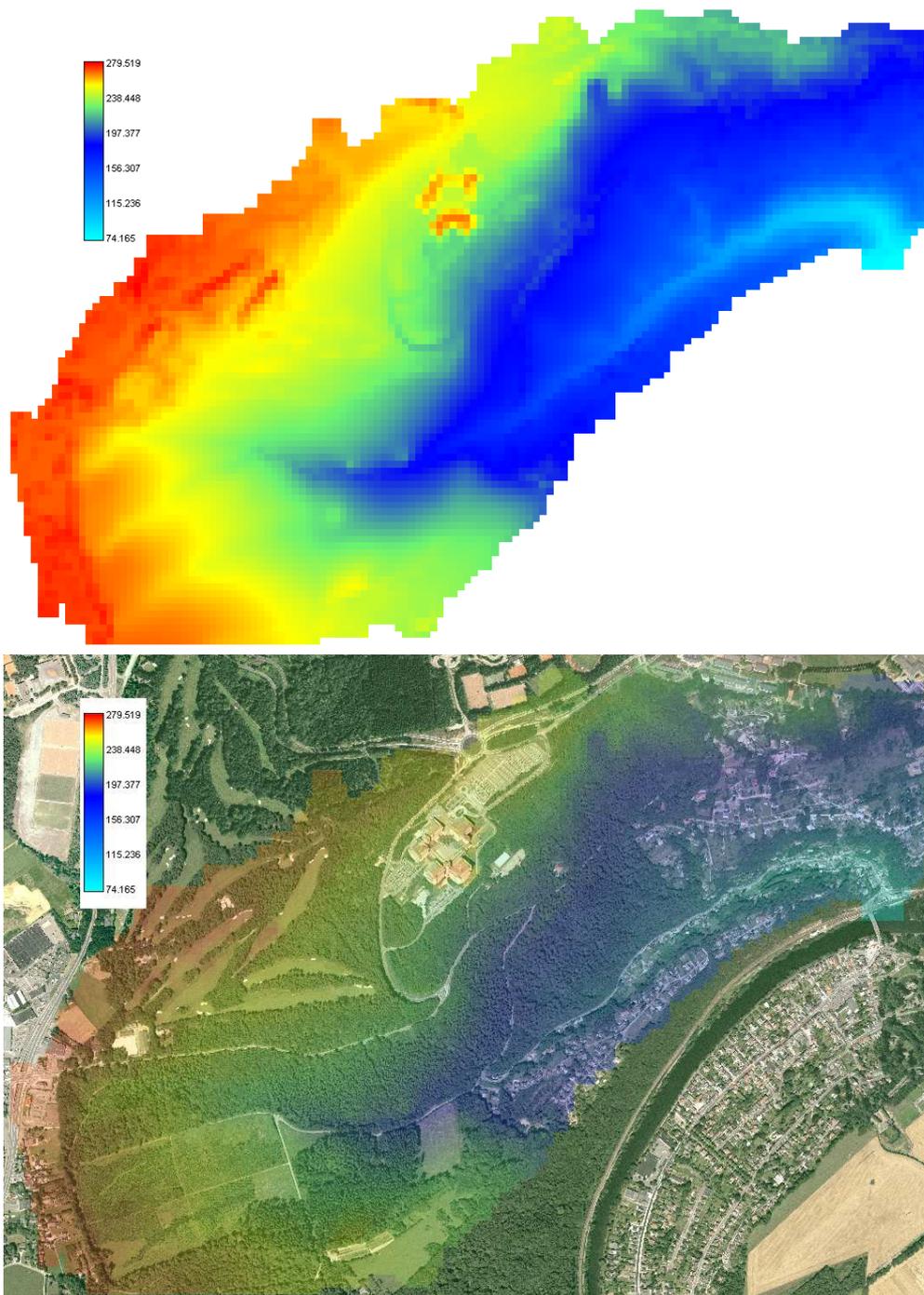


Figure 6-42 : Topographie et superposition aux PPNC pour le bassin du Fond du Moulin

6 - 2. Pentés

Globalement, le bassin versant présente une croissance des pentes de l'amont vers l'aval. La pente moyenne est élevée (15,8 %) avec un écart-type de 0,125. La pente médiane est quant à elle de 12.8%.

Il s'agit du bassin versant le plus grand et le plus pentu des trois cas étudiés.

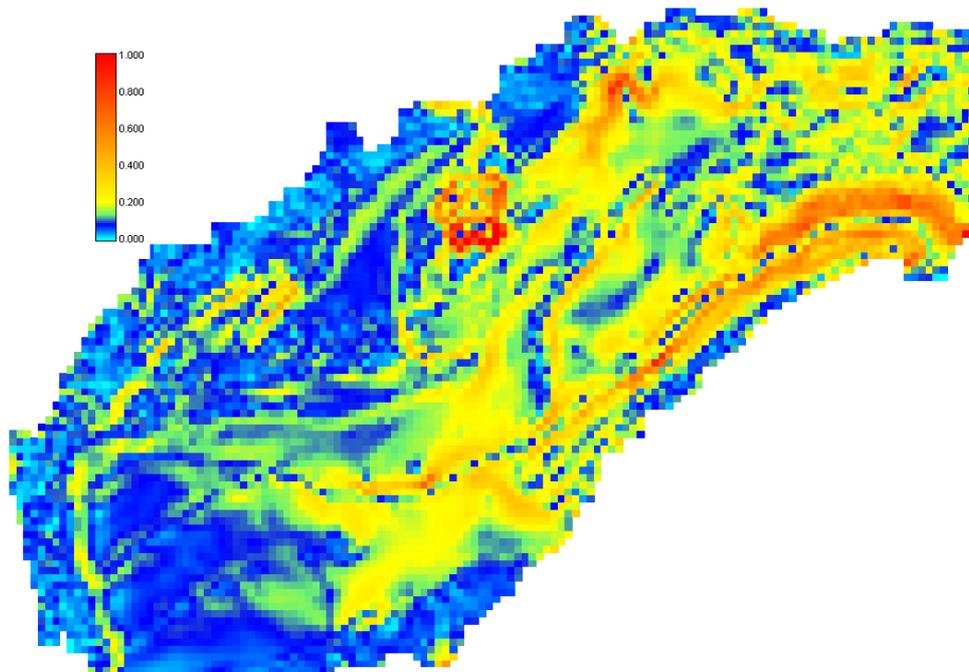


Figure 6-43 : Distribution des pentes pour le bassin du Fond du Moulin

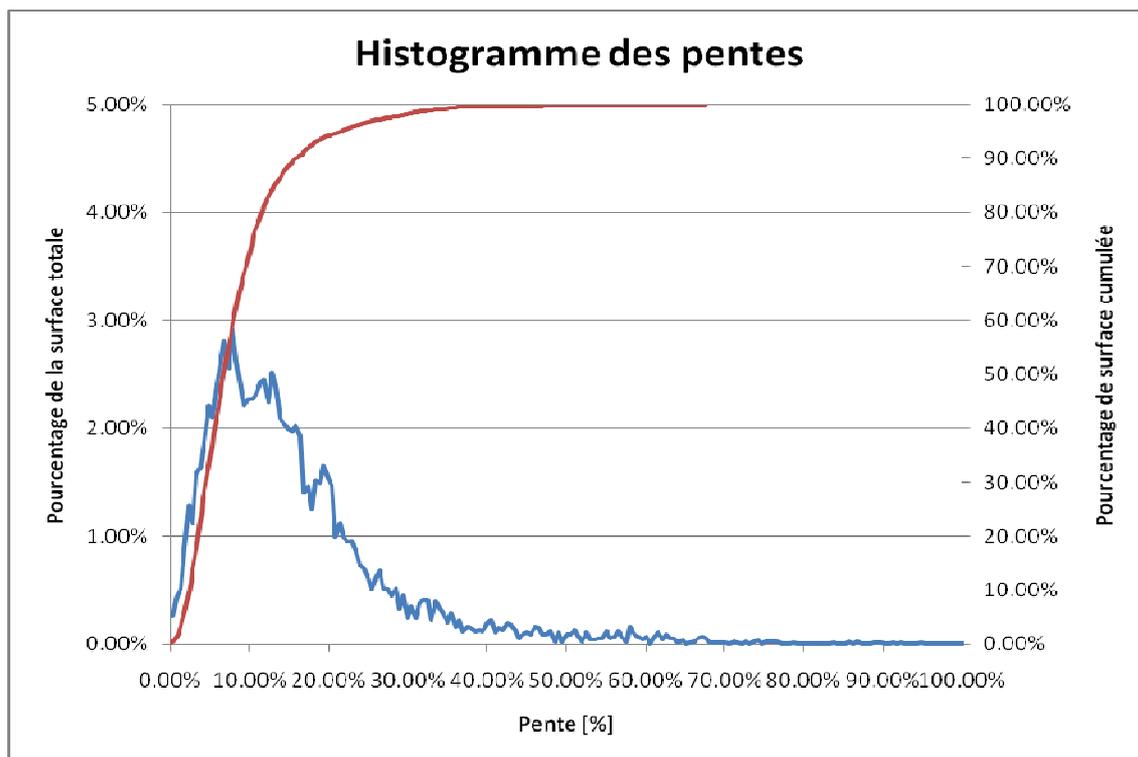


Figure 6-44 : Histogramme des pentes pour le bassin du Fond du Moulin

6 - 3. Particularités du bassin versant

La partie nord du bassin versant du Fond du Moulin contient les installations de l'hôpital universitaire.



Figure 6-45 : Vue aérienne du site du CHU

Sa superficie peut être estimée à environ 11 ha sur les 290 ha du bassin versant total, c'est-à-dire 3.4 %.

En temps normal, les eaux du parking sont rejetées de manière diffuse vers le réseau drainant naturel. Les eaux des bâtiments quant à elles suivent deux trajets distincts :

- une partie de celles-ci sont récoltées via le réseau d'égouttage et est normalement redirigée vers la canalisation principale de l'ULg dans le bassin versant du Blanc Gravier ;
- l'autre partie transite via un bassin d'orage, d'un volume de 270 m³, avant d'être rejetée vers le ruisseau du Fond du Moulin.

Lors de l'événement de mai 2008, les canalisations du CHU ont été saturées. Plusieurs soulèvements de toitures ont été observés et les caves de l'hôpital ont été largement inondées. D'après les estimations des responsables, un volume total de l'ordre de grandeur de 5500 m³ a été stocké temporairement dans les bâtiments. Il s'agit d'un volume 20 fois supérieur à celui du bassin d'orage normal.

Il est extrêmement difficile de représenter les échanges de flux réels d'un site comme celui du CHU à l'échelle d'une modélisation hydrologique d'ensemble. Les résultats seront

néanmoins analysés pour vérifier les volumes générés sur le site et ainsi valider les paramètres de modélisation.



Figure 6-46 : Vue aérienne de la partie du Golf du Sart Tilman située dans le bassin versant du Fond du Moulin

L'ouest du bassin versant comprend une partie du golf du Sart Tilman (environ 30 ha) ainsi qu'une toute petite zone du complexe commercial de Boncelles (7 ha). Cela représente respectivement 10 % et 2.5 % de la surface totale du bassin versant.

6 - 4. Réseau drainant

Le bassin versant ainsi que le réseau drainant modélisé sont représentés ci-dessous.

La densité du réseau drainant modélisé est suffisante pour permettre sa remontée jusqu'au site universitaire. De cette manière, un scénario pourra être présenté mettant en évidence son rôle potentiel lors de l'événement de mai 2008.

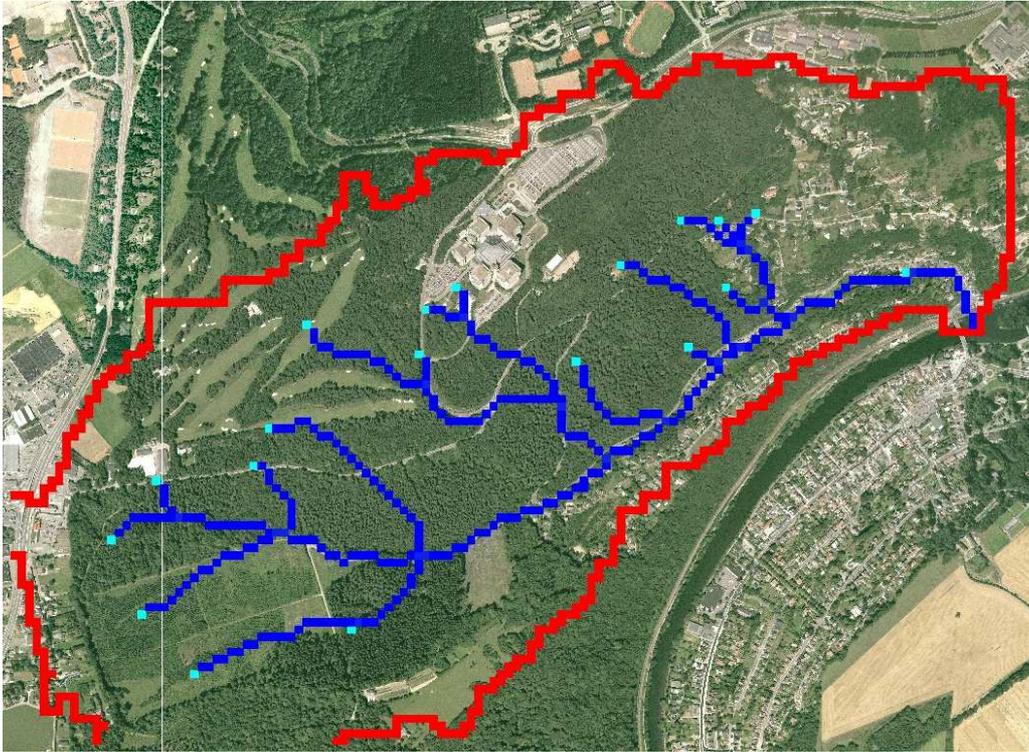


Figure 6-47 : Bassin versant et réseau drainant considéré dans la modélisation

Pour une pente de 5.75%, pente moyenne de la rue du Fond du Moulin sur base du MNT, un coefficient de Strickler de 40 et une section rectangulaire, les hauteurs caractéristiques de l'écoulement sont les suivantes pour deux débits (40 m³/s et 15 m³/s) :

Tableau 6-8 : Estimation de hauteurs caractéristiques dans la rue du Fond du Moulin
(hauteur uniforme : Hu – hauteur critique : Hcr)

		Hu	Hcr
40 m ³ /s	Largeur 1 m	2,66	3,54
	Largeur 2 m	7,1	5,73
	Largeur 3 m	1,66	2,68
15 m ³ /s	Largeur 1 m	3	3,02
	Largeur 2 m	1,2	1,84
	Largeur 3 m	0,81	1,39

L'écoulement y est évidemment toujours torrentiel. Etant donné les sections très faibles rencontrées localement sur le site (passage en pertuis sous certaines maisons, tuyaux, ...), l'écoulement réel à cet endroit ne peut y être modélisé sans avoir recours à une simulation extrêmement fine (idéalement 2D) de la zone. Cependant une telle approche sort du cadre d'une étude hydrologique globale mais il n'en demeure que les débordements observés sont explicables par un dépassement local des sections disponibles, les dépôts de sédiments aggravant encore la situation. L'eau s'y est donc accumulée et a emprunté finalement la route pour poursuivre son écoulement vers l'aval.

6 - 5. Modélisations hydrologiques - mai 2008

Tout comme pour les deux bassins précédents, l'événement de mai 2008 est simulé. Dans ce cas, un pic de crue de l'ordre de 42.5 m³/s est modélisé à l'exutoire, en aval de la rue du Fond du Moulin.

En vue d'estimer le rôle du CHU, et de son stockage involontaire, lors de cet événement, deux hypothèses ont été envisagées. En observant le réseau drainant, on peut remarquer deux bras débutant sur le site du CHU qui se rejoignent rapidement pour ne former qu'un seul ruisseau. La première hypothèse consistera à intercepter via la modélisation hydrodynamique 1D l'ensemble des apports des deux bras amont ainsi que du bras de jonction. Ces apports seront soustraits de la modélisation, ce qui correspondrait en réalité à un bassin d'orage d'une capacité égale au moins à ce volume. La seconde hypothèse n'interceptera que les apports des deux bras amont, c'est-à-dire à une fraction du site du CHU. Les deux pics obtenus sont respectivement de 38.7 m³/s et 40.2 m³/s, soit une réduction entre 5% et 9% du pic.

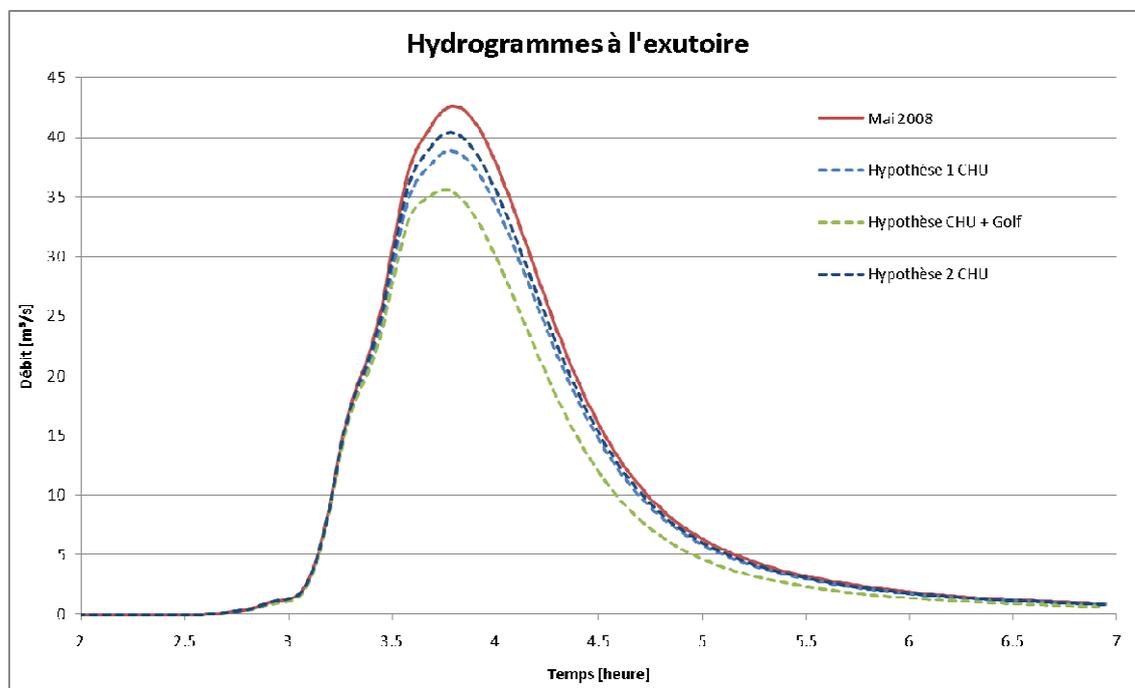


Figure 6-48 : Hydrogrammes à l'exutoire du bassin du Fond du Moulin – Mai 2008 et scénarii

Une analyse en termes des volumes stockés démontre que ces gains sont légèrement surestimés. En effet, les responsables du CHU ont effectué une estimation relativement précise des volumes inondant les caves des bâtiments et elle se monte à un total de 5500 m³.

Tableau 6-9 : Gains en volume pour les scénarii de rétention

	Gain de volumes
Mai 2008	0
Hypothèse 1 CHU	13730
Hypothèse 2 CHU	8021
Hypothèse CHU + Golf	33260

Le même type d'hypothèse a cette fois été appliqué au CHU ainsi qu'aux trois ruisseaux en exutoires du golf du Sart Tilman. Dans ce cas, un pic de crue d'environ 35 m³/s est obtenu au prix d'un stockage de 33 260 m³. Ce stockage important n'aboutirait donc pas a priori à une absence de débordements dans la rue du Fond du Moulin.

6 - 6. Modélisations de pluies de projet - 20, 50, 100, 200 ans

Des simulations complémentaires sont menées pour des pluies de deux heures pour des périodes de retour de 20, 50, 100 et 200 ans.

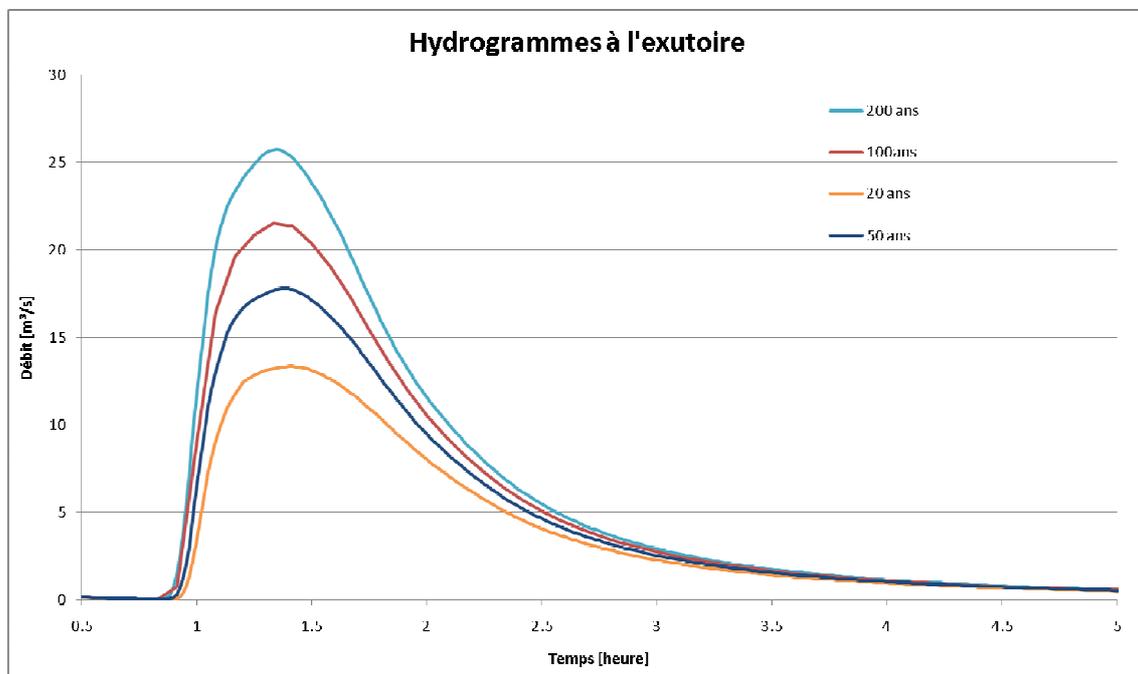


Figure 6-49 : Hydrogrammes à l'exutoire du bassin du Fond du Moulin – pluies de projet

La période de retour la plus importante conduit à des débits de peu supérieurs à 25 m³/s comparativement à l'ordre de grandeur de 40 m³/s pour mai 2008.

6 - 7. Coefficients de production moyens

L'analyse en termes de coefficients de production moyens est très intéressante. En effet, des trois bassins, c'est celui qui fournit les coefficients les plus importants même s'ils restent proches de ceux du Blanc Gravier. Ici aussi, les pentes ainsi que leur distribution relativement homogène jouent un rôle important. La présence d'une zone urbanisée en aval et dans la zone la plus pentue est également un élément défavorable.

Tableau 6-10 : Coefficients de production moyens pour le bassin du Fond du Moulin

	Volume hydrogramme	Volume pluie	Coefficient de production
200 ans	108975	180 960	0,60
100 ans	95593	164 430	0,58
50 ans	82920	148 190	0,56
20 ans	67046	127 600	0,53
Mai 2008	181030	267 525	0,68

E. Conclusions

Le jeudi 29 mai 2008 a eu lieu en région liégeoise un événement pluvieux extrême qui a eu des conséquences (humaines et financières) douloureuses. Pour rappel, une pluie de courte durée, mais très intense (lame d'eau d'environ 90 litres par mètre carré en moins de 2 heures) sur le domaine du Sart Tilman a provoqué des inondations très soudaines (communément appelées « flash-floods ») aux abords des ruisseaux descendant du Sart Tilman vers la Meuse et l'Ourthe. Un tel événement interpelle et amène à chercher à comprendre le phénomène, à le reproduire et à l'anticiper.

Aussi, à l'initiative de la Ministre de la recherche scientifique de la Communauté Française (Marie- Dominique Simonet), l'Aquapôle a fédéré un travail multidisciplinaire visant à décrire les mécanismes de ces événements extrêmes et à reproduire les impacts hydrologiques de ces pluies exceptionnelles à l'échelle locale, dans un environnement boisé et vallonné.

Un des objectifs principaux de ce travail était d'obtenir un modèle final intégré permettant d'abord de représenter l'évènement, puis de permettre par la simulation de scénarios de tester l'effet spécifique de certains facteurs. En effet, outre la complexité de la dynamique météorologique qui les a générés, les conséquences de l'évènement ont été le fruit de la combinaison complexe d'une série de facteurs environnementaux : nature des sols, topographie locale, couverture végétale, ouvrages anthropiques et urbanisation ...

Le modèle a été testé sur le domaine du Sart Tilman où a eu lieu l'évènement du 29 mai. D'autres événements du même type ont eu lieu dans les semaines suivantes en région Liégeoise (Remicourt, ...). Le choix du Sart Tilman comme cas d'étude s'imposait cependant vu la bonne connaissance préliminaire du site par les équipes de l'ULg et la (relativement) bonne instrumentation du site.

Pour effectuer une modélisation hydrologique physiquement basée et spatialement distribuée, il est nécessaire de disposer de nombreuses informations issues de sources différentes. C'est pourquoi cette étude a nécessité la contribution d'experts provenant de plusieurs domaines de recherches différents mais complémentaires. Cette approche multidisciplinaire a pu être rencontrée rapidement par l'Aquapôle qui dispose en son sein des équipes universitaires ayant les compétences nécessaires, ainsi que de la capacité de coordination bien nécessaire dans une telle étude.

Ont ainsi participé à cette étude (outre l'unité R&D de l'Aquapôle, Dir JF Deliège, qui en a assuré la coordination), 5 services de l'Université de Liège :

- le laboratoire de Climatologie et Topoclimatologie, Prof. M. Erpicum, qui a étudié et précisé les valeurs des précipitations ayant eu lieu ;
- l'unité d'Hydrogéologie et de Géologie de l'Environnement, Prof. A. Dassargues, qui a étudié le rôle des aquifères lors de l'évènement ;
- le laboratoire de Topographie et de Géométrie, Prof. R. Billen, qui a généré un Modèle Numérique de Terrain (MNT) complet de la zone étudiée ;
- le laboratoire d'Hydrographie et de Géomorphologie Fluviale, Prof. Fr. Petit, qui a estimé les hauteurs d'eau, les débits et les transports de sédiments des ruisseaux ;
- l'unité d'Hydrologie, Hydrodynamique Appliquée et de Constructions Hydrauliques, Prof. M. Piroton qui a développé et appliqué le modèle WOLF HYDRO.

Les principales conclusions que l'on peut tirer de cette étude sont listées ci-après :

L'analyse climatologique a permis de préciser les valeurs de la durée et de l'ampleur des précipitations, et donc de générer les données d'entrée « pluie » nécessaire au modèle. Elle a également montré de manière évidente et indiscutable que l'épisode pluviométrique qui a provoqué les flash-floods dans les petits bassins versants étudiés a vraiment été exceptionnel et qu'il était caractérisé par une période de retour multi-centennale.

L'étude hydrogéologique quant à elle a permis de décrire les formations géologiques couvrant les bassins étudiés. Le fonctionnement hydrogéologique théorique de ces formations a été mis en évidence, et des valeurs des paramètres hydrodynamiques régissant l'écoulement au sein de ces formations ont été collectées et utilisées pour la modélisation. Néanmoins, vu qu'aucune donnée piézométrique ou de degré de saturation n'est disponible avant, pendant et juste après l'évènement pluvieux, le rôle exact des aquifères lors de cette pluie exceptionnelle n'a pu être précisé.

Suite aux diverses campagnes de mesures de terrain menées par le service de Topographie et de Géométrie, il a été possible de proposer un **Modèle Numérique de Terrain (MNT)** complet de la zone d'intérêt. La dimension de la maille de ce MNT (20 m) résulte d'un compromis entre les exigences de l'analyse numérique (qui impose d'utiliser une taille de mailles de modélisation de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres) et la petite taille du bassin modélisé (qui demande une taille de maille la plus fine possible). Le MNT a été réalisé sur base des techniques de mesures les plus adéquates pour des zones sous couvert forestier, à savoir le levé de détail et la densification de modèles numériques de terrain. Plus qu'un simple MNT, un véritable site d'étude pérenne a été réalisé sur l'ensemble des trois bassins étudiés. Enfin cette étude a également permis de montrer l'importance de la définition préalable des précisions attendues par les différents utilisateurs de données. En effet, c'est la gamme de précision attendue qui définit principalement la technique de mesure utilisée pour acquérir la donnée.

Les **mesures sédimentologiques et géomorphologiques** ont mis en évidence l'intensité des flash-floods qui ont affecté les bassins versants du Sart Tilman. Les hauteurs d'eau ont pu être reconstituées par un levé topographique des laisses de crue. Les puissances spécifiques développées durant cette crue extrême ont pu être estimées à partir des informations granulométriques. Ces informations ont permis d'estimer les débits atteints dans les différents ruisseaux, et ont donc servi à la validation du modèle intégré. Les transports sédimentaires, principalement de la charge de fond, ont été estimés à partir des éléments observés sur le terrain (cubages de dépôts alluviaux édifiés lors de cet évènement, taille des blocs mobilisés ...). Ils correspondent aux phénomènes les plus intenses recensés dans la littérature internationale.

Le modèle WOLF HYDRO est un **modèle hydrologique** spatialement et temporellement distribué qui est principalement développé pour représenter les transferts quasi horizontaux prépondérants en périodes de crues. Son approche physiquement basée lui permet d'utiliser au mieux les différentes informations disponibles. Il a été utilisé dans cette étude, en s'appuyant sur les informations générées par les autres équipes.

Pour les trois bassins versants étudiés, de caractéristiques sensiblement différentes, la méthodologie employée permet d'aboutir à des hydrogrammes réalistes pour l'épisode du 29 mai 2008. Des scénarios multiples ont également permis de vérifier la sensibilité du modèle, de tester l'influence d'aménagements potentiels sur le bassin versant (changements d'occupation des sols, création de bassins d'orage, ...) et de fournir des résultats pour des pluies de récurrences fixées d'une durée proche de l'évènement principal.

Les observations réalisées sur les résultats de modélisation permettent de conclure au fait que l'événement de mai 2008 est véritablement extrême et qu'aucun aménagement raisonnable n'aurait pu aboutir à un affaiblissement significatif des débits observés. Les pics de crues sont en effet parfois proches du double de ceux observés pour une crue bi-centennale. Néanmoins, la délivrance de permis d'urbanisme sur le cours d'eau ou à son voisinage immédiat aggrave les dommages consécutifs à de tels phénomènes exceptionnels.

De manière plus globale, l'étude a également clairement démontré l'applicabilité mais aussi la nécessité d'une méthodologie pluridisciplinaire dans l'approche de tels événements, et ce en concordance avec les travaux du GTI et conformément à la philosophie du plan « Pluies ».



F. Références

- Boulvain, F., 2000, *Introduction à la géologie régionale de la Belgique*, notes de cours, ULg, Liège
- Calembert, L., Pel, J. et Brumagne, D. 1964, *Géologie*, Extrait du 2^{ième} cahier du Sart Tilman, Publication n°25, Laboratoires de Géologie de la Fa c. des Sc. Appl., Université de Liège.
- Calembert, L., Monjoie, A. et Pel, J., 1970, *La géologie du Sart Tilman*, Collection des Publications de la Faculté des Sciences Appliquées n°22, pp.16-21.
- Calembert, L. et Monjoie, A., 1973, *Observations sur les nappes aquifères de fissures dans le promontoire Meuse-Ourthe*, in Mémoires C.E.R.E.S., hors série (hommage à R. Spronck), Université de Liège, pp. 97-108.
- Calembert, L., Pel, J., Monjoie, A., Burton, E. et Lambrecht, L., 1974, *Géologie, Les guides scientifiques du Sart Tilman*, Conseil scientifique des Sites du Sart Tilman, 107p.
- Costa, J.E., 1983, *Palaeohydraulic reconstruction of flashflood peaks from boulder deposits in the Colorado Front Range*, Geological Society of America Bulletin, 94, 986-1004.
- Forir, H. et Murlon, 1897, Carte géologique de Belgique (1/40.000) – Planchette 134 de Seraing-Chênée, Service Géologique de Belgique
- Fourmarier, P., 1910, Texte explicatif du levé géologique de la planchette de Seraing (n°134), Service Géologique de Belgique, 29 p.
- Fourmarier, P., 1910, Texte explicatif du levé géologique de la planchette de Chênée (n°134), Service Géologique de Belgique, 38 p.
- Gob, F., Petit F., Bravard J.-P., Ozer A., Gob A., 2003, *Lichenometric application to historical and subrecent dynamics and sediment transport of a Corsican stream (Figarella River, France)*. Quaternary Science Reviews, 22, 2111-2124.
- Gob, F., Bravard J.P., Jacob N. & Petit F., 2005, *Determining the competence of mountainous Mediterranean streams using lichenometric techniques*, In R J. Batalla and C Garcia (eds) *Geomorphological Processes and Human Impacts in River Basins Proceedings of the International Conference held at Solsona, Catalonia, Spain, May 2004*. IAHS Red Book, 299, 161-170.
- Houbrechts, G., Hallot H., Gob F., Mols J., Defêchereux O. & Petit F., 2006, *Fréquence et importance du charriage dans les rivières du Massif ardennais*, Géographie physique et Quaternaire, vol. 60-3, pp. 241-251
- Humblot, E., 1941, *Le Bassin houiller de Liège*, Revue universelle des mines, Eds Assoc. des Ingénieurs Liégeois, 84^{ième} année, 8^{ième} série, T.17, n°12, pp. 357-377 + 11 planches.
- Jacob, N., 2003, *Les vallées en gorges de la Cévenne vivaraise : montagne de sable et château d'eau*, Thèse de doctorat en Géographie et Aménagement, université de Paris IV, 459 p.

- Jacob, N., Gob F., Bravard J.-P. & Petit F., 2006, *Les formes fluviales d'une rivière en gorge, le Chassezac (Cévennes, France)*, Géomorphologie, n°1, pp. 3-22
- Lang, M. et Lavabre J., 2007, *Estimation de la crue centennale pour les plans de prévention des risques d'inondations*, Quae, 231 p.
- Monjoie, A., 1970, *Etude des eaux souterraines du Sart Tilman*, Collection des Publications de la Faculté des Sciences Appliquées n°22, pp.57-62
- Pel, J., 1980, *Structurologie de l'Eodévonien du campus universitaire du Sart Tilman (Liège)*, In Hommage à Léon Calémbert, eds Georges Thone, Liège, pp. 231-239
- Petit, F., Araujo Bonatto, J., Brassine, B., Closkin, P., Rosen, E. and Ek, C., 1999, *Paramètres hydrologiques et physico-chimiques de source de Haute Belgique: Ebauche d'une typologie régionale*. Bulletin de la Société géographique de Liège, 37: 47-61.
- Petit, F., Gob F., Houbrechts G. & Assani A.A., 2005, *Critical unit stream power in gravel-bed rivers*, Geomorphology, 69, 92-101.
- Rapport SPAQUE-SGS, E451, 2002, Etude de confinement sur le site SLg6503-01s (Bois Saint-Jean), 42p + annexes592451, 2003, Etude hydrogéologie – Drain BSJ sur le site SLg6503-01s (Bois Saint-Jean), 38p + annexes
- Ruthy, I., Dassargues, A., Carte hydrogéologique Seraing-Chênée, 2005, 58 p. + 1 carte
- Université de Liège, 1965. *Les cahiers du Sart Tilman*, n°2, 71 p.