

Projet de recherche
SAGE Sarthe-Amont. Contrats régionaux de bassin versant
Pays de la Loire et Basse-Normandie 2014

CEZURES

Continuité Ecologique : Zones hUmides et Restauration Ecologique dans le bassin de la Sarthe amont

Impacts hydrogéologiques sur les zones humides du rétablissement de la continuité écologique sur la Sarthe amont.

Sites d'étude : moulin du Désert (en aval d'Alençon) et moulin du Ménéil-Broût (en amont d'Alençon).

RAPPORT FINAL

Mars 2018



Moulin de Ménéil-Broût © Dutour



Établissement public du ministère chargé du développement durable



Projet de recherche
SAGE Sarthe-Amont. Contrats régionaux de bassin versant
Pays de la Loire et Basse-Normandie 2014

CEZURES

Continuité Ecologique : Zones hUmides et Restauration Ecologique dans le bassin de la Sarthe amont

Impacts hydrogéologiques sur les zones humides du rétablissement de la continuité écologique sur la Sarthe amont.

Sites d'étude : moulin du Désert (en aval d'Alençon) et moulin du Ménéil-Broût (en amont d'Alençon).



Moulin de Ménéil-Broût © Dutour

Responsable administratif du projet : Mathieu BONNEFOND

Coordination scientifique :

Mathieu BONNEFOND, Cnam, EA 4630 GeF

Olivier FOUCHÉ, Cnam, EA 4630 GeF

Jeannine CORBONNOIS, Université du Maine, 6590 UMR ESO

Anne-Julia ROLLET Université de Caen, UMR 6554 LETG

Structure porteuse : Conservatoire national des arts et métiers (Cnam) - GeF (EA. 4630)

Laboratoires impliqués dans le projet :

GeF - Laboratoire Géomatique et Foncier (EA. 4630) - Cnam

ESO - Espace Société (UMR CNRS 6590) - Université du Maine

LETG- Géophen - GEOgraphiePHysique et ENvironnement (UMR CNRS 6554) - Université de Caen

Durée : 48 mois

Table des matières

Table des matières	3
Introduction.....	6
Rappel des objectifs de l'étude.....	6
Terrains d'étude et démarche de recherche	8
Rappel des tâches prévues dans le projet de recherche CEZURES	10
Plan général du rapport final.....	15
PREMIERE PARTIE Analyse à l'échelle du bassin versant.....	17
1 État des connaissances.....	18
1.1 Caractéristiques générales des zones humides.....	18
1.2 Évaluation fonctionnelle des zones humides.....	21
1.3 Méthodes d'étude des zones humides, apport de la télédétection.....	24
1.4 Données et travaux récents portant sur la Sarthe amont.....	26
2 Le bassin versant de la Sarthe en amont de la station de Moulins le Carbonnel	29
2.1 Physiographie du bassin versant	29
2.2 La géomorphologie (relief et substratum).....	31
2.3 Les aquifères.....	34
2.4 L'occupation du sol et les activités économiques.....	37
2.5 Les obstacles à l'écoulement.....	40
2.6 Qualité physico chimique de l'eau	41
2.6.1 Comparaison avec l'eau des deux sites de mesures : étude du Moulin du Désert et Hauterive	42
2.6.2 Caractéristiques physico-chimiques des eaux de la Sarthe	44
3 L'eau dans le bassin versant de la Sarthe amont, étude hydrologique et bilan d'eau	48
3.1 Les traits majeurs du climat.....	48
3.2 Variation des débits moyens de la Sarthe à la station de Saint Genéri le Gerei (Banquehydro, période 1979/2015)	49
3.3 Les débits journaliers (période 1979-2013).....	51
3.3.1 Caractérisation des étiages.....	51
3.3.2 Les tarissements	53
3.3.3 Périodes de hautes eaux et les crues	56
3.4 Usages de l'eau, prélèvements et rejets.....	58

4	La vallée de la Sarthe	61
4.1	Caractéristiques du fond de vallée	61
4.1.1	Les unités géomorphologiques.....	61
4.1.2	L'occupation du sol et la végétation dans le fond de vallée	64
4.1.3	Découpage de la vallée en tronçons homogènes.....	69
4.2	La végétation comme outil pour reconsidérer les zones humides.....	71
4.2.1	La construction du modèle	72
4.2.2	Interprétation des résultats du modèle	82
4.2.2.1	Caractérisation des zones humides.....	82
	Milieu physique	82
	Végétation.....	83
4.2.2.2	Scénario de répartition de la végétation d'après les modèles statistiques... 84	
4.2.3	Contraste entre l'amont et l'aval des obstacles à l'écoulement.....	85
4.3	Recherche de liaisons entre la caractéristique du couvert végétal et la morphologie du fond de vallée :	90
	Conclusion de la première partie.....	92
	DEUXIEME PARTIE : Analyse à l'échelle des sites d'étude	96
1	Détermination des conditions de mesures.....	98
1.1	Caractéristiques géomorphologiques des sites de mesures.....	98
1.1.1	Le site de Hauterive.....	99
1.1.2	Le site de Moulin du Désert :	103
1.2	Comportement hydrique des matériaux du fond alluvial.....	108
1.2.1	La conductivité hydraulique	108
1.2.2	L'humidité du sol.....	110
1.2.3	La chimie de l'eau.....	112
1.3	Caractéristiques des mesures et hydrologie de la période d'observation.....	113
1.3.1	Matériel de mesures et qualité des données.....	113
1.3.1.1	Données climatiques.....	113
1.3.1.2	Les niveaux d'eau.....	115
1.4	Caractéristiques de la période de mesure	116
2	Dynamique des niveaux d'eau (nappe et Sarthe) de janvier 2015 à avril 2016	121
2.1	Caractéristiques principales	121
2.2	Variations des niveaux moyens d'eau	124

2.2.1	Au Moulin de Hauterive	124
2.2.2	Au moulin du Désert.....	125
2.3	Étude de quelques situations journalières.....	126
2.3.1	Site de Hauterive.....	127
2.3.1.1	Variation des niveaux d'eau pour 3 périodes caractéristiques.....	127
2.3.1.2	Variation du niveau de l'eau d'un point de mesure à l'autre	129
2.3.2	Site du Moulin du Désert.....	130
2.3.2.1	Variation des niveaux d'eau pour 3 périodes caractéristiques :	130
2.3.2.2	Variation du niveau de l'eau d'un point de mesure à l'autre	134
3	Topographie du toit de la nappe et échanges nappe - rivière	136
3.1	Détermination des niveaux de base piézométriques.....	136
3.2	États du toit de la nappe à Hauterive	140
3.3	États du toit de la nappe au Moulin de Désert.....	144
3.4	Impact de l'abaissement du barrage au site du Moulin de Hauterive.....	151
4	Analyse de la végétation à l'échelle des sites.....	155
4.1	Étude phyto-écologique des zones humides sur les sites	155
4.1.1	Méthode d'inventaire et de cartographie (Annexe II.10)	155
4.1.2	Résultats de l'inventaire	156
4.1.2.1	Description des habitats naturels et semi-naturels cartographiés	156
4.2	Relation entre la végétation et le fonctionnement des zones humides.....	165
4.2.1	Principe général.....	165
4.2.2	Méthode.....	165
4.2.3	Résultats.....	166
4.2.3.1	Distribution des syntaxons en fonction des paramètres hydro-topographiques.....	166
4.2.3.2	Modèles statistiques	167
	Conclusion de la deuxième partie.....	168
	Conclusion générale du rapport	170
	Liste des Figures.....	172
	Liste des Tableaux.....	176
	Liste des annexes	178
	Références principales	179

Introduction

Rappel des objectifs de l'étude

Le projet s'inscrit dans la thématique « **La restauration de cours d'eau et de zones humides** » de l'appel à projet 2014 des contrats régionaux de bassin SAGE Sarthe-Amont, Région des Pays de la Loire et Région Basse-Normandie.

Il s'intéresse aux impacts hydrologiques et hydrogéologiques de la restauration de la continuité écologique sur les zones humides. Il porte en priorité sur la mise en évidence des processus de fonctionnement des zones humides. Le secteur d'étude est situé en tête du bassin de la Sarthe, de la confluence avec la Vezone jusqu'à la confluence avec la Briante et de la confluence avec la Briante jusqu'à la confluence avec le Sarthon. Il comprend plus d'une vingtaine de barrages et obstacles divers à l'écoulement.

Leur influence sur les conditions hydriques dans le lit majeur de la Sarthe est mal connue.

Dans le détail cette influence concerne des espaces de dimensions variées selon les microformes topographiques (largeur effective du lit majeur, présence de basses terrasses fluviales) mais également l'occupation du sol. Les zones humides sont bien visibles dans l'amont du bassin de la Sarthe où l'essentiel de l'occupation du sol en fond de vallée comprend des secteurs en herbe également en cohérence avec l'hydromorphie des sols.

L'objectif est ainsi de réaliser un diagnostic de l'état du fond de vallée (lit mineur et lit majeur) prenant en considération les niveaux d'eau et de faire une évaluation de l'impact des barrages sur l'état actuel du milieu. Une modélisation du fonctionnement hydrologique, géomorphologique et hydrogéologique devra permettre de déterminer l'influence de l'abaissement du niveau d'eau de la Sarthe en lien avec les barrages, ouverture de vannes, arasement... sur le fonctionnement des zones humides.

Les résultats permettront de faire des propositions de gestion des milieux dans le cadre de l'application de la DCE et du rétablissement de la continuité écologique.

Cette recherche prend en considération deux échelles :

- l'ensemble du bassin versant de la Sarthe en amont de Moulins-le-Carbonnel, réalisation d'un diagnostic général et cartographie du fond de vallée (lit mineur et lit majeur)
- deux sites d'études où seront effectuées des mesures nécessaires à la détermination des fonctionnements qu'il est prévu d'identifier :
 1. Barrage de Le Ménil Broût équipé d'une vanne mobile.
 2. Barrage du Désert à Moulins-le-Carbonnel à proximité de la station hydrométrique qui mesure les débits de la Sarthe amont.

Les travaux ont été réalisés en partenariat avec les équipes du L2G, de l'UMR ESO Le Mans et de l'UMR LETG GEOPHEN. Il implique des membres enseignants-chercheurs et techniciens (Tableau 1).

Tableau 1 . Membres du projet

Nom	Affectation	Fonctions
BONNEFOND Mathieu	Cnam	MCF géographie
CORBONNOIS Jeannine	Université du Maine	PR géographie
FOUCHÉ Olivier	Cnam	MCF géosciences
ROLLET Anne-Julia	Université de Caen	MCF géographie
DELAHAYE Daniel	Université de Caen	PR géographie
FOLLIN Jean-Michel	Cnam	MCF informatique (SIG)
FRESSARD Mathieu	Université de Can	Chargé d'études
CALI José	Cnam	MCF physique (topographie)
VERDUN Jérôme	Cnam	MCF physique (topographie)
SIMONETTO Elisabeth	Cnam	MCF traitement des images/MNT
THOMMERET Nathalie	Cnam	MCF géographie
LABERGERIE Eric	Cnam	Assistant ingénieur photogrammétrie/topographie
DAVIDSON Robert	Université de Caen	Ingénieur d'études
FAUCHEUX Guillaume	Cnam	Ingénieur d'étude spécialisé en instrumentation des sols
GIRAUD François	Cnam	Ingénieur d'étude spécialisé en analyse chimique
DUFOUR Simon	Université de Rennes 2	MCF géographie
NASRI Behzad	Cnam	Chargé d'étude
POIRIER Lucie	Cnam	Stagiaire
LEGER Marie	Cnam	Stagiaire
LHULLIER Clémentine	Université du Maine	Stagiaire
SANCHEZ CARILLO Raquel	Université du Maine	Stagiaire

Le projet de recherche s'appuie aussi sur des **partenaires institutionnels** intéressés par la thématique et le secteur d'étude (Tableau 2). Ils ont été invités aux réunions de suivi et fortement associés à la valorisation du projet (séminaire de restitution, mise à disposition des données géolocalisées, etc.).

Tableau 2. Partenariat institutionnel

Organisme	Nom	Fonction
Institution Interdépartementale du Bassin de la Sarthe (I.I.B.S.)	Eric Le BORGNE	Coordination des activités de la CLE du bassin versant de la Sarthe amont
PNR Normandie Maine	Michel AMELINE	Responsable environnement
Agence de l'Eau Loire Bretagne	Pascal BONIOU	Chargé de Mission

La coordination scientifique, qui permet le bon déroulement du projet a été assurée de manière collégiale par les membres du projet sous la coordination scientifique de Jeannine CORBONNOIS, Mathieu BONNEFOND, Olivier FOUCHÉ et Anne-Julia ROLLET.

Terrains d'étude et démarche de recherche

Les travaux concernent **le fond de la vallée de la Sarthe** en amont de la station hydrométrique de Moulins le Carbonnel (Figure 1). Le terrain est situé **à la limite des départements de la Sarthe et de l'Orne** et dans l'emprise du Parc Naturel Régional (PNR) Normandie-Maine qui contient les deux sites de mesures du Moulin de Ménil-Broût(Hauterive) et du Moulin du Désert (Commune de Moulins-le-Carbonnel).



Figure 1 : Localisation des deux sites dans le bassin de la Maine

Les deux sites se trouvent dans la zone Natura 2000 -FR2500107 - Haute vallée de la Sarthe. Le **site du Moulin du Désert** se trouve dans la partie aval de la ZNIEFF de type 1 des prairies humides de Mieucxé (Figure 3). Le Moulin du Désert appartient au PNR Normandie-Maine qui porte un projet de rétablissement de la continuité écologique sur ce site.



Figure 2. Prairies humides en amont du Moulin du Désert

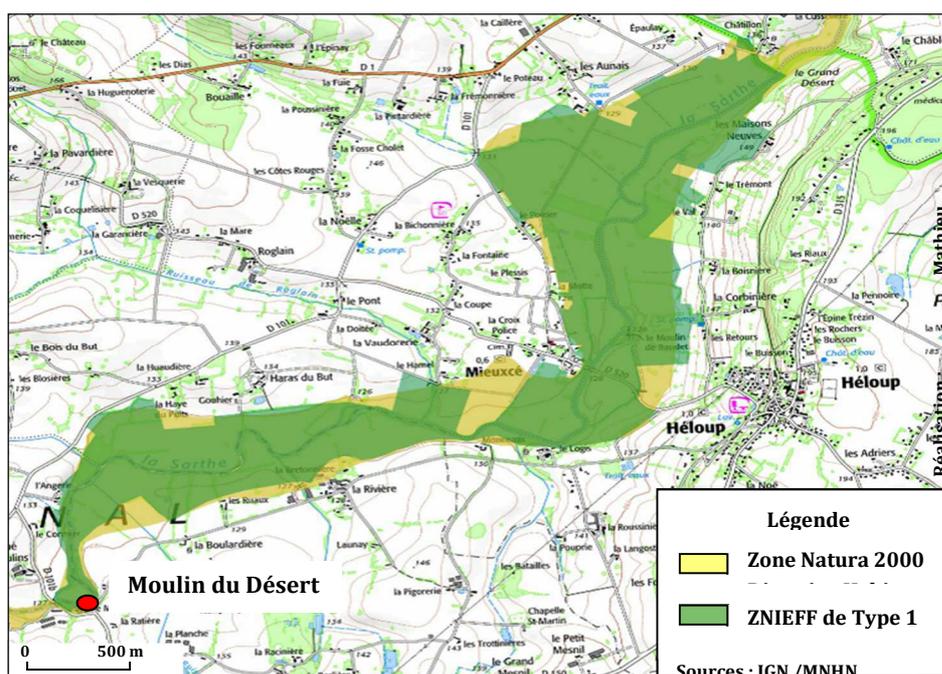


Figure 3 : Localisation du site du Moulin du Désert

Le site du Moulin de Hauterive se trouve dans la ZNIEFF de type 1 vallée de la Sarthe entre Hauterive et Le Mêle-Sur-Sarthe. Le gestionnaire du Moulin de Hauterive est le Syndicat intercommunal d'aménagement de la Sarthe amont.

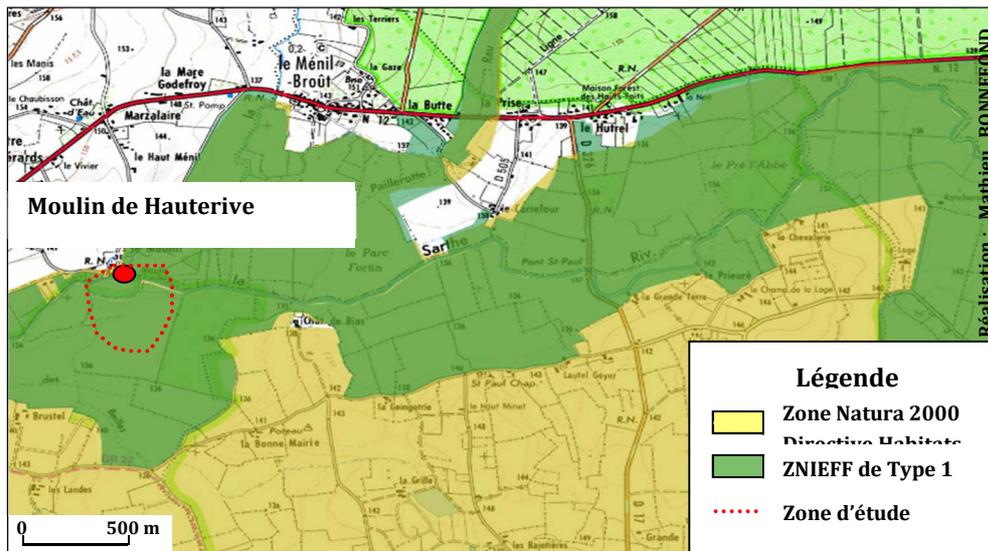


Figure 4 : Localisation du Moulin de Hauterive



Figure 5. Vannes, seuil et prairie humide du Moulin de Hauterive

Rappel des tâches prévues dans le projet de recherche CEZURES

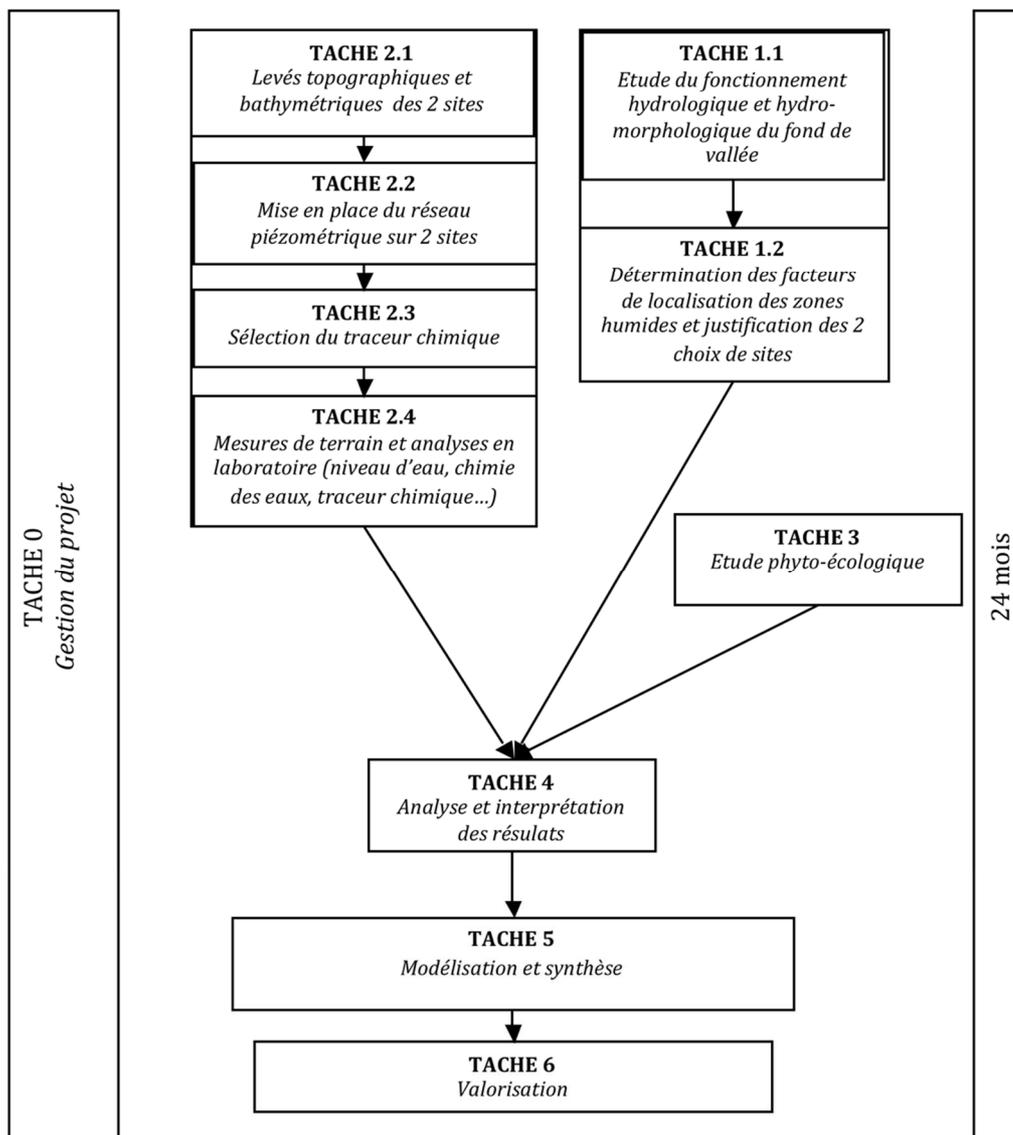


Figure 6 : Organisation du projet en tâches

Tâche 1. Étude du fonctionnement hydrogéomorphologique, hydrologique et hydrogéologique du fond de la vallée de la Sarthe amont et détermination des facteurs de localisation des zones humides

La tâche 1 comprend la mise en évidence des éléments permettant de déterminer des catégories de zones humides selon les configurations naturelles (origine des flux d'eau qui les parcourent ; nappe souterraine, nappe alluviale, apports superficiels) et les aménagements anciens ou plus récents du fond de la vallée de la Sarthe (seuils et barrages, mais aussi voies de communication...).

Tâche 1.1. Étude du fonctionnement hydrologique et hydro-morphologique du fond de vallée

- Constitution d'un référentiel de connaissances : analyse détaillée de la bibliographie, collecte des données existantes disponibles auprès des services de gestion, ONEMA, Agence de l'Eau, DREAL, PNRNM...
- Analyse hydrologique à partir de la station hydrologique de Saint-Céneri-le-Gérei (superficie du BV = 908 km², Module = 7m³/s) et des documents existants.

Tâche 1.2. Détermination des facteurs de localisation des zones humides et identification de la représentativité des sites d'études par rapport à l'ensemble de la vallée de la Sarthe amont.

- Cartographie du fond de la vallée de la Sarthe (lit mineur et lit majeur) à moyenne échelle (1/15000) à partir du terrain, des cartes thématiques, des photographies aériennes et des images satellitaires
- Utilisation des inventaires et pré-localisation de zones humides existants
- Confirmation sur le terrain

La Tâche 1 mobilisera les données issues des études en cours (points nodaux et taux d'étagement). A la fin de cette tâche un premier rapport sera produit à destination de la CLE du SAGE Sarthe-Amont.

Tâche 2. Étude des zones humides dans deux sites d'étude

Tâche 2.1 : Levé topographique et bathymétrique : détermination des formes du lit mineur et du lit majeur

- Levés topographiques : levés LIDAR (aéroporté) en vue de déterminer les microtopographies du fond de vallée qui agissent sur la circulation de l'eau, horizontalement ou verticalement
- Levés bathymétriques du lit (échosondeur monofaisceau) afin de repérer des zones de sédimentation situées en amont des barrages et de déterminer ainsi leurs zones d'influence soumises au ralentissement de la vitesse de l'eau (détermination des courbes de remous).

Tâche 2.2. Mise en place du réseau piézométrique et hydrométrique sur 2 sites

Installation de piézomètres transversalement et longitudinalement au lit majeur afin de suivre les niveaux d'eau dans la nappe alluviale et leurs fluctuations.

Sur le site de Ménil-Broût, il s'agit de caractériser le lien entre la ligne d'eau et la morphologie de la nappe d'accompagnement. Sur ce site, il y a une différence de hauteur d'eau entre les deux bras de la Sarthe. Il s'agit d'observer les effets latéraux des variations des niveaux d'eau, pour cela les piézomètres sont disposés selon deux profils en travers (Figure 7)

Sur le site du Moulin du Désert, il s'agira de caractériser les effets latéraux et longitudinaux des variations de débit et de ligne d'eau sur le fonctionnement des zones humides. Pour cela les piézomètres seront disposés de manière longitudinale (Figure 8). Ce site d'étude est concerné par un projet de restauration de la continuité écologique sous la maîtrise d'ouvrage du PNR Normandie-Maine, il pourra en fonction des résultats de l'étude en cours sur ce barrage être effectué un certain nombre de simulations par un contrôle des vannes actuelles (année 2).

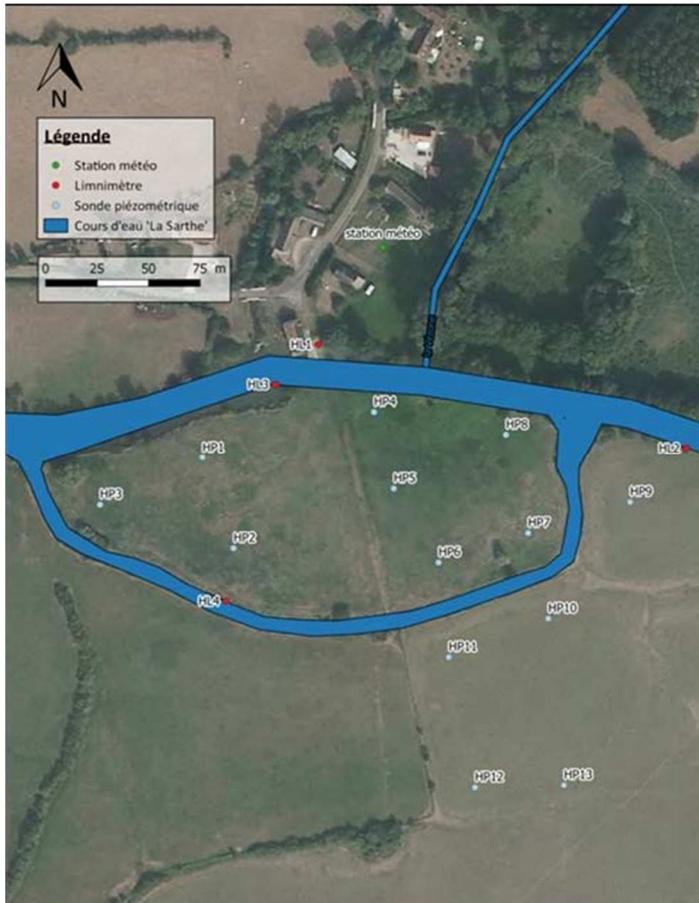


Figure 7 : Réseau de mesures sur le site du moulin de Hauterive



Figure 8 : Réseau de mesures sur le site du Moulin du Désert

Tâche 2.3. Sélection du traceur chimique

Choix du traceur à partir d'analyses de différents paramètres par différentes techniques d'analyse (spectrophotomètre, etc.) : entre autres, on aura recours au dosage des nitrates (NO_3^-), du phosphore (P), du carbone organique, des chlorures (Cl^-), des sulfates (SO_4^{2-})...

Tâche 2.4. Mesures de terrain et analyses en laboratoire (niveau d'eau, chimie des eaux)

- Mesure en continu des niveaux d'eau dans les piézomètres à partir de sondes automatiques
- Suivi du niveau d'eau dans la Sarthe par des limnimètres (type sonde de pression) en liaison avec la station Saint-Céneri-le-Gérei et les résultats de l'étude « Détermination des débits de référence complémentaires sur le bassin versant de la Sarthe Amont) (SAFEGE).

Tâche 3. Etude phyto-écologique des zones humides (Cf. proposition de prestation BIOTOPE)

- Inventaires et suivi des cortèges floristiques au long de l'année et lien avec l'hydromorphie du milieu.
- Cartographies des cortèges floristiques
- Analyse de la sensibilité des espèces végétales aux changements des niveaux d'eau dans le sol

Tâche 4. Analyse et interprétation des résultats

- Délimitation des zones humides à partir des caractéristiques de surface, état des sols.
- Détermination des échanges d'eau entre les zones humides et la Sarthe à partir d'un traceur chimique, de la méthode des bilans hydrologiques et des niveaux piézométriques
- Analyse SIG : traitement spatio-temporel des données obtenues durant la tâche 1 dans l'objectif d'établir la dynamique hydrogéologique et fonctionnement des zones humides
- Évaluation des variables influençant le fonctionnement des zones humides en lien avec les niveaux d'eau dans la Sarthe. Première piste de transposition des résultats de l'étude des deux sites à l'ensemble du bassin de la Sarthe amont.

Tâche 5. Synthèse

- Élaboration d'un schéma général de fonctionnement hydrogéomorphologique et hydrogéologique du fond de vallée de la Sarthe en amont de Moulins-le-Carbonnel et détermination des facteurs de localisation et de fonctionnement des zones humides.
- Réflexion générale sur l'influence des barrages sur les zones humides de la Sarthe, lien avec le taux d'étagement de la rivière, proposition d'un modèle de gestion prenant en considération des prescriptions de la DCE.
- Transfert et généralisation à l'ensemble de la Sarthe amont et à d'autres rivières de même classe hydromorphologique.

Plan général du rapport final

Par rapport au projet initial et en accord avec tous les partenaires, les travaux effectivement réalisés au cours des deux années de la durée du contrat ont été adaptés en fonction :

- de la difficulté de la mise en œuvre des mesures : installation de piézomètres au cours de l'automne 2014 et la production de données a débuté à partir du 1er janvier 2015 et jusqu'au 31 mai 2016. (27 sondes piézométriques et 6 sondes limnimétriques) ;
- de la nécessité de mettre au point un protocole de traitement adapté aux objectifs, suivi bi-hebdomadaire des niveaux d'eau et des paramètres météorologiques, interprétation fondée sur une étude des données moyennes journalières ;
- du coût des analyses d'eau nécessaires pour définir et suivre un traceur qui aurait permis de mieux déterminer les échanges entre rivière et nappe souterraine ; seul un état de la qualité physico-chimique de l'eau a été réalisé à partir de deux campagnes de prélèvements d'eau dans les piézomètres et dans la Sarthe ;
- du temps d'observation insuffisamment long pour un suivi de l'adaptation des cortèges floristiques des zones humides aux modifications des niveaux d'eau.

Ainsi ce rapport contient-il les résultats des travaux effectivement réalisés. Ils sont présentés en deux grandes parties en prenant en considération les tâches du projet de recherche.

La première partie étudie les principaux éléments qui permettent de définir les caractéristiques du milieu agissant sur le fonctionnement des zones humides de fond de vallée ; conditions naturelles, géomorphologiques, hydroclimatologiques et hydrogéologiques et traits majeurs de l'occupation du sol et de la mise en valeur par les aménagements divers (aménagements hydrauliques en particulier).

Plus en détail, nous présenterons :

- un rapide état des connaissances sur les zones humides alluviales et sur le bassin de la Sarthe amont.
- les traits majeurs du bassin versant de la Sarthe amont
- les spécificités du fond de vallée qui contient les zones humides étudiées

La deuxième partie concerne l'étude détaillée des circuits de l'eau et de leurs incidences sur le fonctionnement des zones humides à partir des mesures faites dans les deux sites de Hauterive et de Moulin du Désert ; elle prend en compte des mesures effectuées au cours de 17 mois (janvier 2015 à mai 2016).

La conclusion du rapport fait un point sur les apports de l'étude, les résultats de la modélisation des liaisons entre Sarthe et zones humides, et sur l'évaluation de la représentativité des sites de mesures par rapport au reste de la vallée de la Sarthe (transferts d'échelles).

PREMIERE PARTIE Analyse à l'échelle du bassin versant

1 État des connaissances

Les travaux qui portent sur les zones humides sont nombreux. Elles entrent dans les préoccupations des chercheurs et des gestionnaires depuis une vingtaine d'années. Mais les travaux portant sur l'impact des barrages installés au fil de l'eau sur les zones humides alluviales, objet de nos travaux, sont moins fréquents. Les barrages contribuent à faire remonter les niveaux piézométriques des nappes alluviales (Barnaud, Fustec 2007). Mais l'ampleur de leur incidence n'est connue que dans les grandes lignes (Malavoi 2003). Pour être mise en évidence, elle nécessite que soit installé un dispositif de mesures assez dense, suivi pendant une période suffisamment longue pour révéler ces incidences.

Cet état de l'art fait un rapide point sur le thème des zones humides alluviales et des barrages, sur les outils mis en œuvre pour l'appréhender et sur les connaissances déjà acquises sur les zones humides de la vallée de la Sarthe amont.

1.1 Caractéristiques générales des zones humides

Des travaux conduits sur ce thème montrent que les situations très variables (Fustec et Lefevre 2002) dépendent de multiples facteurs :

- Le fonctionnement hydrogéomorphologique des cours d'eau

La caractéristique des organismes fluviaux en particulier le tracé des cours d'eau, leur pente longitudinale et la largeur des fonds de vallées influencent le fonctionnement hydrogéomorphologique et commandent le transport sédimentaire. Les matériaux du fond alluvial (alluvions et substratum géologique encaissant) jouent un rôle déterminant. Ils favorisent selon leurs caractéristiques (texture, stratification, épaisseur, perméabilité.) des drainages verticaux, (Amoros et Petts 1998) et des circulations latérales d'une grande complexité (Weng et al. 1999, Krebs et Corbonnois 2001, Benjankar et al. 2012), à l'intérieur des vallées. Les temps de transfert sont très variés selon les lieux ; à l'échelle de la saison ou des événements météorologiques (précipitations) ou hydrologiques (crue débordante, étiage) (Russo et al., 2012).

- Les échanges nappe rivière et leurs impacts sur les zones humides.

Les travaux qui portent sur les relations nappe-rivière soulignent la complexité des échanges d'eau sous la surface du sol. Estèves (1988) illustre les difficultés de représentation d'une rivière dans un modèle hydrogéologique. Il montre que l'approche classique, qui consiste à déterminer les échanges à partir d'un potentiel de nappe et d'une hauteur d'eau dans la rivière calculés en un même nœud, n'est pas satisfaisante. La seule prise en compte des niveaux d'eau n'est pas suffisante pour déterminer les débits échangés entre une rivière et un aquifère. Le calage de la drainance du lit nécessite également la connaissance de valeurs de débits échangés déterminées par des méthodes indirectes. Ainsi, la méthode des bilans hydrologiques pour un tronçon de rivière se fonde sur la comparaison entre les volumes écoulés aux stations hydrométriques amont et aval, pour un pas de temps donné. Elle permet de déterminer par différence les volumes

échangés entre la rivière et l'aquifère en tenant compte du temps de transfert entre les deux stations (pour les pas de temps courts) et des autres facteurs de perte ou d'apport d'eau. Mais il est difficile de mesurer ces volumes et certaines études prennent en considération les niveaux d'eau plus faciles à évaluer (Barnaud et Fustec, 2007).

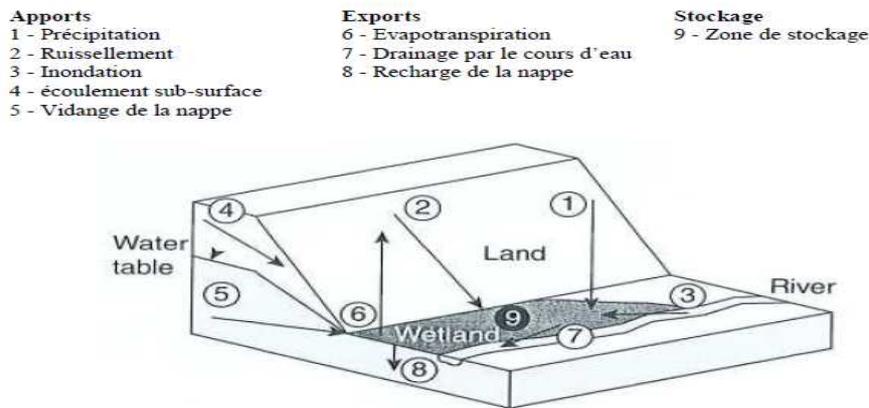


Figure 9 : Le bilan hydrologique d'une zone humide (Baker et al. 2009)

Les zones humides sont des lieux d'échange d'eau. L'eau qui les alimente et les entretient a différentes origines (Lorah et al 2009). Les apports pris en compte dans le bilan hydrologique, proviennent des rivières et des aquifères entre lesquels les échanges s'établissent selon des directions longitudinales (amont aval) et transversales (lit fluvial / nappe). Le sens de ces apports varie selon les saisons et les situations hydrologiques. Les apports directs livrés par les précipitations jouent également un rôle important et déterminent des échanges verticaux entre la nappe et la surface du sol (González Del Tánago, 1998). Ils agissent sur l'état d'humidité des différents niveaux des sols, interface importante entre l'atmosphère et la nappe souterraine.

Le qualificatif de zone humide accordé à la plaine alluviale tient au fait que la nappe phréatique se situe à proximité de la surface du sol durant la majeure partie de l'année. Cela permet que la zone humide se forme et soit entretenue. Le niveau de la nappe et le degré d'humidité des premiers horizons de sol résultent de la combinaison de flux verticaux (précipitation, évapotranspiration) et de flux horizontaux (écoulement dans la nappe alluviale, débordement de la rivière) (Mourier et al., 2008).

La zone non-saturée (SNS) du sol représente la zone de battement de la nappe superficielle de la zone humide. Le passage répété de conditions oxygénées à des conditions anoxiques gouverne la dynamique des processus biogéochimiques qui s'y déroulent.

Tout comme le sol, la zone non saturée peut être le siège de transformations bio-physico-chimiques de composés minéraux et organiques. Cela confère à ces deux milieux un véritable rôle de filtration de l'eau drainant vers la nappe. Cependant, ces zones de transition ne constituent pas un filtre parfait puisque des migrations de substances, provenant des activités agricoles et industrielles, et potentiellement polluantes, sont possibles vers l'environnement plus profond. La zone non saturée est donc une zone de transfert d'eau, mais également de polluants. Elles participent ainsi à la biodégradation de ces polluants. Il est donc important d'en connaître le fonctionnement.

Enfin les caractéristiques des zones humides des fonds de vallées qui tiennent des interrelations constantes avec le milieu aquatique et avec le milieu terrestre qu'elles environnent sont fortement

influencées par les modifications liées aux interventions d'origine anthropique ; prélèvements d'eau, drainage agricole, aménagements des cours d'eau, constructions diverses dans les fonds alluviaux... (Poirier, 2015).

- Les aménagements

Du point de vue de l'ingénierie, la faible réactivité des rivières de plaines et de plateaux dont fait partie tout le réseau hydrographique du Nord Ouest de la France, a permis qu'elles soient fortement aménagées. Mais leur renaturation (restauration de la continuité écologique, et sédimentaire imposée par la DCE) n'est pas sans poser de problème. Si on a parfois enregistré des conséquences peu visibles à court et moyen terme, cela n'exclut pas qu'en cas de restauration des continuités écologiques et sédimentaires, le réajustement, de l'habitat aquatique en particulier, ait lieu sur le long terme. Certaines altérations sont irréversibles à l'échelle de temps humain et souvent les rivières de faible énergie mettent plusieurs décennies à retrouver un nouveau fonctionnement hydro-écologique (Rhoads et Urban 1997 ; Guneralp et Rhoads 2009).

Les travaux qui prennent en considération les liens entre zones humides et aménagements hydrauliques sont peu nombreux (Benjankar et al., 2012). Situées en amont de barrage, elles profitent souvent de conditions favorables dues à l'aménagement des lits fluviaux ainsi que de configurations naturelles propices comme des haut-fonds rocheux ou des ruptures de la pente longitudinale des lits fluviaux (Corbonnois et al., 2012). Les modalités de l'ajustement des dimensions des zones humides et des fluctuations d'eau qui les caractérisent à l'arasement de barrages, sont peu connues.

Les impacts principaux des barrages sur les lits fluviaux et les zones humides alluviales sont étudiés depuis quelques années. Moss (1998) et Mccully (2001) en ont proposé une première liste il y a 15 ans :

- interruption du cycle naturel d'équilibre. Le premier effet est l'altération des plantes et des animaux qui dépendent de la rivière. De nombreux animaux coordonnent leurs cycles reproductifs avec les crues ordinaires (annuelles). D'une autre part, la végétation rivulaire change de façon radicale lors de l'interruption de la connexion hydrique rivière-plaine alluviale.
- modification du lit. Le contrôle du débit conserve les sédiments de granulométrie fine, ainsi que les animaux et les plantes aquatiques de petite taille en aval. Ceci provoque la perte d'habitat pour de nombreux organismes vivants. La rétention des matériaux fins en amont des barrages oblige parfois au dragage des lits et à la construction de bourrelets artificiels de berges
- changement de températures. Les rivières ont tendance à garder des températures homogènes. Comme dans les lacs naturels (Touchart, 2005), les eaux superficielles sont plus chaudes, alors que les eaux profondes sont froides, les échanges entre les deux sont faibles. L'eau libérée par les barrages provient généralement de la partie inférieure de la lame d'eau, ce qui signifie que les eaux sont plus froides de ce qu'elles le seraient dans des conditions naturelles.
- obstacle à la migration de poissons. Les poissons doivent se déplacer de l'amont à l'aval et inversement pour compléter leur cycle de vie. Les barrages sont souvent construits sans passage pour les poissons.

Ces effets n'ont pas la même empreinte pour les barrages de petite chute d'eau (hauteur inférieure à 2 m), comme c'est le cas de notre zone d'étude. Les contrastes amont/aval barrage, tant hydrologiques qu'écologiques, y sont moins accusés que pour les barrages plus hauts. (Nilsson et Berggren, 2000). Ils contribuent cependant à augmenter la durée des débits moyens du fait de l'atténuation des pics de crue.

On admet en général que l'arasement de barrage entraîne en leur amont, l'abaissement du niveau piézométrique, favorisant l'assèchement des zones humides (ONEMA 2010) même si les situations de terrain sont très variables comme nous le montrerons d'ailleurs.

1.2 Évaluation fonctionnelle des zones humides

L'identification des zones humides nécessite de définir une série de facteurs qui agissent conjointement. Ce sont la topographie, la géomorphologie, l'hydrologie, les sols et la végétation. Pour chacun d'eux il existe des indicateurs ou des inventaires qui aident à leur lecture pour la délimitation de la surface couverte par les zones humides.

La végétation constitue un des meilleurs révélateurs de l'état hydrique et de la dynamique de l'eau dans les zones humides. Elle s'adapte à l'hydromorphie des sols et à la durée des submersions par l'eau des crues débordantes (Krebs et al. 1999, Muller). Elle sert de ce fait à caractériser les zones humides et à les classifier.

On admet en général que la végétation se répartit sous forme d'anneaux concentriques autour des secteurs en eau en fonction des besoins en humidité et des seuils d'acceptation d'inondation en termes de fréquence et quantité. La sélection de plantes indicatrices de zones humides constitue une des techniques de travail les plus récurrentes pour la pré-localisation des zones humides. Ces espèces varient d'une région biogéographique à une autre. Ci-dessous, un exemple d'inventaire de plantes issu du SAGE du Huisne (2010) (Figure 10).

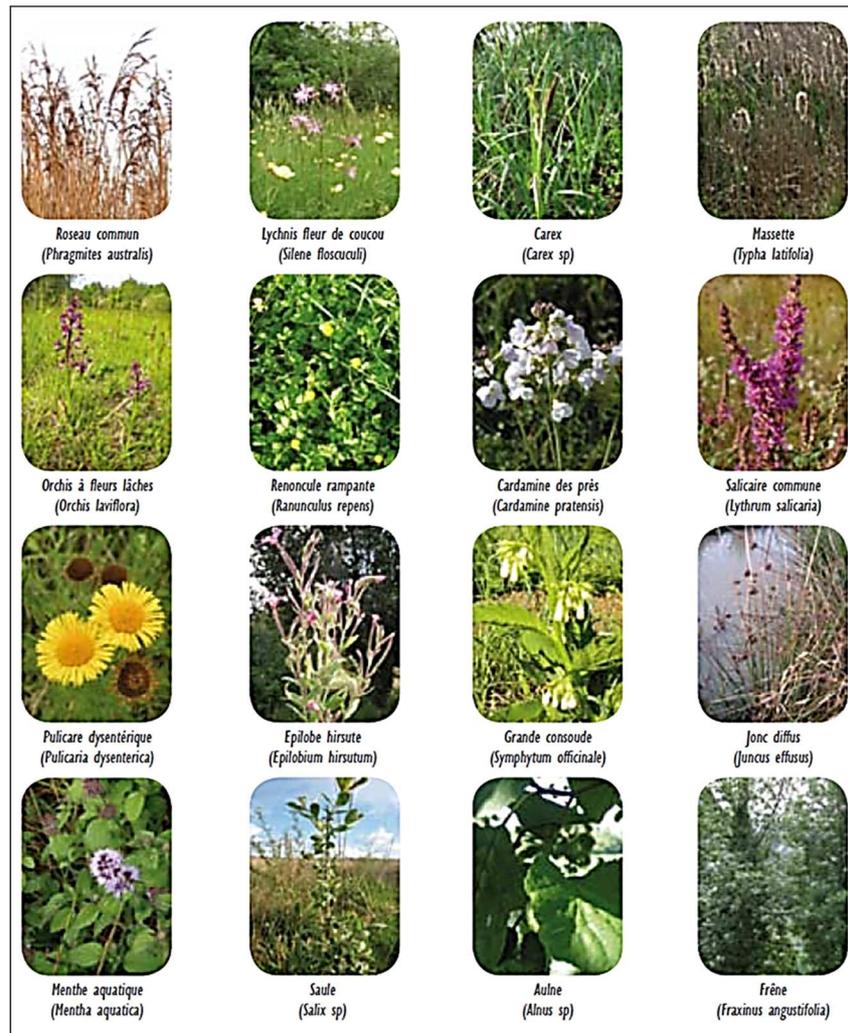


Figure 10 : Inventaire de plantes indicatrices des zones humides. (Source: SAGE de l’Huisne 2010)

Les critères de définition des zones humides concernant les sols sont basés sur leur structure pour dévoiler la présence prolongée d’eau d’origine naturelle. L’engorgement des sols par l’eau peut se révéler dans la morphologie des sols sous forme de traces qui perdurent dans le temps appelées « traits d’hydromorphie ». Les sols de zones humides se caractérisent généralement par la présence d’un ou plusieurs traits d’hydromorphie (MEDDE, GIS. 2013) :

- des traits rédoxiques (g ou -g) couvrant plus de 5% la surface de l’horizon sur une coupe verticale (coloration orangée) ;
- des horizons réductiques (Gr et Go, G) où le manque d’oxygène crée un milieu riche en fer (coloration bleuâtre/verdâtre) ;
- des horizons histiques (H), entièrement constitués de matières organiques.

Les formes du relief favorisent le drainage ou l’accumulation de l’eau. Ainsi, des indices ont été formulés afin de calculer la susceptibilité du relief à l’inondation selon des causes topographiques, hydrogéologiques et climatiques en prenant en considération la pente, la transmissivité et les précipitations annuelles.

Évidemment, l'hydrologie est aussi un aspect important à prendre en compte. Elle va déterminer la vulnérabilité des zones humides face à l'altération des régimes d'alimentation (Curie et al., 2004) :

- régime hydrologique dominé par des apports atmosphériques (précipitations), de transferts rapides ;
- régime hydrologique dominé par des apports souterrains (aquifères), de transferts plus lents,
- régime mixte.

Le comportement de l'ensemble de ces facteurs détermine la dynamique de l'hydrosystème et la spatialisation des zones humides.

La classification des zones humides peut se faire d'une façon intuitive à partir d'une typologie fonctionnelle ou de façon progressive à travers d'une typologie fonctionnelle.

Les typologies descriptives des zones humides sont encore subdivisées (hiérarchisée et non hiérarchisée). Parmi les premières on trouve CORINE Biotope, à l'échelle européenne, basée sur la géomorphologie (à petite échelle) et la combinaison des communautés végétales (à grande échelle). Le référent mondial des non hiérarchisés est celle de la convention Ramsar, peu adaptée à des études à l'échelle de détail.

Les typologies fonctionnelles sont nées au cours des années 90. Il s'agit de classifications plus complexes, mais de plus grande précision. Elles démarrent sous forme d'inventaire, suivi par une classification. Les différentes classes sont caractérisées à partir du travail sur le terrain. Ensuite on identifie les rapports et on évalue les services écosystémiques fournis à la société.

Dans la décennie des années 1980 une approche multi-échelle est développée, la Wetland Évaluation Technique (WET). À l'échelle du globe, on recourt à la photo-interprétation, tandis qu'aux échelles fines, le travail sur le terrain est impératif. C'est une approche généraliste qui manque de précision, malgré sa capacité pour établir les rapports entre les fonctions présentes.

En Bretagne, une méthode a été mise en place, permettant la caractérisation de la végétation des zones humides à travers deux facteurs : la disponibilité en nutriments assimilables et la maturité (âge) de la zone humide. Il s'agit d'une méthode assez précise (échelle la plus fine de la typologie CORINE Biotope), mais elle a besoin de solides connaissances en phyto-sociologie (Rapinel 2012). Les HGMU (HydroGeoMorphicUnits) sont des surfaces dont les caractéristiques morphologiques, pédologiques et de couverture végétale sont homogènes. Chaque critère compte sur des indicateurs qui permettent de caractériser les processus qui se manifestent. Ces unités permettent d'évaluer les fonctions des zones humides et pour leur délimitation il est possible d'utiliser le logiciel Evaluwet ou, à défaut, les principales unités paysagères identifiées sur le terrain et à l'aide des images satellites disponibles.

Une autre approche est PEEW (Potential, Existing, Efficient Wetlands), qui divise les zones humides en trois compartiments : zone humide potentielle, zone humide effective et zone humide efficace (Tableau 3). La première correspond aux zones qui, sous de conditions naturelles, sont humides mais elles ont perdu ce caractère du fait des aménagements. La deuxième prend en compte une saturation de la capacité au champ du sol à 100% en hiver. La troisième est plus complexe car il s'agit de milieux très hétérogènes ; correspond à une fonction principale

déterminée. Cette approche permet de réaliser un inventaire spatialisé des zones humides et faciliter les travaux de gestion (Clément et al., 2008).

Tableau 3 : Méthodes d’analyse des compartiments des zones humides. (Source : CLEMENT et al., 2008)

COMPARTIMENT	METHODE PLUS PERTINENTE POUR SON IDENTIFICATION
Zone potentielle	Hydromorphogie
Zone effective	Végétation et hydromorphogie
Zone efficace	Télédétection (suivi multitemporel)

Le rapport entre le cours d’eau, le bassin et la zone humide peut aussi produire les clés pour l’évaluation des fonctions hydrologiques et biogéochimiques. Il requiert un suivi hydrologique temporel continu et de fréquence élevée. Ainsi, l’usage de divers indices rendent possible l’étude du temps de remplissage de la zone humide, les inondations, les flux internes et la continuité hydraulique.

La plus grande des zones humides européennes oblige à une adaptation des méthodes ici mentionnées. L’approche FAP (Functional assessment procedure) est une adaptation de la méthode HGM. Pour son élaboration, des zones de calibrage en Irlande et en Espagne ont été étudiées et des mesures régulières de variables physico-chimiques, prises. Après trois phases, 12 fonctions hydrologiques, biogéochimiques et écologiques peuvent être étudiées (Rapinel, 2012).

1.3 Méthodes d’étude des zones humides, apport de la télédétection

La nature diverse des zones humides intérieures a mené à la production de méthodes d’identification et de classification (Lemerrier et al 2013, Zro et al. 2014). Elles permettent d’appréhender les niveaux d’eau comme cela a été présenté précédemment mais aussi de les localiser sur le terrain (Bonnet et al. 2015). Parmi celles-ci, la télédétection a montré son potentiel pour l’inventaire et la classification à différentes échelles, en diminuant le temps et le coût et en agrandissant l’espace d’analyse.

Depuis l’apparition de ces images, de méthodes nombreuses et de plus en plus puissantes ont été mises au point, allant de l’interprétation visuelle des photos aériennes à l’analyse des valeurs spectrales à travers des algorithmes complexes (Sellin et al. 2015).

Dans le but d’améliorer les résultats, l’exploitation des images, est souvent combinée à d’autres facteurs à travers les outils SIG. L’utilisation de données comme l’altitude, les types de sol, l’occupation du sol ou les inventaires de Végétation peuvent aider à augmenter la précision des opérations d’identification et classification (Ozesmi et Bauer, 2001).

Les satellites utilisés sont divers, mais on privilège ceux de haute résolution et de très haute résolution en fonction de l’accès aux données et l’échelle de l’étude. Les plus courants sont Landsat et SPOT, suivis par Quickbird et RapidEye. Les deux premiers, de libre accès, sont plus utilisés ;

SPOT a une meilleure résolution spatiale, Landsat compte un plus grand nombre de bandes, comme l'infrarouge moyen (qui fournit de l'information sur l'humidité du sol).

Certaines études utilisent la télédétection active : ERS-1, JERS, RADARSAT et SAR. Celle-ci apporte trois avantages : les images peuvent être prises à n'importe quelle heure de la journée et sous toutes les conditions météorologiques, l'information peut s'acquérir à plusieurs niveaux (utile quand l'eau a une couverture végétale dense) et on peut faire des demandes d'images pour une zone d'étude à des dates spécifiques.

Parmi les techniques les plus utilisées on trouve l'interprétation visuelle, la classification supervisée (Lee 2011), la classification non supervisée, la classification hybride, l'Analyse en Composants Principales, la classification orientée objet (Hurd et al., 2006 ; Frohn et al, 2009), le « tasseled cap » (Baig et al., 2014, Lebaut et Manceau, 2015), l'étude de la confusion et les indices de végétation (NDVI, entre autres) et de l'eau (NDWI).

L'addition du facteur temps à ces techniques apporte toujours des solutions plus détaillées et permet de gagner en précision. L'étude multi-temporelle aide à la discrimination entre les cultures et les prairies de pâturage simplement à travers l'interprétation visuelle des compositions colorées. Il existe des expériences qui utilisent des images prises à des dates différentes selon la localisation de la zone d'étude, le matériel disponible et la nature des zones humides. Ainsi, certaines études privilégient les images d'octobre et janvier, d'autres du printemps tardif et début de l'été. Cela dépend de l'objectif de l'étude : des zones inondées en permanence et de grande taille, ou des zones inondées pendant quelques mois et avec une végétation spécifique (Ozesmi et Bauer, 2001) (Figure 11).

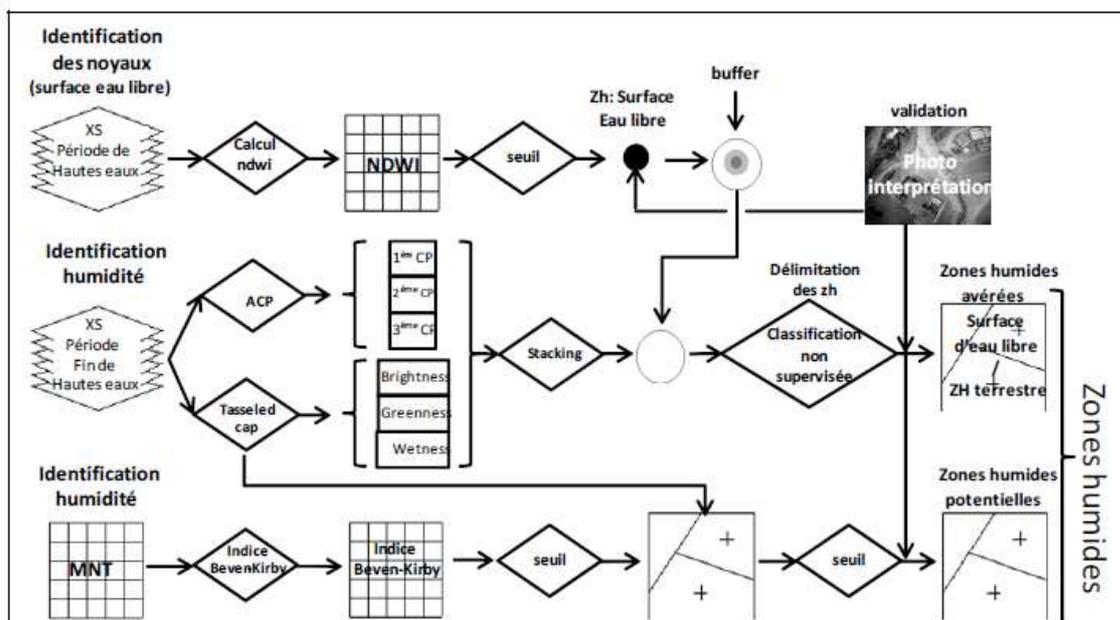


Figure 11 : Exemple de méthodologie appliquée à l'identification des zones humides. (Source : Lebaut et Manceau, 2015)

1.4 Données et travaux récents portant sur la Sarthe amont

Nos analyses prennent en compte les données de diverses sources ainsi que les travaux antérieurs publiés dans les rapports d'étude.

Les études réalisées par le SAGE apportent les premiers éclairages sur cette problématique : prélocalisation des zones humides, (inventaire cartographique des zones humides, Hardy SARL 2008), repérage des seuils et barrages (ROE) et description de leurs caractéristiques. D'autres travaux fournissent des éléments relatifs au fonctionnement hydrologique de ces espaces en particulier en périodes de crue.

La collecte des données s'est faite auprès des gestionnaires et auprès des acteurs du territoire local et des personnes qui ont une connaissance avancée du territoire. Nous avons également téléchargé de nombreuses données en ligne. Le tableau (Tableau 4) suivant permet de faire un point sur les différents acteurs et données mobilisées qui nous ont servi pour la réalisation de ce document.

Tableau 4 : Données collectées

<i>Acteurs locaux</i>	<i>Type de données fournies</i>
<i>Agence de l'Eau Loire Bretagne</i>	Qualité de l'eau ; Prélèvements d'eau potable, irrigation, industriels...
<i>Institution Interdépartementale de la Sarthe Amont</i>	Données géographiques sur le territoire (IGN, BRGM, inventaire zones humides...)
<i>Parc Naturel Régional Normandie Maine</i>	Données concernant la gestion naturelle (limites PNR, ZNIEFF1, ZNIEFF2...)
<i>Syndicat Départemental de l'Eau de l'Orne</i>	Données du réseau piézométriques sur le territoire
<i>Sites</i>	<i>Type de données téléchargées</i>
<i>BanqueHydro</i>	Données hydrologiques à la Station de Saint-Cénéri-le-Gérei
<i>MétéoFrance</i>	Données précipitations et évapotranspiration à la Station météorologique d'Alençon-Valframbert
<i>InfoClimat</i>	Températures à la station de météorologique d'Alençon-Valframbert
<i>ONEMA</i>	Le Référentiel des obstacles à l'écoulement (ROE)
<i>Géoportail</i>	Photos aériennes
<i>Corine Land Cover</i>	Données d'occupation des sols
<i>Agreste</i>	Recensement agricole et régions agricoles
<i>IREP</i>	Prélèvements d'eau
<i>Autres sources</i>	<i>Type de données fournies</i>
<i>Travaux de ZiadAlhaskeer</i>	Tronçons de vallée et de fond de vallée
<i>Amandine Gatién</i>	Informations sur le territoire
<i>Propriétaires des parcelles des sites de mesures</i>	Demandes d'autorisation

Tableau 5 : Liste de travaux préalables sur la zone d'étude

Organisme	Année	Intitulé	Contenu
BIOTOPE, CNAM	2015	Etude phyto-écologique des zones humides sur les sites du Moulin du Désert (en Aval d'Alençon) et Moulin du Menil-Brout (en amont d'Alençon)	Inventaire des conditions physiques, des habitats cartographiés et des milieux herbacés et synthèse des végétations présentes.
SARTHE AMONT	2005	Guide technique. Inventaire des zones humides à une échelle locale. SAGE de la Sarthe Amont	Fonctions naturelles des zones humides, inventaire des zones humides, gestion et restauration des zones humides et cadre réglementaire. Inclus des fiches de milieux détachées.
PARC NATUREL REGIONAL NORMANDIE- MAINE	2008	Site Natura 2000 FR 2500107. Haute Vallée de la Sarthe. Document d'objectifs	Objectifs et présentation du site, état des lieux et diagnostic, définition d'enjeux, mesures de gestion et plan du travail.
Laboratoire ESO 6590 Université du Maine	2011	PATRA Volet 2. Moulin et barrages du bassin de la Maine	Aménagements hydrauliques et étude de secteurs représentatifs.
PARC NATUREL REGIONAL NORMANDIE- MAINE	2008	Site Natura 2000 FR 2500107. Haute vallée de la Sarthe. Atlas cartographique. Partie 1	Localisation du site; réseau hydrographique ; périmètres ZNIEFF, APPB, réserve de chasse, ZPPAUP et du PNR Normandie-Maine ; habitats naturels d'intérêt communautaire ; zonages réglementaires du PPRI ; hiérarchisation des enjeux; surfaces contractualisables et cartographie des habitats de prairies maigres de fauche potentiels.
PARC NATUREL REGIONAL NORMANDIE- MAINE		Inventaire des espèces patrimoniales de la Haute Vallée de la Sarthe	Contexte, analyse critique du projet, protocoles, résultats et conclusions.
Laboratoire ESO 6590 Université du Maine	2015	Les caractéristiques du bassin versant de la Sarthe amont. Diagnostic préalable à l'étude de zones humides en vue de la restauration de la continuité écologique.	Le bassin versant, les caractéristiques hydro-climatiques du bassin versant et la vallée de la Sarthe.
CNAM, ESGT	2015	Modélisation par l'outil SIG de la relation nappe-phréatique-rivière en zone humide : mise en œuvre d'une base des données et d'une méthodologie d'interpolation	Les zones humides, présentation des sites et des données, l'outil SIG pour la modélisation des nappes phréatiques et mise en œuvre d'une méthode d'interpolation.

Conclusion :

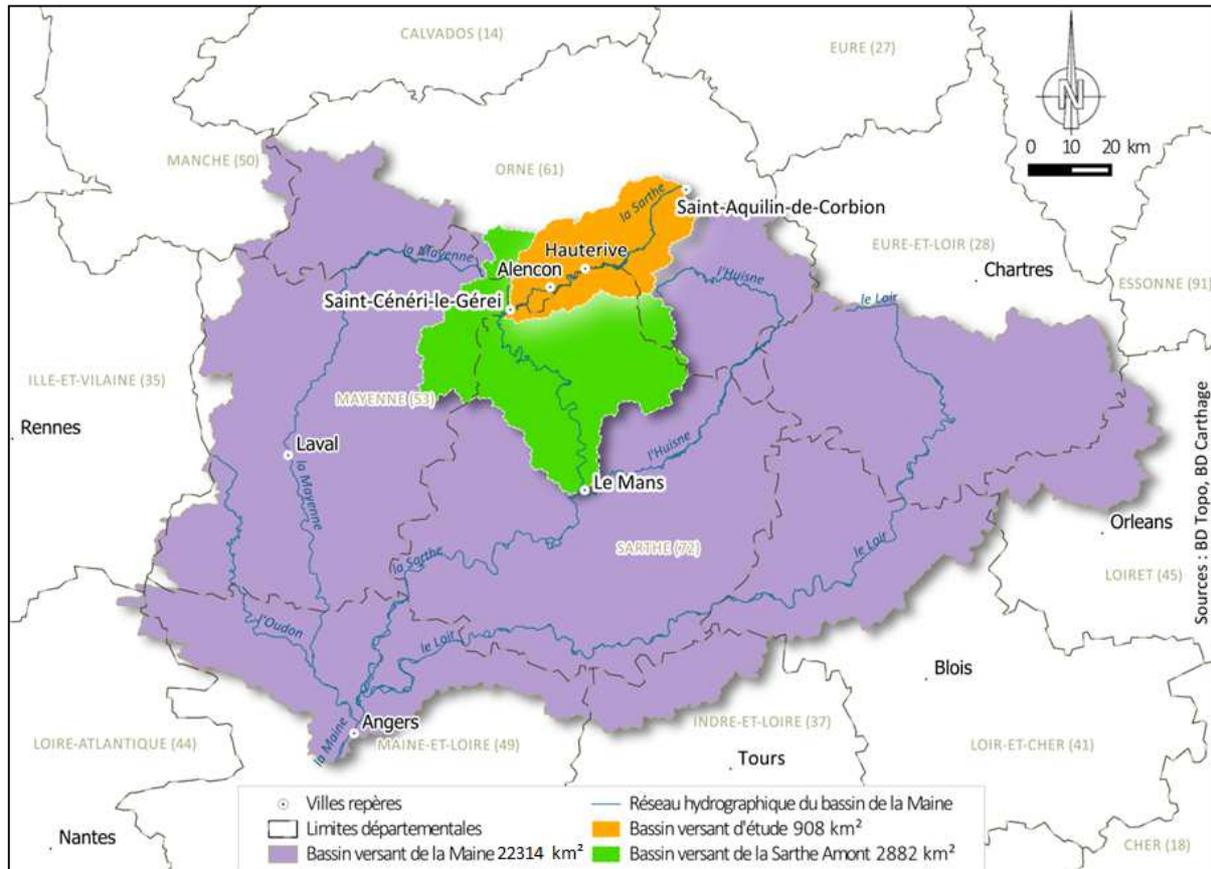
Le thème des zones humides est vaste et seuls les éléments directement en rapport avec le projet CEZURES ont été évoqués. On s'aperçoit ainsi que les savoirs acquis sur les zones humides de fonds de vallées sont disparates. Les liens avec les barrages au fil de l'eau sont évoqués le plus souvent par des approches qualitatives. Les réseaux de mesures permettant de suivre les échanges d'eau entre rivière et nappe alluviale qui conditionnent le fonctionnement des zones humides sont peu mis en place compte tenu de la relative lourdeur des installations et de leur suivi.

Nous retiendrons pour notre analyse et en conformité avec le descriptif du projet, deux échelles pour l'étude des zones humides :

- celles de l'ensemble de la vallée de la Sarthe positionnée au préalable dans son bassin versant :
 - analyse du milieu par une approche morphométrique permettant de déterminer la variété des configurations du fond de vallée. Les données traitées proviennent des documents divers, cartes topographiques IGN et géologique du BRGM.
 - étude du bilan de l'eau par une approche hydrologique et hydrogéologique.
 - analyse de la configuration des zones humides alluviale à partir des documents préexistants et de données issues d'images satellites traitées par les méthodes de la télédétection.
- celles des sites de mesures :
 - suivi des paramètres climatologiques, hydrologiques et hydrogéologiques,
 - étude de la végétation en lien avec les chemins de l'eau en surface et à travers les sédiments qui remplissent le fond de vallée.

2 Le bassin versant de la Sarthe en amont de la station de Moulins le Carbonnel

Le territoire d'étude se situe en tête du bassin versant de la Sarthe Amont à cheval sur le département de l'Orne (82% de la superficie) et le département de la Sarthe (18% de la superficie). L'exutoire du bassin versant est fixé à la station hydrométrique de Saint Ceneri le Girei.



2.1 Physiographie du bassin versant

Le bassin versant, parcouru par la Sarthe, couvre un territoire de 908 km² avec un périmètre de 159 km. Il est allongé avec un indice de compacité de Gravelius (K_c) de 1.48 et un indice d'allongement d'Horton de 2.55 (Annexe I.1).

Dans ce bassin, les altitudes sont peu élevées et peu contrastées. Leur répartition lui confère une allure de cuvette allongée légèrement asymétrique, selon une direction Est-Nord-Est/Sud-Sud-Ouest. Le fond est à 130-140m à l'est d'Alençon. Les altitudes sont les plus élevées au Nord-Ouest où elles dépassent les 350 m (maximum 411 m au niveau de la Butte Chaumont, à proximité de la forêt d'Ecouves). A l'Est, les plus hautes altitudes ne dépassent pas les 300m L'exutoire est à 115 m.

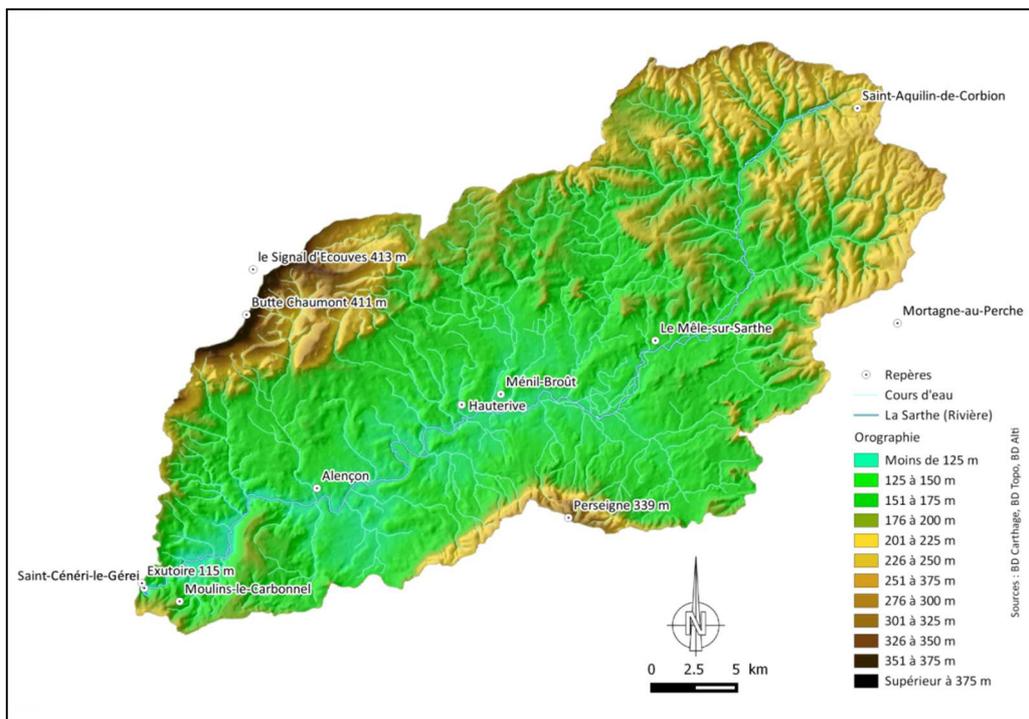


Figure 13 : Carte orographique du bassin versant de la Sarthe amont

La courbe hypsométrique (Figure 14), présente la répartition des altitudes dans le bassin par tranches de 25m de dénivelés. Elle montre que les valeurs en dessous de 125 m sont peu répandues. Celles qui sont comprises entre 125 et 200 m représentent 70% des surfaces de ce territoire L'altitude médiane du bassin versant est comprise entre 172 et 173 m.

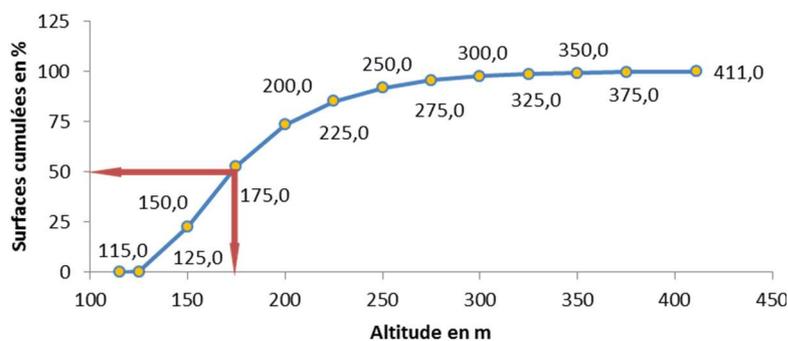


Figure 14 : Courbe hypsométrique. (Source : BD Alti)

Le bassin versant est drainé par la Sarthe longue de 88 km et par de nombreux affluents. La densité de drainage est élevée (Tableau 6).

Tableau 6 : Densité du réseau (Source : BD Carthage)

Densité hydrographique	Densité de drainage
Nombre de drains par unité de surface	Linéaire de rivière par kilomètre carré
$F=849/908=0.935$	$Dd=901/908=0.992$
F : Densité hydrographique en km ²	Dd : Densité de drainage
Ni : Nombre de cours d'eau	
A = Superficie du bassin	

2.2 La géomorphologie (relief et substratum)

Le relief du bassin versant correspond à un bas plateau disséqué par la Sarthe et ses affluents. Ses configurations sont à mettre sur le compte du substratum et des conditions récentes de la morphogénèse. Le substratum est composé de deux ensembles de matériaux.

Les roches les plus anciennes appartiennent au massif armoricain et affleurent vers l'exutoire du bassin en aval d'Alençon. Il s'agit des couches plissées du Primaire (Cambrien, Ordovicien, Silurien et Dévonien) qui arment les reliefs de la Forêt d'Ecouves du Mont des Avaloirs et de la Forêt de Perseigne. Ce sont généralement des grès quartzitiques épais de 200 à 400 m qui ont résisté à l'arasement. Y sont associées des roches endogènes, constituées d'ignimbrites et de granites. Les granites affleurent dans les Alpes mancelles à l'extrême aval du bassin. Très localement au centre sud et au centre nord affleurent les flyschs du Briovérien sous les matériaux du Primaire.

Ce substratum ancien supporte en discordance les couches sédimentaires du secondaire qui appartiennent à l'ouest du bassin de Paris. La transgression marine a commencé au Lias et a progressé vers le Nord-ouest jusqu'au milieu du Jurassique. Les strates les plus anciennes formées de calcaires déposés au Bajocien et au Bathonien, affleurent autour d'Alençon. Rapidement vers l'Est ce sont les sédiments du Callovien, marno-sableux comprenant parfois des bancs de grès ou de calcaires, qui prennent le relai. Dans la moitié est du bassin les couches du Jurassique sont surmontées en discordance par les matériaux Crétacé allant de l'Albien au Cénomaniens (sables et craie prédominants).

Cette couverture sédimentaire d'époque secondaire a été déformée du fait de la tectonique. Les accidents principaux sont des failles qui ont imprimé leur direction Nord-Est/Sud-Ouest à tout le bassin de la Sarthe amont. La plupart sont ajustées sur ceux du socle qui ont rejoué récemment. Deux failles majeures affaissent entre la forêt d'Ecouves et celle de Perseigne un vaste graben drainé actuellement par la Sarthe en amont d'Alençon.

Plus en détail, les couches du secondaire sont inclinées vers l'Est et sont parcourues par des flexures de direction grossièrement Est-Ouest comme cela est reproduit sur le schéma structural de la carte géologique du Mortagne-au-Perche (Moguedet 1998).

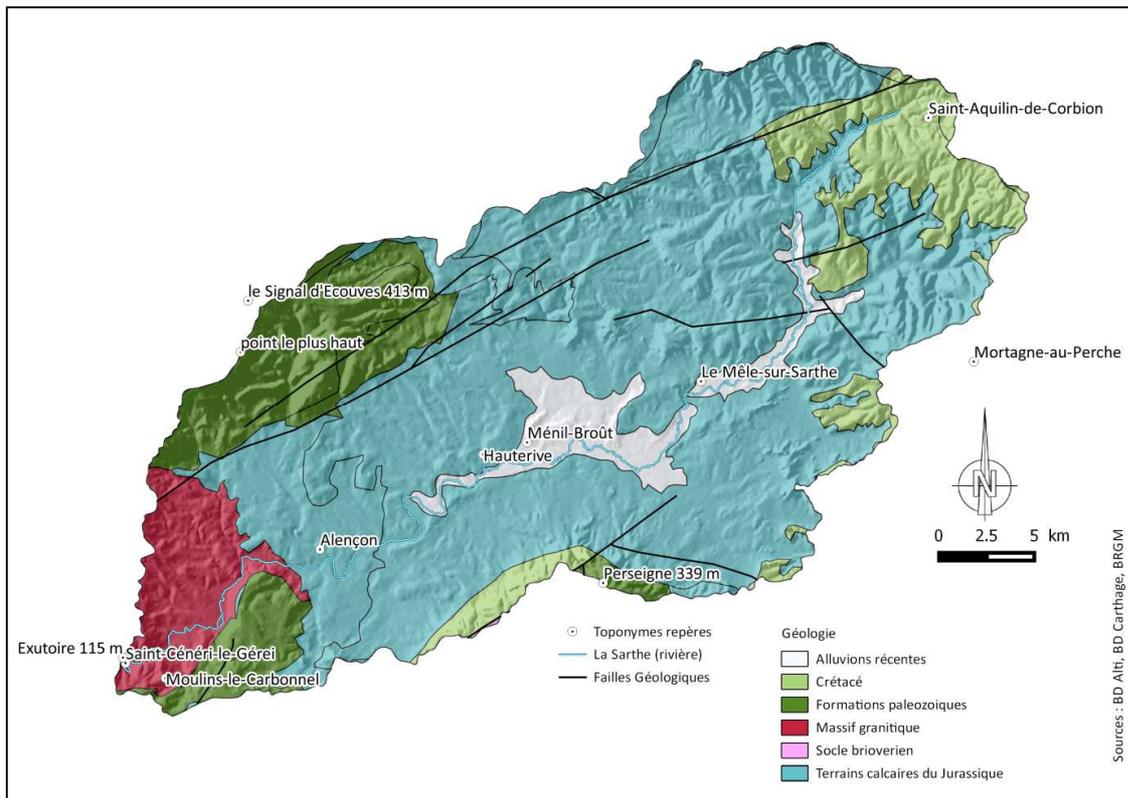


Figure 15 : Carte géologique simplifiée du bassin versant de la Sarthe amont

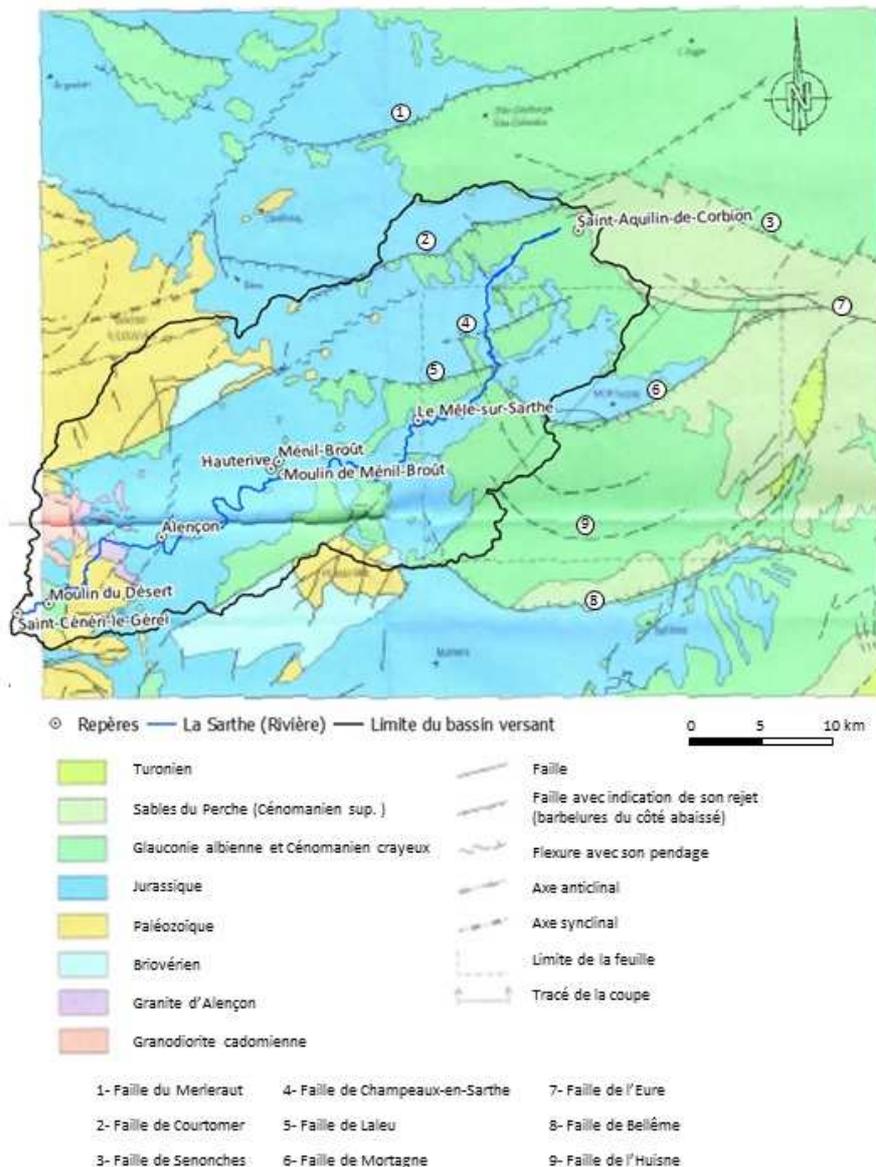


Figure 16. Schéma structural de la carte géologique (Feuille 252 de Mortagne-au-Perche (1998) G.Moguedet)

En dehors des calcaires qui se trouvent près d'Alençon, les autres matériaux sont modérément résistants à l'érosion ce qui explique pour ces parties sédimentaires, le relief faiblement marqué. Les strates sont composées de marnes et de sable parfois parcourues par des niveaux de grès et de minces bancs de calcaire. Ces matériaux sont modérément perméables mais peuvent contenir des réserves souterraines d'eau qui servent en particulier à l'alimentation en eau potable (AEP).

Dégagé au cours du Quaternaire par l'érosion sous climat périglaciaire et tempéré, le relief a été façonné à partir de l'enfoncement du réseau hydrographique dans une surface d'aplanissement polygénique (Infracrétacé et Tertiaire), affectée par des déformations tectoniques récentes (Figure 16). Il en subsiste des matériaux épars composés :

- d'altérites diverses, argiles à silex, blocs silicifiés qui tapissent les plateaux de la partie orientale du bassin, où affleurent des couches du Cénomaniens,

- des limons éoliens du Quaternaire,
- des colluvions qui nappent la plupart des versants
- des alluvions mises en place par la Sarthe et ses affluents irrégulièrement conservées sur les versants de la vallée.

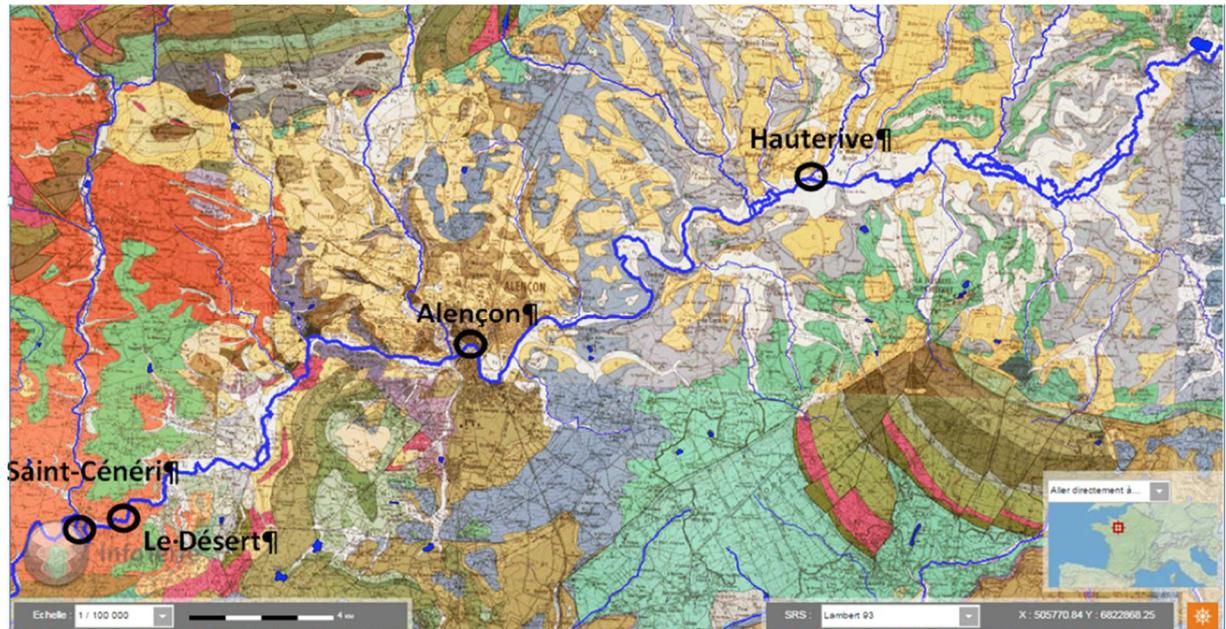


Figure 17 : Géologie de la zone d'étude (source BRGM)

2.3 Les aquifères

Les réserves souterraines sont assez peu abondantes. Elles sont stockées dans plusieurs aquifères principalement constituées par les couches sédimentaires du bassin de Paris.

D'après les données du BRGM (BRGM-BDLISA, 2013b), on distingue dix unités aquifères, deux unités semi-perméables et trois unités imperméables (Figure 18). Elles peuvent être captives, à parties libres et captives ou libres (Figure 19).



Figure 18 : Unités BDLISA par nature. Bleu : unités aquifères ; Jaune : unités semi-perméables ; Orange : unités imperméables. Echelle : 1/250 000

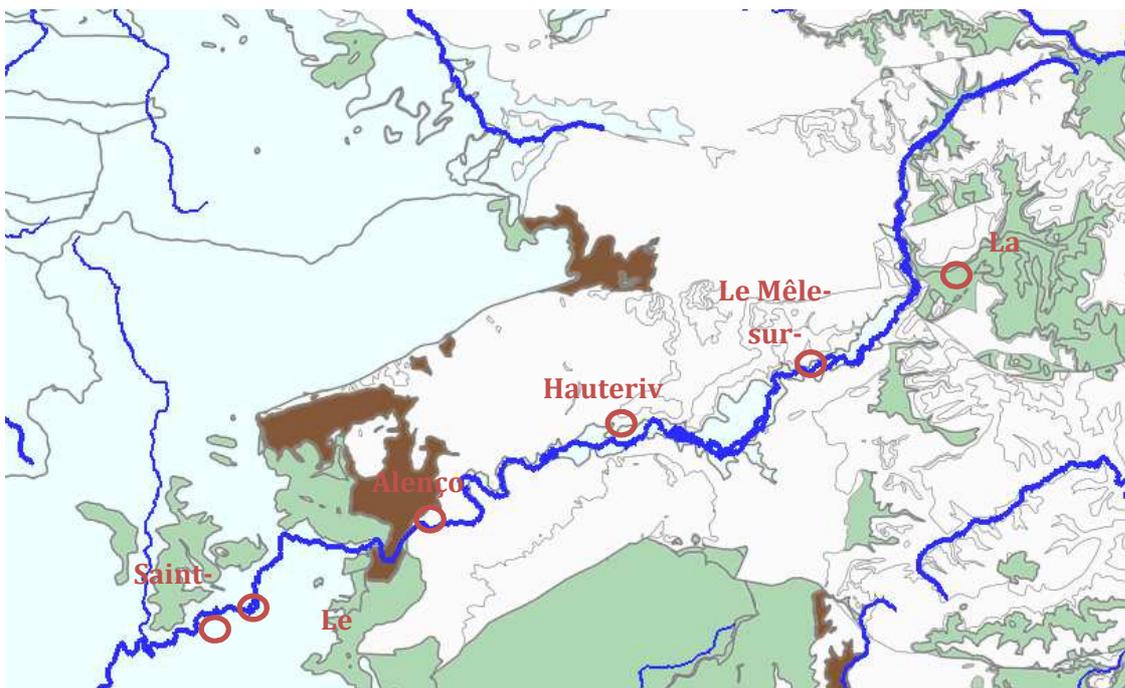


Figure 19 : Unités BDLISA par état. Marron : aquifères captives ; Vert : aquifères à parties libres et captives ; Bleu ciel : aquifères libres ; Blanc : unités non aquifères. Echelle : 1/250 000

Les unités aquifères sont nombreuses mais n'occupent que de petites surfaces dans le bassin versant :

- les sables du Perche du Cénomaniens supérieur du Bassin Parisien. Cette entité est présente aux extrémités Est et Ouest du bassin versant sous forme d'aquifère à parties libres et captives ;
- les marnes et craie marneuse, sableuse et glauconieuse du Cénomaniens du Bassin Parisien. Cette entité est localisée dans le Nord du bassin versant et est un aquifère libre. La géologie associée est la craie glauconieuse du Cénomaniens ;
- les calcaires de l'Oxfordien supérieur au Kimméridgien du Bassin Parisien comprennent trois unités aquifères locales situées dans la partie Est, principalement dans le bassin versant de l'Hoene et sont à parties libres et captives ;
- les Calcaires de l'Oxfordien supérieur et du Kimméridgien inférieur du Bassin Parisien ;
- les Calcaire corallien de l'Oxfordien moyen à supérieur du Bassin Parisien.
- Roussier de Gacé, sables ferrugineux du Perche et de Mortagne et sables de Vairais de l'Oxfordien inférieur à moyen du Bassin Parisien ;
- les calcaires du Bajocien et du Bathonien (Dogger), partie profonde du Bassin Parisien constituent un aquifère captif dans la partie Ouest du bassin versant et libre au sud ;
- les calcaires de l'Aalénien-Bajocien du Bassin Parisien avec comme entités locales les arkoses d'Alençon, sables et grès de Tessé de l'Aalénien et les calcaires de l'Aalénien-Bajocien dans le bassin Seine-Normandie. Ces unités se situent dans le Nord-Ouest, l'Ouest et le Sud du bassin versant de Saint-Cénéri et représentent des aquifères à parties libres et captives ;
- enfin, la dernière unité aquifère se situe dans le Socle du Massif Armoricaen. Elle correspond au socle plutonique et sédimentaire dans le bassin versant amont de la Sarthe.

Les unités semi-perméables correspondent à deux entités :

- Dans l'entité nationale du Paléocène se trouve les formations détritiques continentales, sables, argiles à silex post-Campanien. Cette formation est présente dans le Nord-Est du bassin versant.
- les grès médioliasiques du Domérien, grès et calcaire gréseux et marnes du Pliensbachien du Bassin Parisien sont présents dans le nord et le sud du bassin versant.

Les formations imperméables occupent le reste du bassin versant soit sur 70% de la superficie. Les marnes du Callovo-oxfordien soit prépondérantes.

- les marnes et craie marneuse, sableuse et glauconieuse du Cénomaniens ;
- les argiles de Gault, marnes et gaizes du Cénomaniens inférieur à moyen et de l'Albien supérieur du Bassin Parisien.

S'y ajoutent les colluvions et limons de plateaux dont l'épaisseur est variable de 1 à plusieurs mètres ce qui peut modifier le comportement aquifère des unités sous-jacentes.

2.4 L'occupation du sol et les activités économiques

Les données Corine Land COVer 2006 permettent une vision au 1/100 000 ème de l'occupation du sol (Figure 20). De manière générale la part des espaces artificialisés est réduite, on trouve une tache urbanisée autour de la ville d'Alençon. Les milieux forestiers et semi-naturels se situent au Nord-Ouest et au Sud du bassin.

L'essentiel du bassin versant est occupé par des terres agricoles (Figure 20 et Figure 21) à 83% en particulier par des prairies (43%).

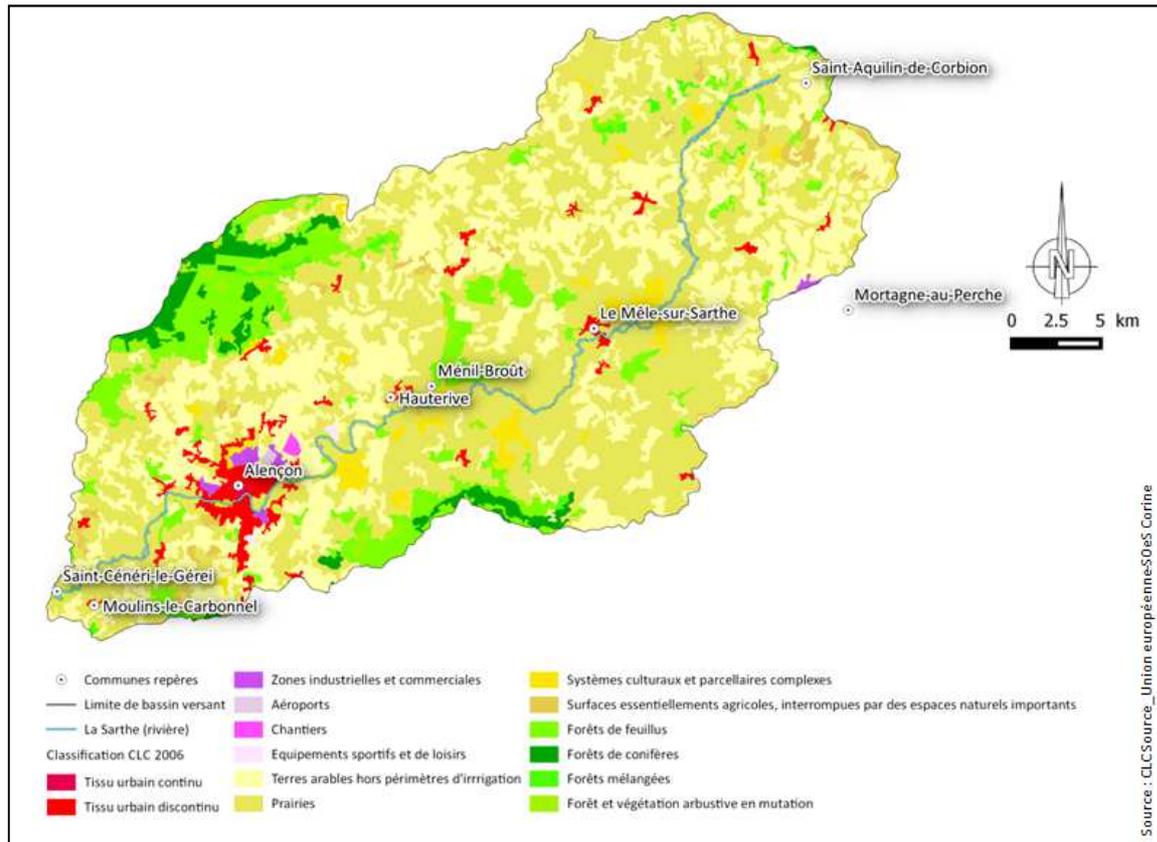


Figure 20 Répartition de l'occupation du sol dans le bassin versant (d'après CLC 2006)

D'après CLC, la Sarthe est en grande partie bordée par des prairies. En corrélation avec les données de terrain et la morphologie générale du bassin versant, ces prairies sont des zones d'expansion de crues et donc potentiellement des milieux humides.

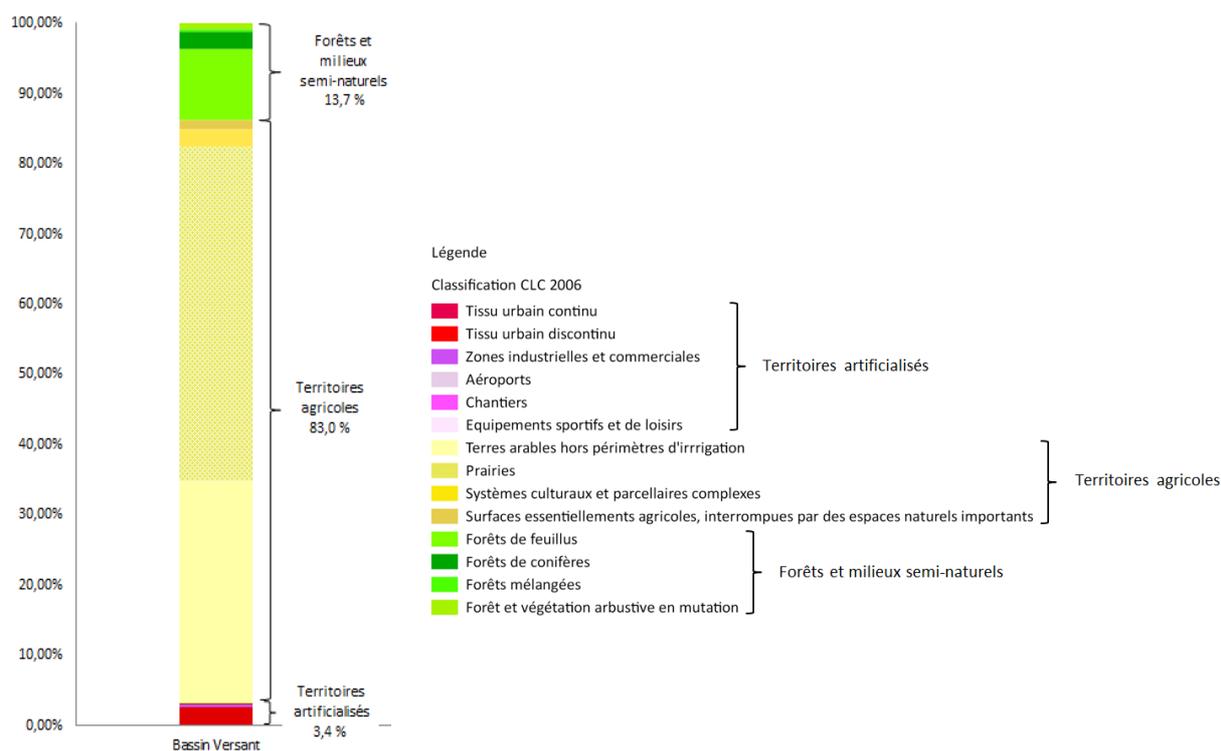


Figure 21 : Répartition de l'occupation des sols (Source : CLC 2006)

Entre 1988 et 2010, on constate que les espaces cultivés se sont développés au détriment des prairies (Figure 22) même si celles-ci continuent d'occuper la moitié de l'espace agricole (Figure 22 et Tableau 7). Les secteurs où la part de la STH est supérieure à 50 % se situent au nord du bassin versant au niveau de la Source de la Sarthe ainsi qu'au niveau de la forêt d'Ecouves. Une zone importante est également bien marquée entre Alençon et Coulonges-sur-Sarthe, dans laquelle se situe le moulin de Hauterive.

Tableau 7. Évolution des surfaces agricoles utiles (SAU) et des surfaces toujours en herbe (STH) entre 1988 et 2010. Source : Agreste

Année du recensement	Surface des communes (ha)	SAU (ha)	% SAU	Evolution de la SAU	STH (ha)	% de STH dans la SAU	Evolution de la STH
1988	131324	86280	65,7		49407	57,3	
2000		80429	61,2	-7%	37407	46,5	-24%
2010		76516	58,3	-5%	32931	43,0	-12%

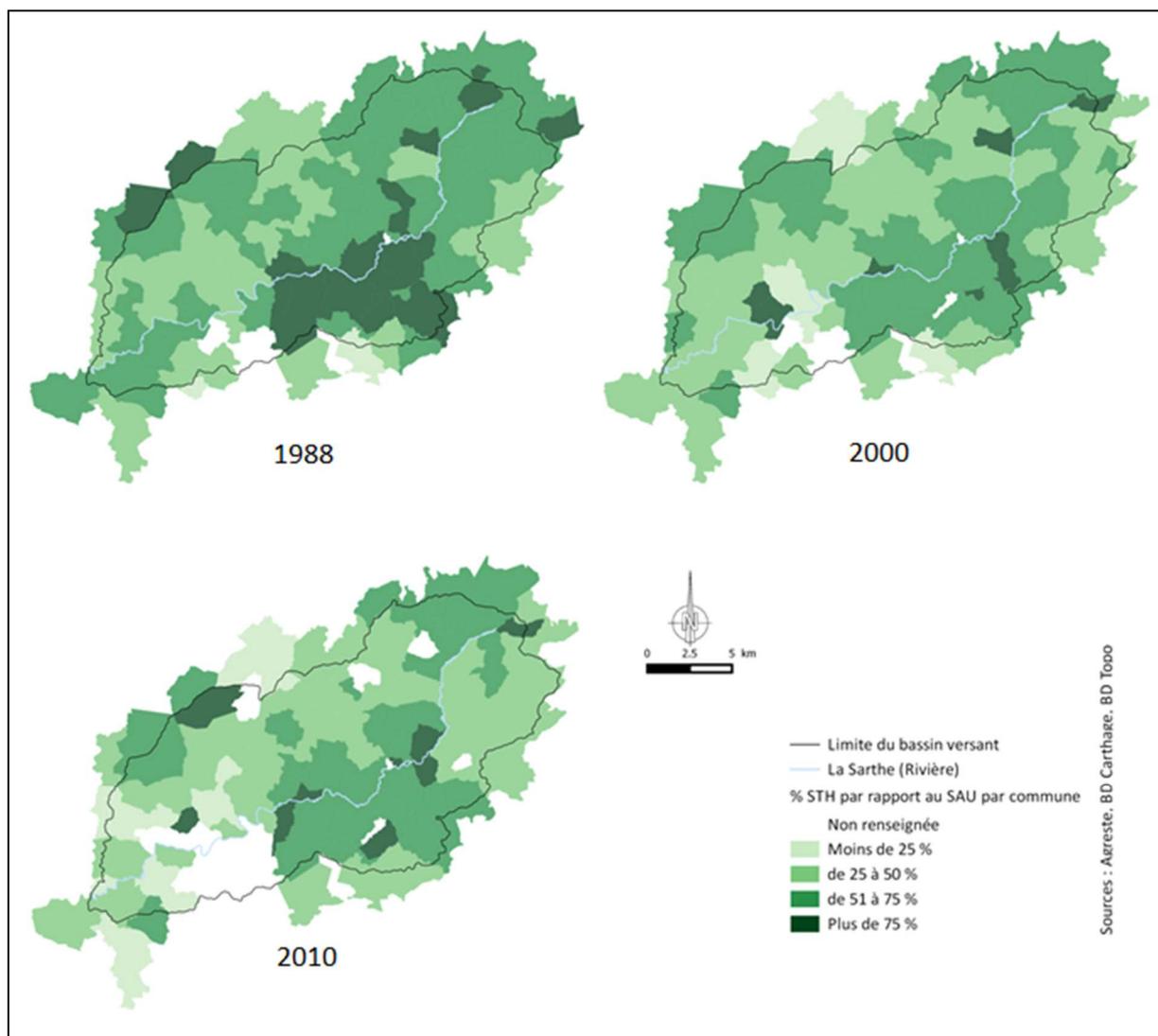


Figure 22. Évolution du pourcentage de surface toujours en herbe, des communes du bassin versant entre 1988 et 2010.

Dans ce bassin rural, les activités sportives et de nature en lien avec l'eau sont développées.

- La pêche : la Sarthe est partagée en quatre Associations Agréées de Pêche et de Protection des Milieux Aquatiques (AAPPMA) (Source : Fédérations de Pêche 72 et 61)
- La Gaule Amicale Höene et Sarthe
- La Gaule Méloise, avec la Sarthe classée en 2^{ème} catégorie de la confluence de la Sarthe avec l'Hoëne jusqu'au Parc Fortin.
- La Gaule Alençonnaise, avec la Sarthe classée en 2^{ème} catégorie du pont de Saint Paul (Ménil-Broût) au moulin de Gouhier (Mieuxcé).
- Les pêcheurs de Saint Cénéri, avec la Sarthe classée en 2^{ème} catégorie du Moulin du Gouhier jusqu'à l'embouchure du Sarthon à Saint-Cénéri.
- La chasse au gibier d'eau : elle est pratiquée quasiment tout le long du cours d'eau et de façon plus ou moins régulière en fonction des inondations et des coups de froid. La zone la plus fréquentée se situe entre Saint-Léger-sur-Sarthe et Mieuxcé. (Yves L'Honoré technicien de la FDC 61)
- Le canoë-Kayak : la Sarthe amont est concernée par des parcours de canoë-kayak :

- De Moulins-le-Carbonnel à Saint-Léonard-des-Bois
- Du Chevain à Saint-Léonard-des-Bois

Il y a également une base de canoë-kayak à Alençon et à Moulins-le-Carbonnel.

2.5 Les obstacles à l'écoulement

La directive européenne cadre sur l'eau impose la restauration de la continuité écologique des cours d'eau. Nos sites d'études font partie des aménagements prioritaires qui devront être supprimés. La Sarthe amont est préoccupée par l'approvisionnement en eau d'Alençon.

L'impact des barrages sur les milieux naturels a été présenté dans l'état de l'art.

La Sarthe est équipée de nombreux seuils et barrages qui servaient à la production énergétique pour les moulins ou petites centrales hydro-électriques.

Lors de la manipulation des ouvrages, le niveau de l'eau augmente ou diminue rapidement. (Source : Riverain du Moulin du Désert le 02/06/2014).



Figure 23. Obstacles à l'écoulement le long de la Sarthe.

D'après les données du registre des obstacles à l'écoulement (ROE) fourni par l'ONEMA, on peut dénombrer 47 obstacles (Tableau 8 et 23). Le long d'un linéaire de 82 km cela donne une moyenne de 1 obstacle tous les 2 km. Dans la suite de l'étude se sont les 24 barrages principaux qui seront pris en compte pour l'étude des zones humides.

Tableau 8. Hauteur des obstacles. Source : ROE (ONEMA)

Hauteur de chute (m)	Nombre d'obstacles
Non renseignée	8
Moins de 0,5 m	10
De 0,5 à 1,5 m	22
De 1,6 à 2,5 m	6
Plus de 2,5 m	1

La hauteur des chutes cumulées sur le linéaire donne 38,15 m. L'obstacle avec la hauteur de chute la plus haute se situe à Moulin-la-Marche au début du parcours de la Sarthe avec 3 m de chute. Les moulins servaient autrefois à moudre le grain. A partir du XIXème siècle, par suite de l'invention de la turbine (1827), certains moulins ont été utilisés pour produire de l'hydroélectricité. La mise en place des turbines s'est accompagnée d'un exhaussement des seuils. Actuellement, il reste quelques ouvrages hydroélectriques, cependant, les seuils des autres ouvrages maintenant inactifs sont toujours en place (Malavoi, 2003). Les barrages à vocation hydroélectrique se sont développés et sont maintenant perçus comme des entraves à la continuité écologique (Germaine et Barraud, 2013). Ces obstacles sont encore manipulés et modifient artificiellement la ligne d'eau du cours d'eau.

2.6 Qualité physico chimique de l'eau

Les données qui ont pu être rassemblées permettent de dresser un état de la qualité de l'eau dans l'ensemble du bassin versant, eau souterraine et eau de surface. La qualité de l'eau est évaluée à partir de qualitomètres. Pour faire cette étude, le diagramme Schoeller-Berkaloff a été choisi. Seuls les ions majeurs sont pris en considération (données disponibles à tous les points).

Pour les eaux souterraines les données proviennent de la base ADES d'où 7 points ont pu être extraits. S'y ajoutent les mesures faites en nos deux sites du Moulin de Hauterive et de Désert.

Pour les eaux de surface qui s'écoulent dans la Sarthe, les données proviennent de la base NAIADES qui répertorie les données des rivières et plans d'eau. Dans cette base de données, les prélèvements n'ont pas nécessairement eu lieu les mêmes années, ce qui a compliqué les traitements.

L'eau de référence est fabriquée par l'union des plus petites valeurs des eaux de 2010 et 2012 représentent le profil de référence pour comparer les diagrammes entre eux (Annexe I.3).

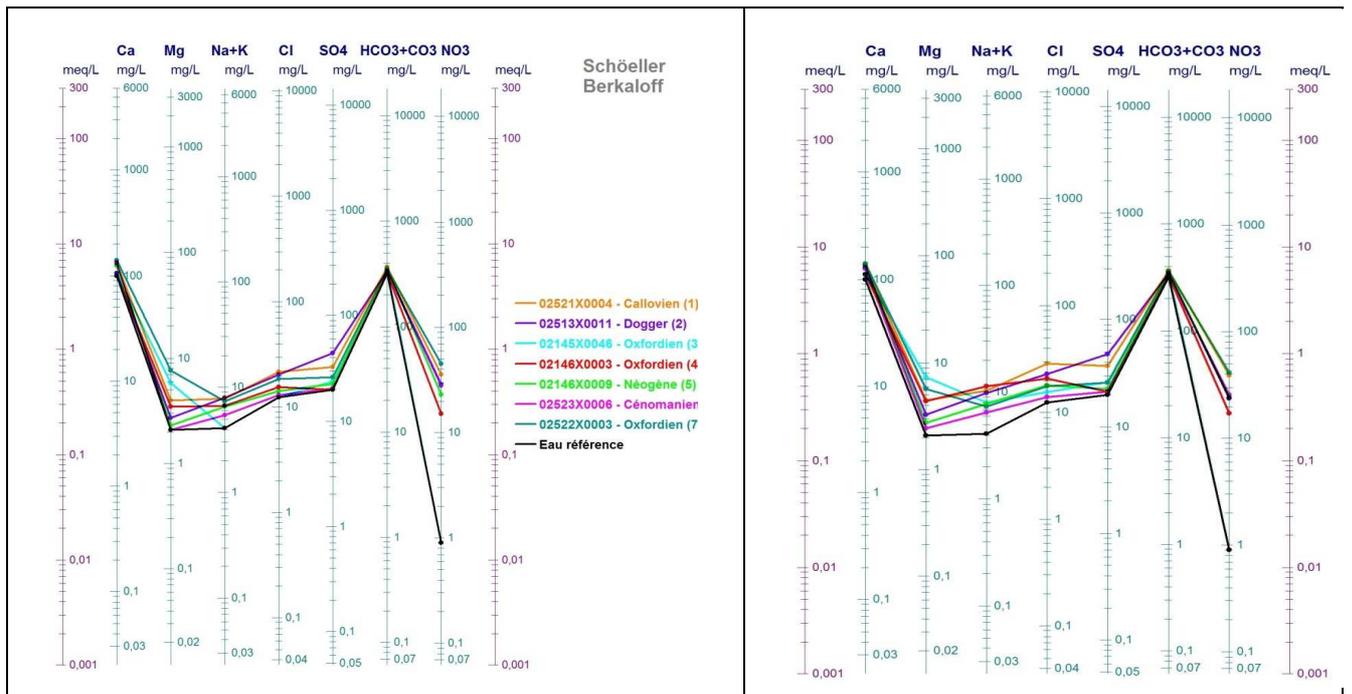


Figure 24 : Qualité des eaux souterraines du bassin versant entre 2010 (gauche) et 2012 (droite).

On remarque que les eaux du bassin versant sont fortement calco-carbonatées. La plus grande variabilité des valeurs apparaît pour les nitrates. Dans les deux périodes, l'eau bleu ciel (3) est la moins chargée en nitrates et l'eau vert foncé (7) est la plus chargée. La quantité de nitrates varie selon l'anthropisation : le qualitomètre 7 se situe en zone urbaine dans les environs de Sainte-Céronne-lès-Mortagne, tant en 2010 qu'en 2012 les eaux sont électriquement équilibrées (exceptées la violette (2) et la rouge (4) qui comportent plus d'anions que de cations). On remarque que le magnésium est l'ion majeur avec le plus gros coefficient de variation, ce qui se lit aussi sur les graphiques.

Tableau 9 : Coefficients de variation des ions majeurs pour 2010 et 2012. En rouge le plus fort et en vert le plus faible

	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3+CO3	NO3
2010	12,37	47,33	22,17	34,71	20,55	29,81	4,34	52,30
2012	8,84	37,20	18,47	33,11	23,62	32,00	4,36	51,38

2.6.1 Comparaison avec l'eau des deux sites de mesures : étude du Moulin du Désert et Hauterive

La qualité de l'eau souterraine dans les deux sites est comparée à celle de l'eau de référence représentative du bassin versant. Les différences sont notables même si dans les deux sites l'eau est très calco-carbonatées.

Au Désert (Figure 25), les eaux électriquement équilibrées, ont des profils de concentrations très hétérogènes supérieures à l'hétérogénéité sur l'ensemble du bassin versant.

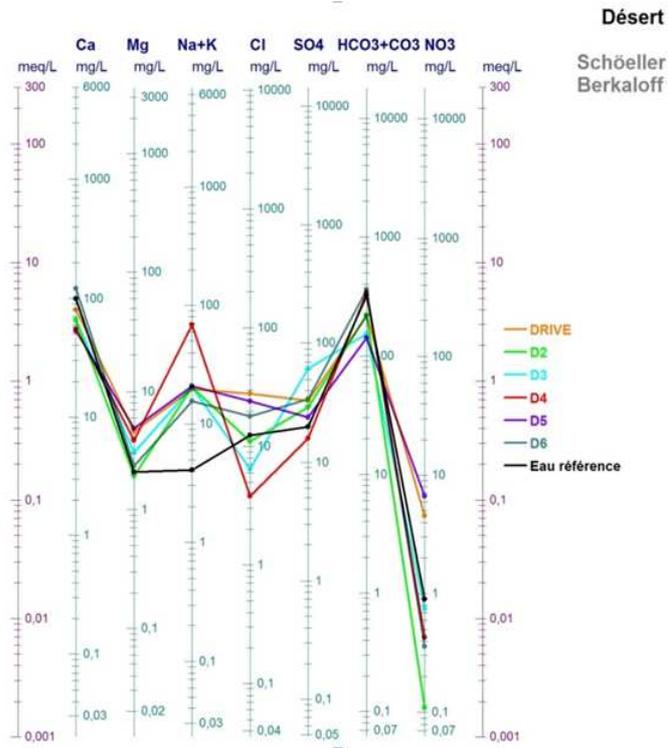


Figure 25 : Qualitogramme des eaux souterraines au site du moulin du Désert

A Hauterive (Figure 26) les concentrations sont plus homogènes avec une exception pour l'eau prélevée dans le piézomètre HP4 qui présente un pic de sodium, (apport de l'eau de la Vézone dont les caractéristiques ne sont pas connues ?). Les eaux sont électriquement équilibrées, sauf HP3 qui comporte un excès de cations qui peut être dû à un déficit de phosphate ou aux hydrogencarbonates qui peuvent dégager du CO₂ après les prélèvements d'eau.

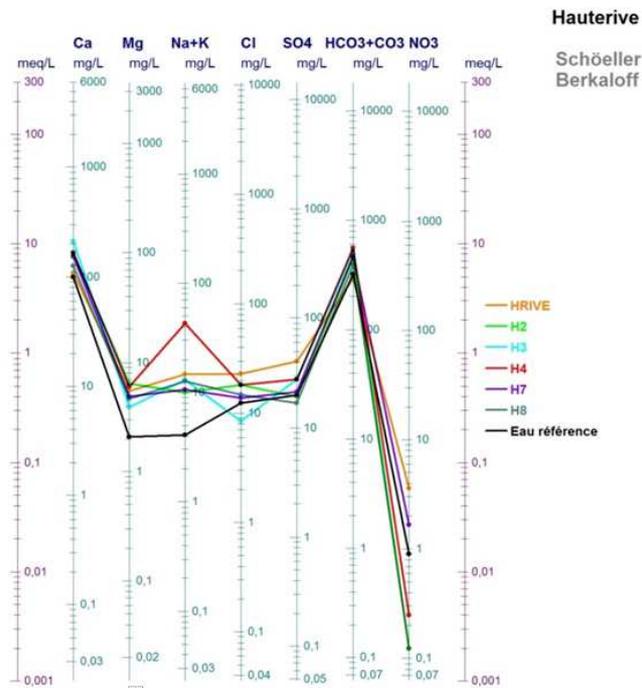


Figure 26 : Qualitogramme des eaux souterraines du site de Hauterive

Sur les deux sites, les concentrations en nitrates sont inférieures à 10 mg/L, ce qui est faible. Les coefficients de variations (Tableau 10) sont les plus élevés pour les ions alcalins.

Tableau 10 : Coefficients de variation des ions majeurs au Désert et Hauterive

	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3+CO3	NO3
Hauterive	21,23	16,37	79,89	52,94	27,86	31,07	19,21	131,90
Désert	30,85	31,81	74,95	95,55	58,48	42,55	35,53	117,81

2.6.2 Caractéristiques physico-chimiques des eaux de la Sarthe

Elles sont étudiées en trois endroits pour lesquels les analyses d'eau effectuées entre 2010 et 2012 fournissent des concentrations des ions majeurs.

- au Moulins-la-Marche (proche de la source) ;
- à Alençon ;
- à Moulins-le-Carbonnel (exutoire du bassin versant).

Comme ailleurs, l'eau est calco-carbonatée et électriquement équilibrée. Mais l'eau de la Sarthe est plus alcaline et chlorée que les eaux souterraines. Les concentrations sont de plus en plus hétérogènes de l'amont vers l'aval. On note que les nitrates varient peu de l'amont vers l'aval avec des concentrations allant 4 à 20 mg/L. Les coefficients de variation de ces eaux sont donnés dans le Tableau 11. Ont été ajoutées les analyses d'eau de la Sarthe prélevée à Chassé (tout près de Hauterive). Les différences avec les autres résultats sont peut-être dues à la période de prélèvement (2004-2006).

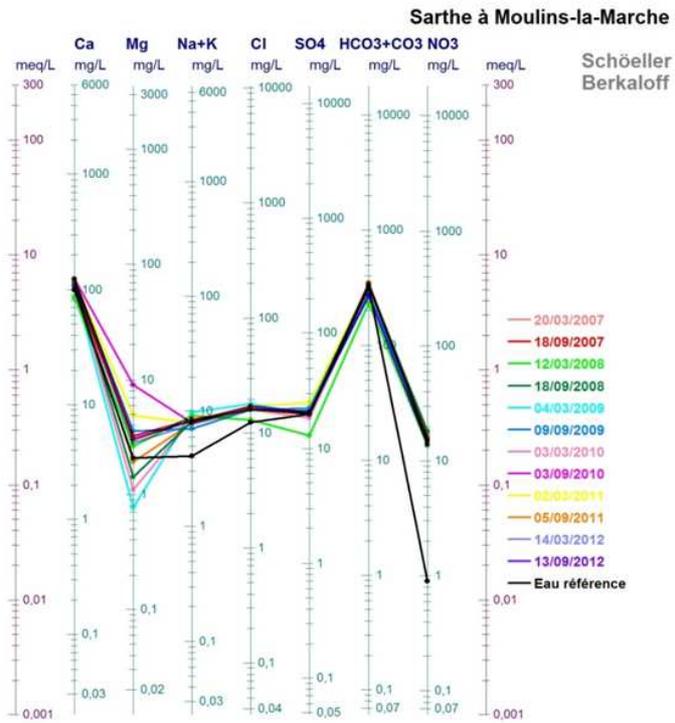


Figure 27 : Qualitogramme de l'eau de la Sarthe au moulin de la Marche

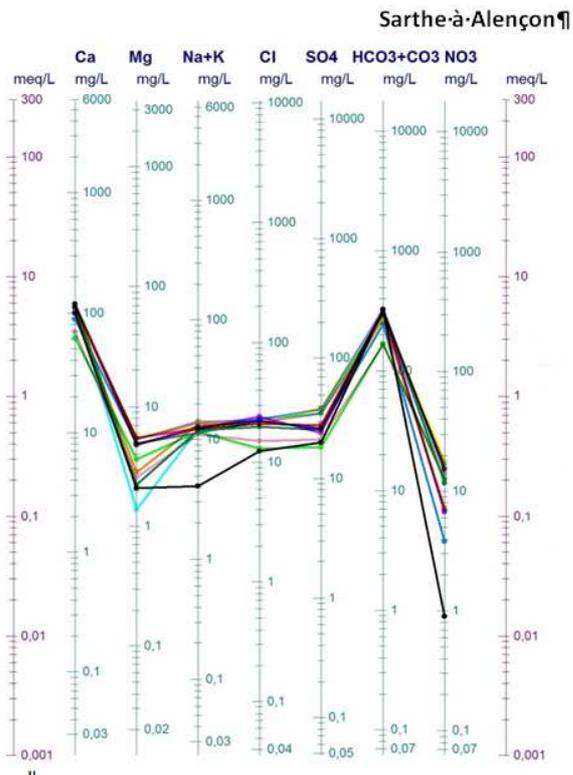


Figure 28 : Qualitogramme des eaux de la Sarthe à Alençon

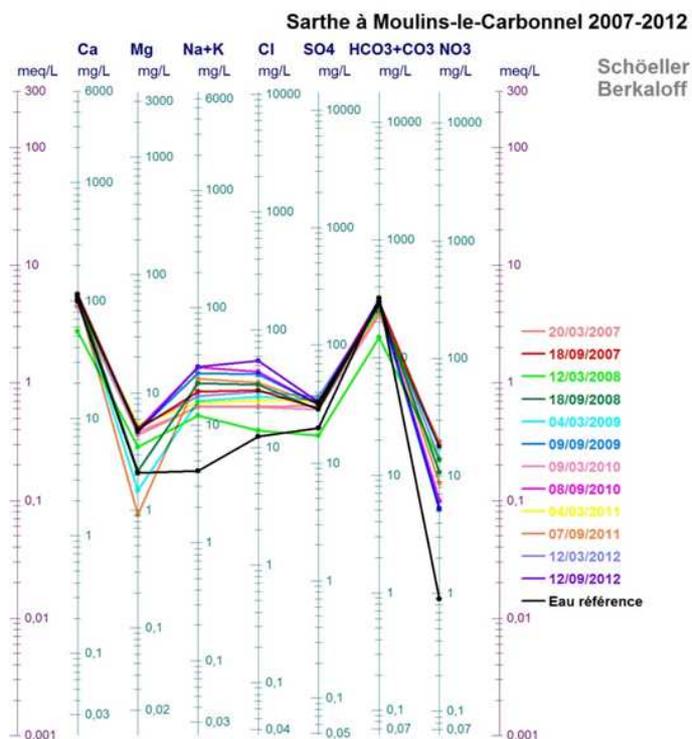


Figure 29 : Qualitogramme des eaux de la Sarthe à Moulins le Carbonnel

Tableau 11 : Coefficients de variations des eaux de la Sarthe de l'amont vers l'aval

	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3+CO3	NO3
Sarthe-à-Moulins-la-Marche	9,34	67,05	4,69	30,10	7,13	13,28	11,00	8,39
Sarthe-à-Chassé	6,47	11,57	8,72	10,62	7,65	30,22	5,26	24,62
Sarthe-à-Alençon	18,22	34,61	11,72	17,85	15,35	22,00	19,93	37,89
Sarthe-à-Moulins-le-Carbonnel	15,54	37,41	35,44	19,65	33,47	15,43	16,13	41,12

Ces résultats concernant la chimie de l'eau du bassin versant et de la Sarthe quoique épars fournissent un aperçu de la qualité de l'eau. Les écarts sont significatifs entre les eaux souterraines et les eaux de surface. Ils pourront être pris en considération dans l'étude des échanges d'eau entre la Sarthe et la nappe souterraine dans les deux sites de mesures de Hauterive et de Désert.

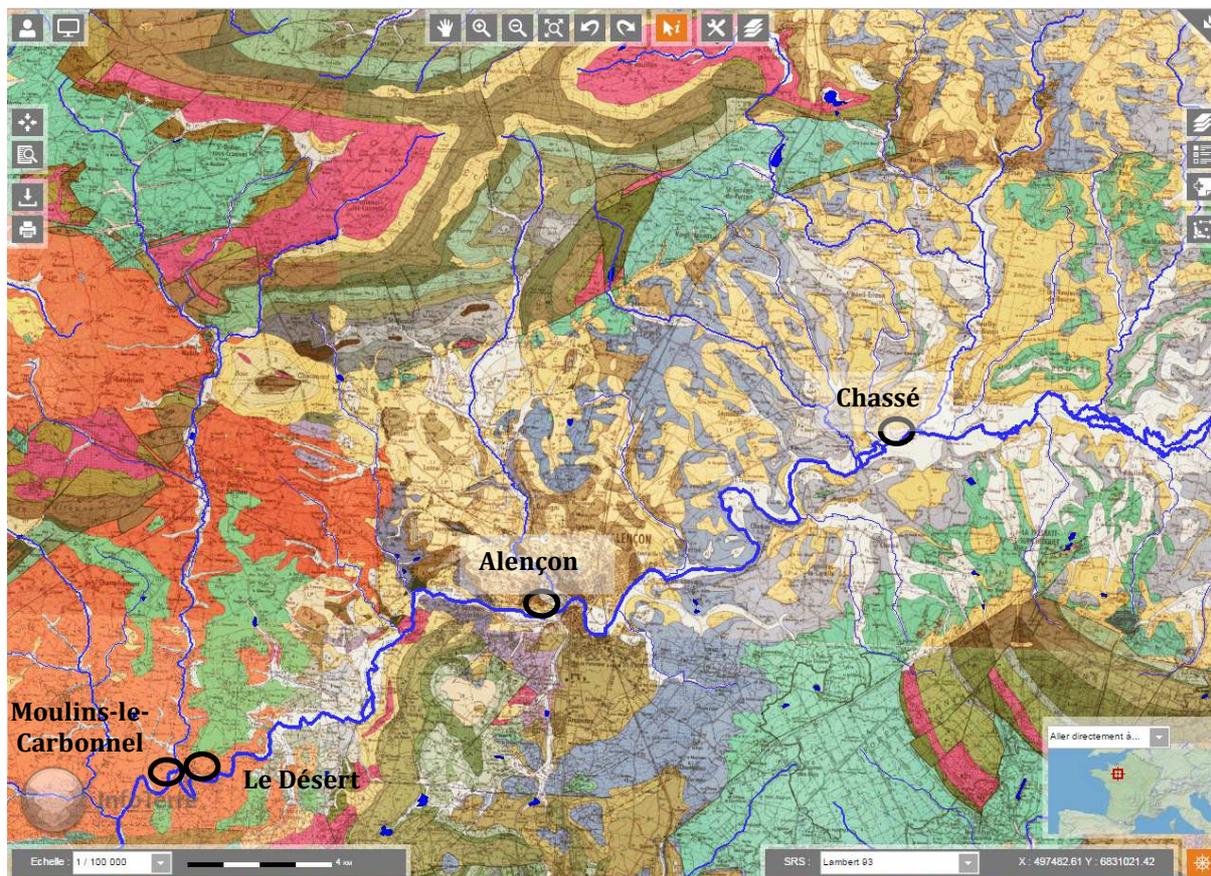


Figure 30 : localisation des différents prélèvements pour l'étude de la qualité des eaux (Outils de visualisation BRGM)

Conclusion :

Ces caractéristiques du bassin versant déterminent des conditions favorables à une circulation lente de l'eau : faiblesse des reliefs, caractère semi-perméable de la plupart des matériaux affleurant dans ce bassin, prédominance de l'activité agricole. Les pressions d'origine anthropiques n'interviennent que faiblement dans le fonctionnement du bassin versant. Cependant les impacts sont variés dans le détail selon les situations hydrologiques et les catégories de milieux concernés, plateau ou vallée.

3 L'eau dans le bassin versant de la Sarthe amont, étude hydrologique et bilan d'eau

Les caractéristiques générales régionales et locales permettent que l'eau soit, non pas très abondantes, mais suffisante pour satisfaire tous les besoins, du milieu naturel et des installations humaines.

Ce paragraphe comprend une analyse rapide du climat du bassin versant puis une détermination à partir du bilan hydrologique de l'abondance saisonnière de l'eau aux échelles annuelles et saisonnières.

Une étude plus détaillée des crues et des étiages montre quelles sont les caractéristiques des situations extrêmes qui peuvent déterminer un manque d'eau lorsque les débits des cours d'eau baissent en dessous de seuils de tolérance et des surplus provoquant le débordement de rivières et la submersion des lits majeurs.

3.1 Les traits majeurs du climat

Le bassin versant de la Sarthe amont est soumis à un climat tempéré océanique. Les facteurs du climat ont été évalués à partir des données de la station d'Alençon pour la période 1998/2015

- La température moyenne annuelle est de 11° avec une amplitude saisonnière faible de 14° (18,4° en juillet et 4,4° en janvier). Le graphique de la Figure 31 montre qu'elles ont fait un saut de 1° environ, à partir de la fin des années 1990 (observé partout dans le grand Ouest de la France).

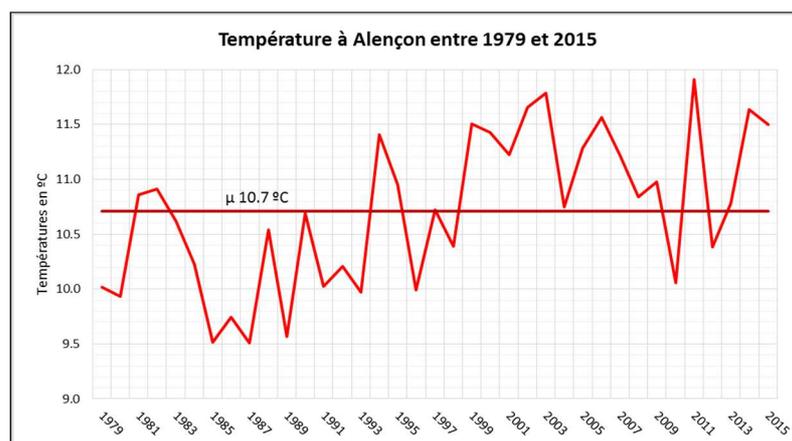


Figure 31 : Températures moyennes annuelles à la station d'Alençon (Météo France)

- Les précipitations moyennes annuelles sont de 752 mm. Les contrastes sont notables d'une année à l'autre (Figure 32). Les écarts peuvent aller du simple au double entre une année peu arrosée comme 2005 (530 mm) et une année fortement arrosée comme 2002 (1046 mm). Au cours de l'année, les écarts sont un peu moins accusés (Figure 33). Il pleut en moyenne 18 jours par mois, soit 209 jours par an.

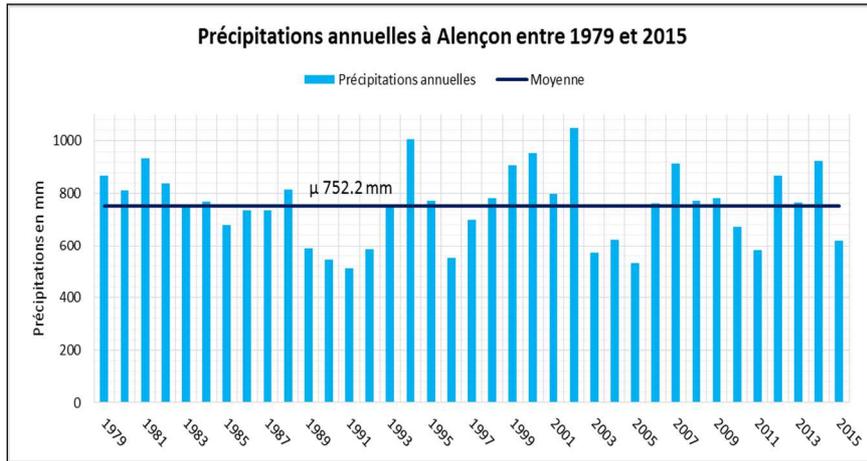


Figure 32 : Précipitations annuelles à la station d'Alençon, période 1979-2015 (Météo nationale)

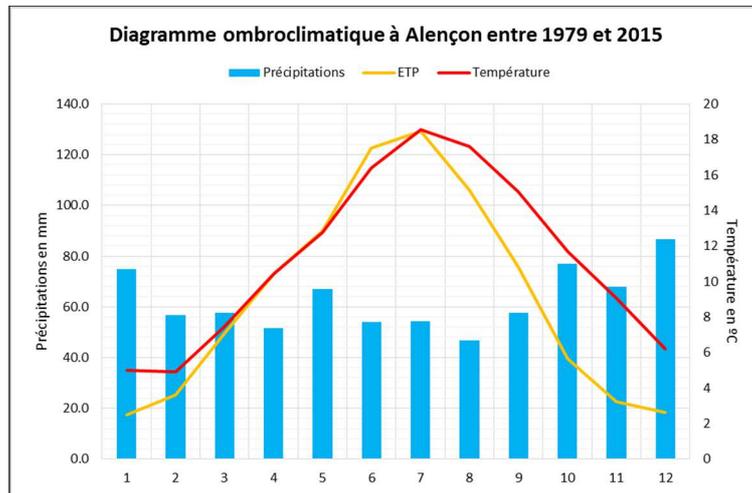


Figure 33 : Régime annuel des facteurs principaux du climat.

Le climat du bassin versant de la Sarthe amont est donc humide ; succession rapprochée des périodes pluvieuses, moindre durée des périodes sans précipitation. Ces conditions sont favorables au maintien de l'humidité dans les sols. Leur assèchement qui intervient en été ne crée qu'exceptionnellement un déficit hydrique prononcé.

3.2 Variation des débits moyens de la Sarthe à la station de Saint Genéri le Gerei (Banquehydro, période 1979/2015)

Le débit moyen de la Sarthe est de 7 m³/s pour la période 1979-2015. Les variations interannuelles reproduisent celles des précipitations (Figure 34).

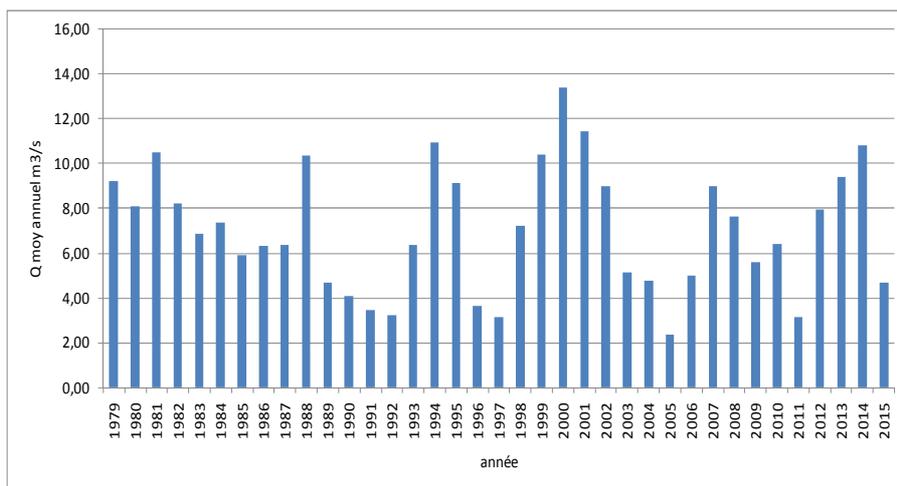


Figure 34 : Débits moyennes annuels de la Sarthe à la station de Saint Ceneri le Gerei

Le régime du cours d'eau est de type tempéré océanique avec des hautes eaux en hiver (pendant 5 mois) et des basses eaux en été (pendant 7 mois) (Figure 35).

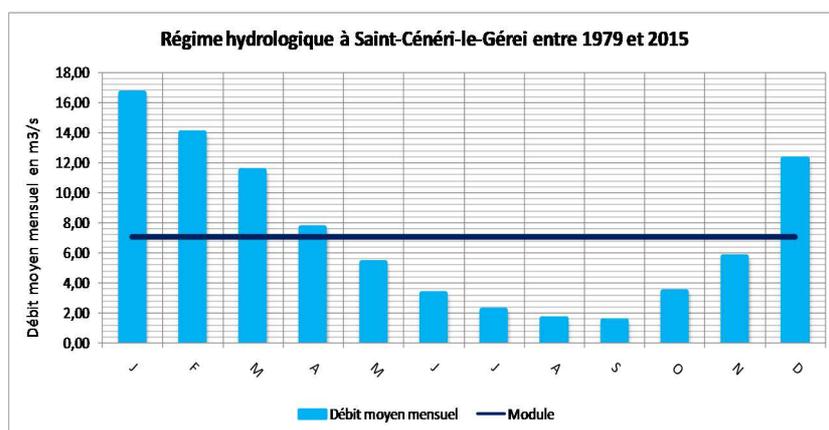


Figure 35 : Régime hydrologique de la Sarthe à Saint Cénéri le Gerei (1979-2015)

Les débits moyens mensuels sont contrastés.

- Au cours de la période de hautes ils dépassent 10 m³/s entre décembre et janvier. Les écarts sont accusés avec la saison estivale ce qui est une traduction du caractère globalement imperméable du bassin versant.
- En été, le QMNA (débit moyen mensuel le plus bas de l'année) est régulièrement inférieur à 1 m³/s On peut relever une situation de sécheresse critique en 2005 avec un débit qui a avoisiné les 0,45 m³/s au mois de septembre. On peut également souligner un creux enregistré au cours des étés des années 2009 à 2012, avec des débits inférieurs au débit de fréquence quinquennale qui rend compte d'une certaine sécheresse (Figure 36). Enfin, en 2013 les conditions d'étiage ne se sont pas vraiment réalisées (QMNA un peu supérieur au débit de fréquence ½).

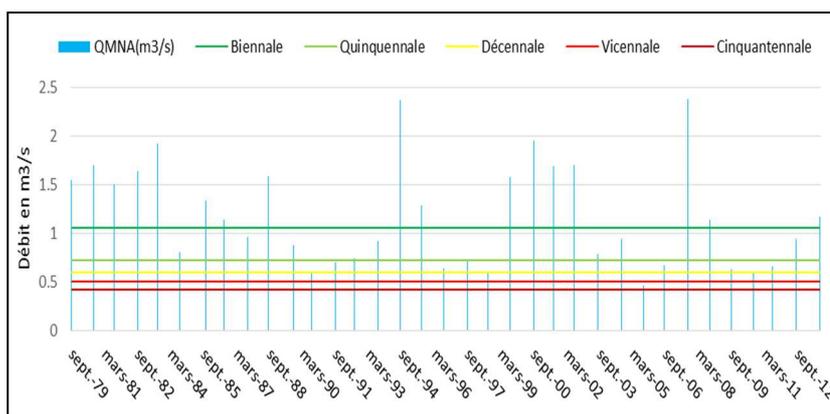


Figure 36 : Débits mensuels minimaux par an pour la période 1979 - 2013. (Source : Banque Hydro)

Plusieurs formules d'ETP ont été utilisées pour établir le bilan hydrologique du bassin versant. Les termes du bilan seront exprimés en mm et en pourcentage de lame d'eau précipitée moyenne annuelle sur la période 1998-2015 (Tableau 12) (Annexe I.4.)

Tableau 12 : Bilan hydrologique (période 1998/2015)

Précipitations (P)	Débit moyen (Q)	Evapotranspiration réelle mm (ETR)
770 mm	258 mm	P-Q = 512 mm (67% P) ETR Turc : 501 mm (65% P) ETR Coutagne : 533 mm (69% P) ETR Thornthwaite : 514 mm (67% p)

Sur les 18 années étudiées, le bilan du bassin versant est équilibré car la lame d'eau évapotranspirée selon les trois formules est très proche (moins de 3%) de la lame d'eau calculée par bilan hydrologique simple.

Plus en détail, l'algorithme de Thornthwaite a permis de calculer un déficit d'écoulement mensuel pour les 18 années prises en considération. Il atteint selon les années entre 100 et 150 mm par mois au maximum ce qui correspond en général aux valeurs caractéristiques des conditions hydroclimatologiques régionales (Cosandey, Robinson 2012).

3.3 Les débits journaliers (période 1979-2013)

3.3.1 Caractérisation des étiages

Le VCN 3 (moyenne des débits journaliers le plus bas de l'année sur 3 jours consécutifs) permet d'évaluer l'ampleur de l'étiage à partir de valeurs de référence. (Tableau 13).

Tableau 13 : Fréquences théoriques VCN 3 (1979-2015) (BanqueHydro)

Débits (m ³ /s) - Intervalle de confiance 95%		
Biennale	0.707	[0.604 ; 0.826]
Quinquennale	0.483	[0.394 ; 0.567]
Décennale	0.395	[0.309 ; 0.472]
Vicennale	0.336	[0.254 ; 0.410]
Cinquantennale	0.279	[0.201 ; 0.348]

Les situations d'étiage marqué se manifestent très irrégulièrement et les années récentes n'en ont pas enregistrées (Figure 37) En 2005, les débits journaliers ont été pendant une longue période très bas, avec 105 jours, soit environ 1/3 de l'année, où le débit a été inférieur à 0,707 m³/s. A l'inverse, les années récentes ont connu des étés "humides" comprenant des étiages peu creusés.

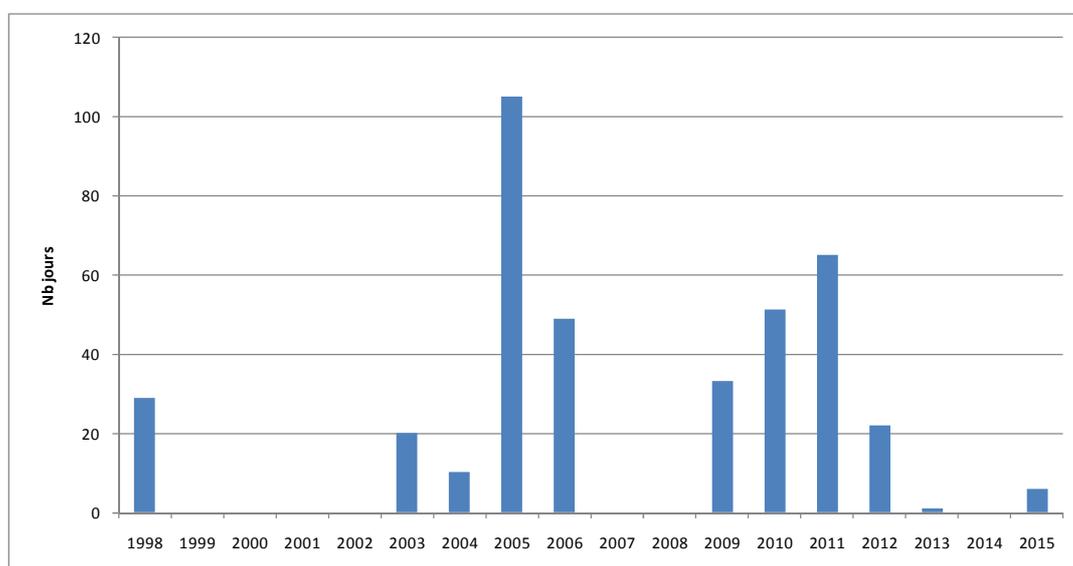


Figure 37 : Nombre de jours par an de débits journaliers inférieurs au VCN3 de fréquence biennale (0,707 m³/s) période 1998 - 2015. Source : Banque Hydro

Des seuils de vigilance, d'alerte et de crise sont déterminés par les préfetures de chaque département pour tous les cours d'eau sur lesquels plusieurs types de prélèvements sont effectués. En cas de sécheresse, lorsque le débit passe en dessous du seuil de crise, seuls les prélèvements sanitaires sont autorisés. Pour la Sarthe ce seuil est de 0,6 m³/s ce qui correspond à un débit moyen sur 3 jours (VCN3) compris entre le débit de fréquence biennale et quinquennale. Le débit de la Sarthe ne descend en dessous de cette valeur que lors des années sèches (2005 et 2011). Cette situation ne s'est pas reproduite depuis 2013. L'annexe I.4 donne le nombre de jours pour lesquels le débit de la Sarthe a été inférieur à 0.500 m³/s, et qui identifie un étiage sévère.

Tableau 14 : Nombre de jours par mois où le débit passe en dessous de 0,600 m³/s

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Juin								1	
Juillet							1	5	5
Août	21					8		26	12
Septembre	1							30	6
Octobre								11	
Juin					4				
Juillet					20				
Août					10	1			
Septembre			11	16	3	3			
Octobre			3	6	7				
Novembre					1				

3.3.2 Les tarissements

L'étude du tarissement d'une rivière qui permet de connaître la réserve régulatrice approximative d'un bassin versant en un point, a été menée en régime non influencé par la pluie, à partir de la station de Saint Ceneri (période 1979-2015) et de deux autres stations du Mêle-sur-Sarthe (référence M0010610), (période 1993/2000) et La Foulerie située sur L'Hoene juste avant sa confluence avec la Sarthe (référence M0014110) (période 1993-2000).

Deux données principales sont utilisées pour étudier le tarissement ; le nombre de jours consécutifs sans pluie et le débit de la rivière pendant ces jours.

La relation liant le tarissement et la réserve régulatrice sont : $V_0 = \frac{Q_0}{\alpha}$

Avec Q_0 le débit relevé trois jours après le début du tarissement et α le coefficient de tarissement. (Loi de Maillet).

Des périodes de minimum 20 jours consécutifs pendant lesquels la pluviométrie journalière était inférieure à 2 mm/j ont été sélectionnées (dites périodes « sans pluie » desquelles ont été retranchées les deux premiers jours, encore sous régime influencés) (Tableau 15).

Tableau 15 : Données sélectionnées pour l'étude des tarissements

Année	Période « sans pluie »	Nb jours	Pluie (mm)	Période de tar Saint-Cénéri	Nb jours	Période de tar La Foulerie	Nb jours	Période de tar Le Mêle	Nb jours
1996a	21/03 - 11/04	22	5,4	23/03 - 11/04	20	23/03 - 11/04	20	24/03 - 10/04	18
1996b	26/05 - 30/06	36	4,8			28/05 - 18/06	22	29/05 - 17/06	20
1997	1/03 - 25/04	56	7,2	9/03 - 24/04	47			10/03 - 20/04	42
1998	3/05 - 25/05	23	1			5/05 - 24/05	20		
1999	9/03 - 1/04	24	4,2	15/03 - 1/04	18				
2000	6/06 - 30/06	25	6,6	9/06 - 30/06	22	8/06 - 29/06	22	8/06 - 30/06	23

Les 19 périodes de tarissement sur les 22 années étudiées ainsi constituées ont permis de réaliser des courbes de tarissement pour en déduire le coefficient de tarissement, le débit initial et la réserve régulatrice associée (Annexe I.4.) pour chaque station hydrométrique (Tableau 16).

Tableau 16 : Valeurs moyennes et médianes du tarissement entre 1998 et 2015

	Saint Cénéri	Le Mêle	La Foulerie
Q ₀ (m ³ /s)	4.455	1.378	0.562
Coeff tarissement	0.036	0.024	0.012
Réserve (m ³)	11.5 millions	5.2 millions	3.7 millions
Surface du bassin (km ²)	908	284	75.7

On observe que la réserve régulatrice est d'environ 11,5 millions de m³ à Saint Cénéri le Gérei. On en déduit par soustraction qu'une réserve régulatrice d'environ 6,3 millions de m³ se trouve entre le Mêle sur Sarthe et Saint Cénéri. Les meilleurs résultats sur les courbes de tarissement ne se situent pas sur les mêmes mois en fonction de la station de mesure. Pour la station de Saint-Cénéri, la meilleure courbe de tarissement a lieu en 2007, où on observe 30 jours consécutifs avec une pluviométrie inférieure à 2mm/jour du 30 Mars au 28 Avril. La période de tarissement a lieu du 3 au 28 Avril et la courbe de tarissement (Figure 38) montre un coefficient de tarissement $\alpha = 0,035$ et un débit initial Q₀ = 4,99 m³/s. La réserve régulatrice associée à cette courbe est de 12,3 millions de m³.

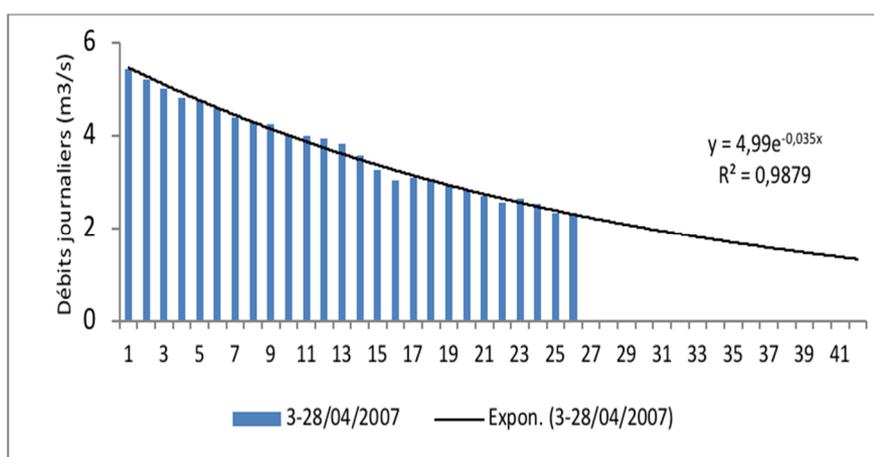


Figure 38 : Courbe de tarissement de la Sarthe à Saint-Cénéri-le-Gérei sur le mois d'Avril 2007

Pour la station de La Foulerie sur l'Hoëne, la meilleure courbe de tarissement se situe en Mars/Avril 2002, où on observe 30 jours consécutifs avec une pluviométrie inférieure à 2mm/jour du 19 Mars au 11 Avril. La période de tarissement a lieu du 25 Mars au 11 Avril (Figure 39). Le coefficient de tarissement est $\alpha = 0,017$ et un débit initial Q₀ = 0,82 m³/s. La réserve régulatrice associée est de 4,2 millions de m³.

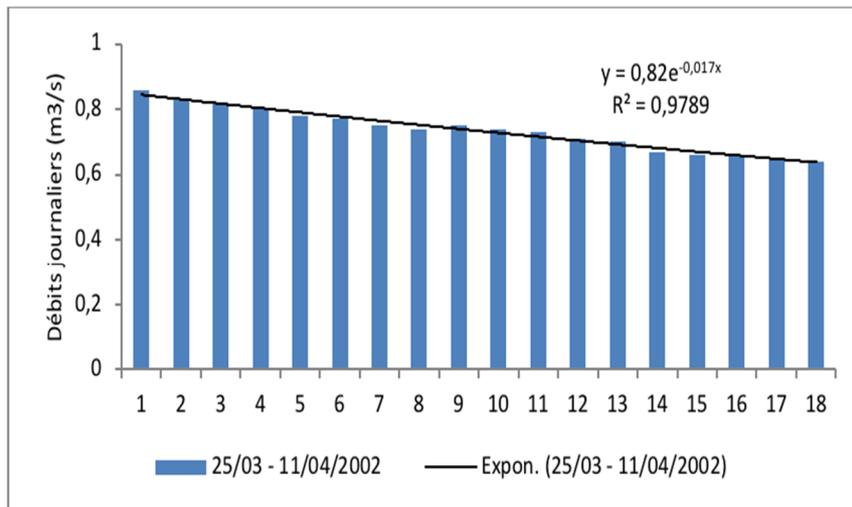


Figure 39 : Courbe de tarissement de l'Hoëne à La Foulerie sur les mois de Mars et Avril 2002

Pour la station du Mêle-sur-Sarthe, la meilleure courbe de tarissement se situe en Mars/Avril 1997, où on observe 56 jours consécutifs avec une pluviométrie inférieure à 2mm/jour du 1er Mars au 25 Avril. La période de tarissement a lieu du 10 Mars au 20 Avril (Figure 40). Le coefficient de tarissement est $\alpha = 0,02$ et le débit initial de tarissement est $Q_0 = 1,23 \text{ m}^3/\text{s}$ et la réserve régulatrice associée est de 5,3 millions de m^3 .

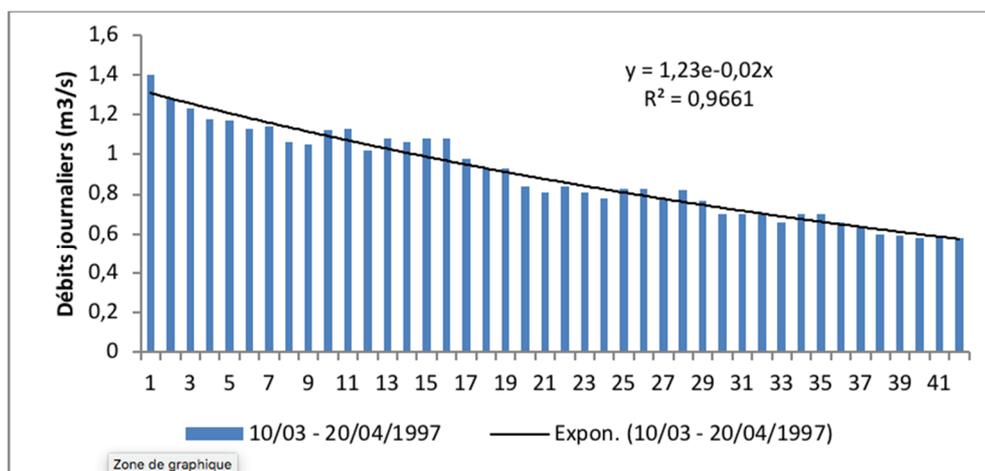


Figure 40 : Courbe de tarissement au Mêle-sur-Sarthe sur les mois de Mars et Avril 1997

Cette étude sur les étiages montre ainsi que des situations très variées peuvent survenir au cours d'années "sèches". La réserve est alors faible en accord avec le substratum peu perméable du bassin versant. Mais l'eau est généralement suffisante pour humecter les matériaux de surface.

3.3.3 Périodes de hautes eaux et les crues

Les périodes de crues s'observent durant la saison de hautes eaux principalement entre le mois de décembre et le mois de mars. Le débit maximum sur la période 1998-2015 a été atteint le 28 décembre 1999 avec un débit à 122 m³/s. En 2005 le débit était à son maximum de l'année le 24 janvier, avec 22,3 m³/s.

Tableau 17 : QJ fréquents calculés pour 1979-2015, d'après la loi de Gumbel (Source : Banque Hydro)

Fréquence	Q m ³ /s
Biennale	52 [47,00 ; 57,00]
Quinquennale	71 [65,00 ; 81,00]
Décennale	84 [76,00 ; 98,00]
Vicennale	96 [86,00 ; 110,0]
Cinquantennale	110 [100,0 ; 140,0]
Centennale	Non calculé

Sont considérés comme appartenant à des phénomènes de crue, les débits moyens journaliers supérieurs à la crue de fréquence biennale définie le plus souvent comme le débit à pleins bords, au-delà duquel le lit mineur déborde. (.

Tableau 17 et Figure 41).

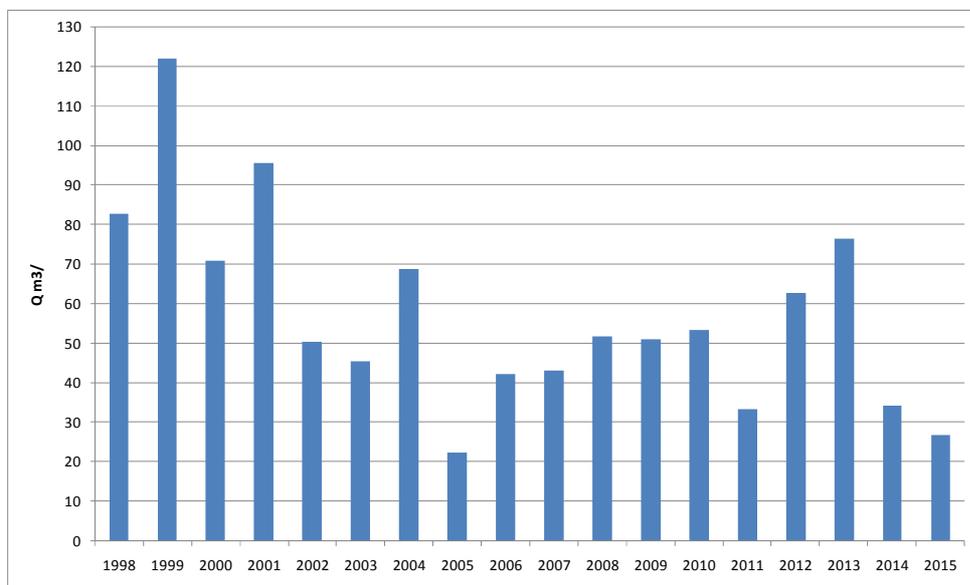


Figure 41 : Débit moyen journalier maximum de l'année (1998-2015)

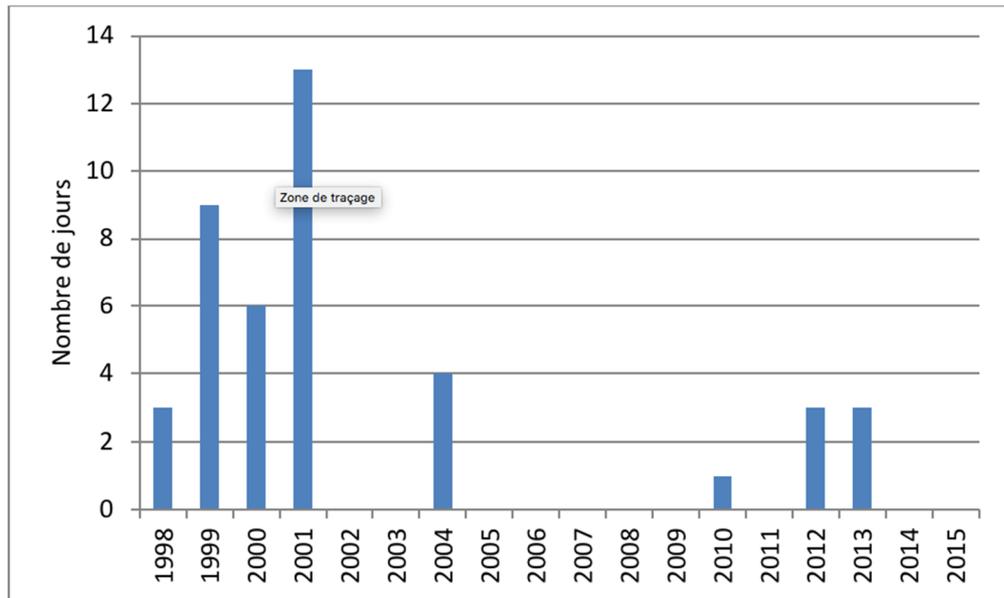


Figure 42 : Durée des périodes à débit supérieur à 52 m³/s (débit de crue de fréquence biennale). 1998-2015 (Banque Hydro)

Les périodes où le débit est supérieur au débit de fréquence biennale sont variables en durée suivant les années ; en 2001, le phénomène a duré 13 jours dont 6 jours consécutifs avec des débits élevés.

La Figure 45 montre l'étendue des champs d'inondation en crue (extrait de Atlas des zones inondables de la Sarthe réalisé en 2007 et représentant les zones potentiellement inondables). Y ont été ajoutés les champs d'inondation observés sur le terrain au début de l'année 2014 autour des sites de Hauterive et du Désert. Les photos prises sur le terrain le 17 février 2014 (Figure 43 et Figure 44) montrent les plans d'eau occupant le lit majeur mais aussi l'irrégularité de leurs contours.



Figure 43 Pâturage inondé. Gué-Saint-Vaast 17.02.2014- C. LHUILLIER



Figure 44 Pâturage inondé. Pont de Saint-Paul 17.02.2014- C.LHUILLIER

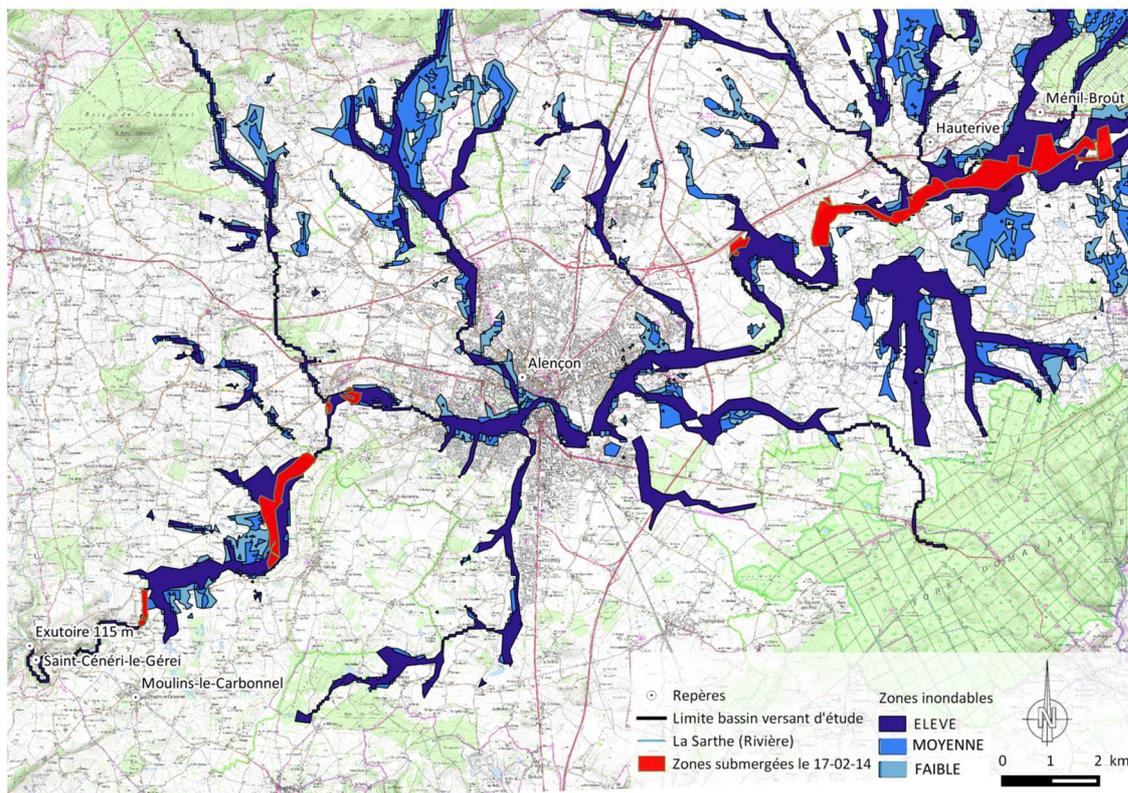


Figure 45. Zones inondables entre Saint-Cénéri-le-Gérei et Ménil-Broût. Sources : SCAN25, BD Carthage, BD Topo, Zones inondables

3.4 Usages de l'eau, prélèvements et rejets

Le prélèvement d'eau total annuel moyen s'élève à 6,9 millions de m³. Il est destiné essentiellement à l'AEP. La quantité totale d'eau rejetée dans le milieu est de l'ordre de 4,7 millions de m³. La quantité d'eau qui n'est pas restituée au bassin versant est de 1,6 millions de m³. Elle peut être considérée comme négligeable et ne représente pas une menace pour la ressource en eau du bassin

Les prélèvements pour l'alimentation en eau potable (AEP) sont relativement stables. Les volumes prélevés proviennent des nappes souterraines à hauteur de 30% environ, des cours d'eau à hauteur de 60% et des sources pour 10%.

Dans le cadre de la présente étude, ne seront considérés que les prélèvements dans les sources et les cours d'eau. Pour les prélèvements en nappe profonde seront comptabilisés :

- les pompages dans le Dogger à moins de 150 m de profondeur ;
- les pompages dans l'Oxfordien à moins de 500 m de profondeur.

Cette répartition est stable sur la période d'étude. Sur le sous-bassin versant étudié, entre 1998 et 2011, les prélèvements en eau potable annuels sont de l'ordre de 5,3 millions de m³. Les prélèvements pour l'agriculture pour le sous-bassin de Saint-Cénéri-le-Gérei sont les plus faibles du bassin versant de la Sarthe amont. En effet, on observe seulement un seul endroit où des prélèvements agricoles sont effectués. Cette faible quantité s'explique par le fait que de nombreux élevages utilisent le réseau d'assainissement en eau potable. Le montant des prélèvements agricoles s'élève à environ 30 000 m³d'eau, ce qu'on peut considérer comme une part négligeable

des prélèvements. Les prélèvements d'eau au milieu naturel pour les besoins d'élevage sont d'en moyenne 900 000 m³ par an.

L'activité industrielle n'est pas très développée sur le bassin versant. La plupart des entreprises utilisent le réseau d'assainissement d'eau potable pour leurs différents besoins et seules 4 industries ont été identifiées comme prélevant de l'eau dans le milieu naturel. De plus, on ne décompte qu'une seule industrie dans le sous-bassin de Saint-Cénéri. Les prélèvements ont considérablement diminué dans la période 1998-2011. Ces dernières années, ils s'élèvent à 250 000 m³ sur l'ensemble du bassin versant, en supposant que toutes les industries prélèvent à peu près la même quantité d'eau, on obtient un volume de 62 500 m³ d'eau. Cette part des prélèvements peut être considérée comme négligeable.

A proximité du moulin du Désert, l'eau de la Sarthe est prélevée par la société d'exploitation des sources Roxane arrêté ICPE du 16/07/2012 avec les prescriptions du prélèvement 130 000 m³ maximum par an et les rejets autorisés par l'arrêté du 16/07/10. L'industrie Roxane prélève plus de 50 000 m³ d'eau potable.

En additionnant les différents prélèvements précédents, le prélèvement total annuel moyen s'élève à 6,3 millions de m³. L'annexe I.2. donne un état des prélèvements pour l'année 2010.

Une grande part de l'eau retour au milieu naturel en empruntant des chemins variés :

- Les pertes sur le réseau d'assainissement d'eau potable sont de l'ordre de 1,3 millions de m³ sur l'ensemble du bassin de la Sarthe amont. Le sous-bassin étudié représente 31% soit 403 000 m³ de pertes en AEP.
- Les rejets des stations d'épuration ne sont pas toujours connus, cela dépend de la présence d'un débitmètre à la sortie de la station. Les données sont donc extra- et interpolées pour avoir une estimation moyenne des rejets. Ceux-ci sont en augmentation ces dernières années. A l'amont de Saint-Cénéri-le-Gérei, les rejets sont de l'ordre de 4,1 millions de m³ par an (provenant surtout de la station d'épuration d'Alençon).
- L'eau rejetée par les assainissements non collectifs (ANC) représente un volume en diminution depuis une quinzaine d'années avec l'implantation de nouvelles stations d'épuration ou le raccordement de certaines communes à un réseau préexistant. Dans notre bassin versant d'étude, les rejets des ANC s'élèvent à 208 000 m³ par an.
- Pour les rejets industriels, les données ne sont disponibles que sur les années 2010 à 2012. Sur le bassin versant à l'amont de Saint-Cénéri, aucun rejet industriel n'est décompté.

La quantité totale d'eau rejetée dans le milieu est de l'ordre de 4,7 millions de m³. Ainsi, la quantité d'eau non restituée au bassin versant est de 1,6 millions de m³ ce qui est faible.

Conclusion :

A l'image du Nord-ouest de la France, le bassin de la Sarthe amont dispose de bonnes ressources en eau, en lien moins avec des stocks d'eau souterraine, qu'avec des apports d'origine climatique. Le climat océanique garantit généralement une ressource suffisante. Cependant, ces caractéristiques génèrent une « fragilité hydrique et hydrologique » et une vulnérabilité notable. Cela a été montré par l'étude des étiages. Le régime des cours d'eau aux contrastes saisonniers modérés est strictement tributaire des apports climatiques. Probablement que les seuils et barrages mis en place sur les cours d'eau ont eu également pour fonction de retenir une partie de

l'eau et de contribuer ainsi au maintien d'un niveau limnimétriques satisfaisant pour permettre que les usages soient garantis.

4 La vallée de la Sarthe

La Sarthe a dégagé une vallée profonde d'une cinquantaine de mètres de direction Est-Nord Est, Sud-Sud Ouest inscrite dans les plateaux qui constituent les reliefs essentiels du bassin versant de la Sarthe. Épousant la forme en cuvette de ce bassin, étroite à l'amont et à l'aval, elle est très évasée dans la partie centrale sur près des 2/3 de sa longueur.

Le fond de cette vallée qui contient les zones humides est caractérisé par des milieux naturels variés par ailleurs modifiés pour en permettre l'exploitation surtout par l'agriculture.

L'objectif de ce paragraphe est ainsi de déterminer les facteurs de la localisation des zones humides dans le fond de vallée et de discuter de la représentativité par rapport au reste de la vallée de la Sarthe amont, des deux sites de mesure.

La démarche comprend deux étapes :

1. une détermination des caractéristiques du fond de la vallée : prise en compte des conditions morphométriques, géomorphologiques et géologiques d'une part, de l'occupation du sol et des modifications intervenues pour exploiter le fond d'autre part ;
2. une étude de la végétation afin de déterminer par un modèle, les secteurs propices au développement des zones humides. Les données utilisées proviennent des documents existants, prélocalisation des zones humides par le SAGE Sarthe amont (2008) et Atlas Natura 2000 (2007), et du traitement d'images satellites ;
3. une recherche de liaisons entre les caractéristiques du fond de vallée et la répartition des formations végétales des zones humides.

4.1 Caractéristiques du fond de vallée

Ces caractéristiques servent à mettre en évidence les types de milieux qui composent le fond de la vallée et contribuent à l'explication de la localisation des zones humides.

Des travaux antérieurs se sont intéressés aux vallées et proposent des méthodes pour y identifier des zones homogènes dans le cadre d'études portant sur les paysages en particulier. La plupart prennent en considération les versants et le fond (Germaine 2009 et 2010 ; Alhasker 2012 ; Gatién 2011). Dans notre approche, seul le fond de vallée est pris en compte.

4.1.1 Les unités géomorphologiques

Le fond de vallée est composé de trois unités principales identifiées à partir du terrain, des cartes topographiques et des photographies aériennes (Figure 46).

Le lit majeur est large 50 à 300 m. Il comprend dans le détail de nombreuses irrégularités naturelles (anciens lits abandonnés) ou construites (digues, remblais de chemins d'exploitation, bourrelets de berges...). Il est dominé par la très basse terrasse alluviale quasi présente partout (+3 à +5m au maximum). Dans la partie médiane de la vallée, une unité intermédiaire façonnée en replat (reste d'anciennes terrasses de la Sarthe), en glacis (unité colluviale ou mixte) et disséquée par les vallons, occupe d'importantes surfaces entre la basse terrasse et la base des versants de la vallée.

Dans le lit majeur, la Sarthe a un tracé sinueux en courtes boucles. Elle comprend un ou plusieurs bras (fréquents surtout en amont et en aval de Le Mêle sur Sarthe). Dans certains secteurs, ce tracé

est rectiligne en lien avec des interventions anthropiques. S'ajoutent à ces lits, ceux des affluents qui empruntent le lit majeur en amont de leur confluence avec la Sarthe, ainsi que les canaux de dérivation des moulins qui exploitent parfois les lits naturels réaménagés.

Enfin, ont été ajoutés à ce réseau les chenaux du drainage des terres agricoles dont le tracé est perpendiculaire aux drains principaux.

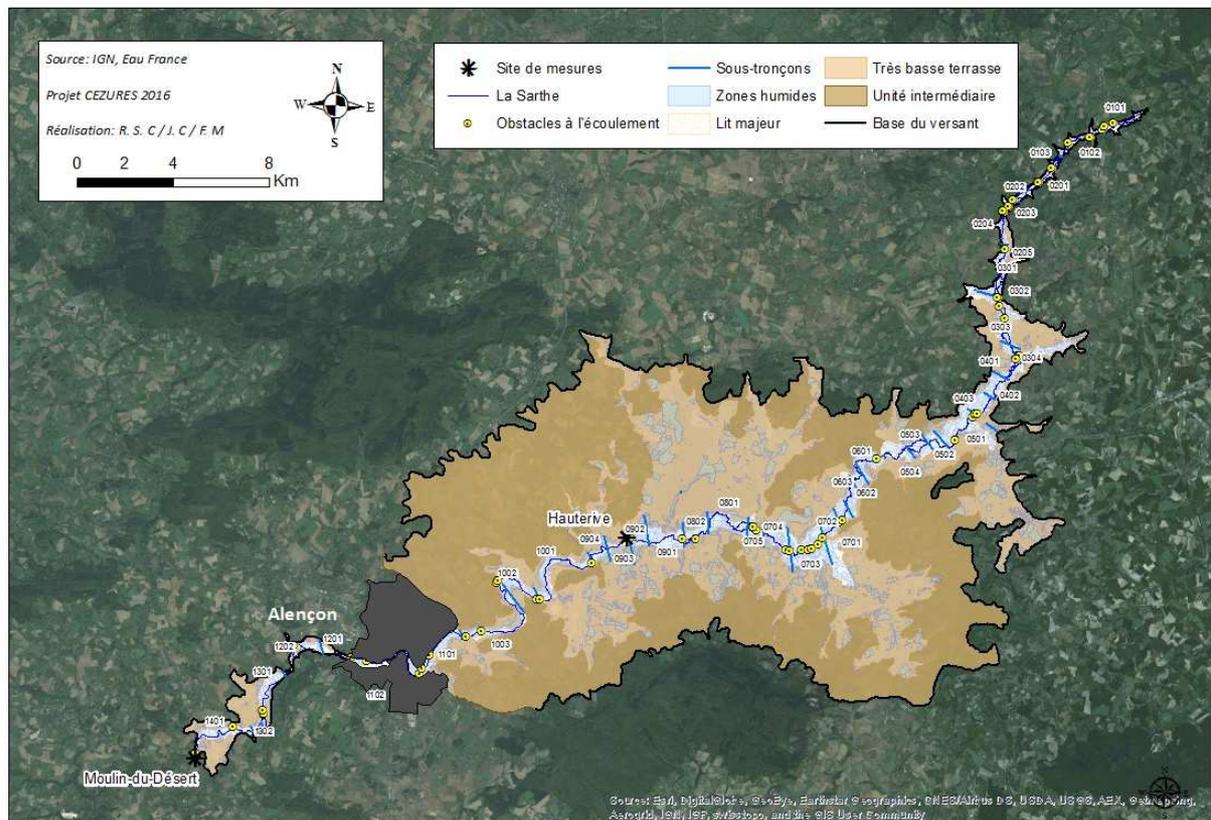


Figure 46 : Carte géomorphologique et de repérage

Ces unités doivent leurs caractéristiques à celles du substratum encaissant, aux modalités de l'érosion fluviale à l'origine du dégagement de la vallée et aux interventions anthropiques.

Comme toutes les rivières des régions de plaines et de plateaux (Piana 2011, Desprié 2003), la Sarthe s'est incisée au cours du Quaternaire à partir d'une surface d'érosion polygénique. Cet enfoncement est marqué par plusieurs anciennes terrasses plus ou moins bien conservées. L'unité intermédiaire de la carte géomorphologique (Figure 46) porte des restes des niveaux Fw et Fx échelonnés entre +30 et +15m, tapissée de cailloutis emballés dans une matrice argilo-limono-sableuse.

La bibliographie repère 3 niveaux principaux (Moguedet 1998) :

- à +15/20m (alluvions anciennes résiduelles formées de cailloutis grossiers de 10 à 15 cm de diamètre)
- à +8 +10m, graviers et galets jusqu'à 10cm de diamètre, éléments du socle, gaize et silex (Quaternaire moyen ?)
- les niveaux les plus bas sont mal différenciés (Fy cailloutis grossiers épais de 2 à 3m) et Fz

Le lit majeur actuel est rempli d'alluvions récentes (notés Fz sur les cartes géologiques), épaisses de 1 à 3-4m. Ce sont des sables argileux entrelardés de niveaux graveleux.

Ces matériaux masquent le substratum géologique encaissant dont les caractéristiques (résistance à l'érosion) agissent sur la forme de la vallée dans cette partie amont du bassin de la Sarthe (Figure 47).

- Jusqu'à Alençon, le fond est inscrit dans les couches sédimentaires du Crétacé et du Jurassique. Elles sont parcourues par des failles qui les fragmentent et multiplient les secteurs où elles affleurent. Plus en détail, à l'extrême amont et jusqu'à Sainte Scolasse, l'affleurement de craie, sable et calcaires gréseux détermine un fond étroit dominé par des versants marqués. Vers l'aval et jusqu'à Le Mêle sur Sarthe, la vallée s'élargit dans la traversée des sables et grès sableux du Crétacé inférieur. Au-delà et jusqu'à la confluence de la Lailbert (aval Moulin de Hauterive), le large fond de vallée est établi dans les matériaux à dominante argileuse du Callovien. Enfin, jusqu'à l'aval d'Alençon, ce sont les marno-calcaires puis les calcaires du Callovien inférieur, du Bathonien puis du Bajocien qui expliquent le rétrécissement du fond de vallée et la présence de versants marqués. Ces conditions ont été favorables à la divagation de la Sarthe dans ce large fond alluvial et à un transport fluvial peu efficace (matériaux de texture fine) ;
- En aval d'Alençon la Sarthe s'engage à travers le massif ancien. Le contact est fracturé et les roches de la base du Secondaire ne forment qu'un recouvrement discontinu au-dessus des structures anciennes, constituées de granite, de granodiorites et de rhyolithes. La vallée se resserre et l'agencement des anciennes alluvions montrent une forte tendance au dépôt de sédiments que la Sarthe abandonne avant de s'engager à travers les Alpes Mancelles. Ces matériaux qui reposent sur un soubassement imperméable sont globalement un peu plus grossiers qu'à l'amont (plus grande fréquence de niveaux graveleux)

Ces caractéristiques agissent sur les circuits de l'eau alimentés par les nappes souterraines du substratum encaissant (qui contiennent peu d'eau comme cela a été montré), la nappe alluviale ainsi que par la Sarthe (Cf. bilan hydrologique annexe I.4). Les échanges effectifs entre surface et nappe sont mal connus compte tenu de la rareté des piézomètres (cf. paragraphe 3). On peut cependant dire qu'ils participent à l'imprégnation des alluvions et constituent des conditions favorables à l'existence de zones humides, d'autant que la pente générale du fond de vallée est faible.

Ces zones humides sont bien développées dans le lit majeur et dans certains cas sur la basse terrasse. La plupart sont influencées par les aménagements qui ont modifié les circuits naturels de l'eau.

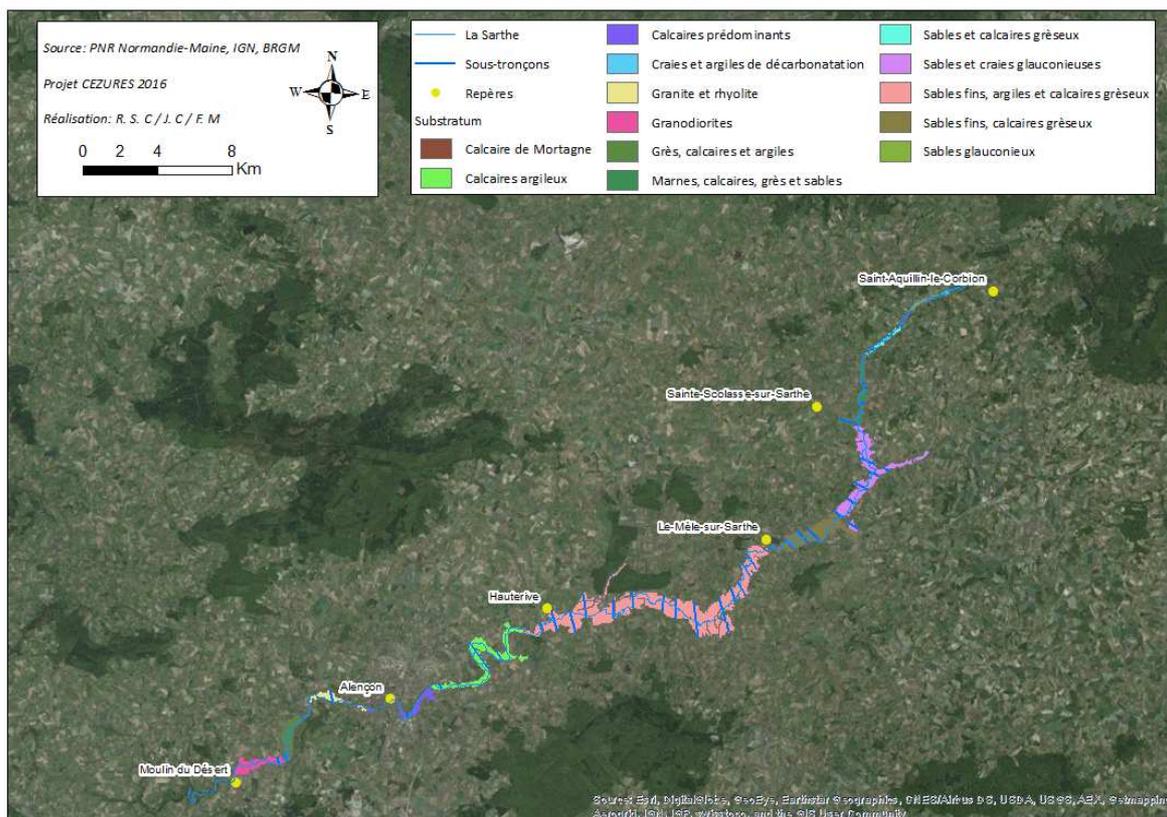


Figure 47 : Le substratum du fond de la vallée de la Sarthe

4.1.2 L'occupation du sol et la végétation dans le fond de vallée

Le fond de vallée a été modifié par divers aménagements, obstacles à l'écoulement, changement de la végétation, du fait de l'exploitation agricole. Celle-ci est par ailleurs à l'origine des constructions diverses mais dont l'emprise est malgré tout faible.

- *Les obstacles à l'écoulement (une vingtaine)*

L'impact des ouvrages hydrauliques sur l'eau en lit mineur et en lit majeur est présenté dans l'état général des connaissances.

Ces ouvrages agissent directement sur l'écoulement de l'eau dans la Sarthe et indirectement sur les nappes souterraines. Ils sont repérés sur la Figure 46 ainsi que sur le profil longitudinal de la Sarthe (Figure 49). La plupart ont des hauteurs de chute ne dépassant pas 1.20 m (Figure 48). Les barrages alimentent des canaux de dérivation longs de plusieurs centaines de mètres dont certains exploitent d'anciens bras de la Sarthe.



Figure 48 : Barrage du Désert 17 février 2014 (photo JC)

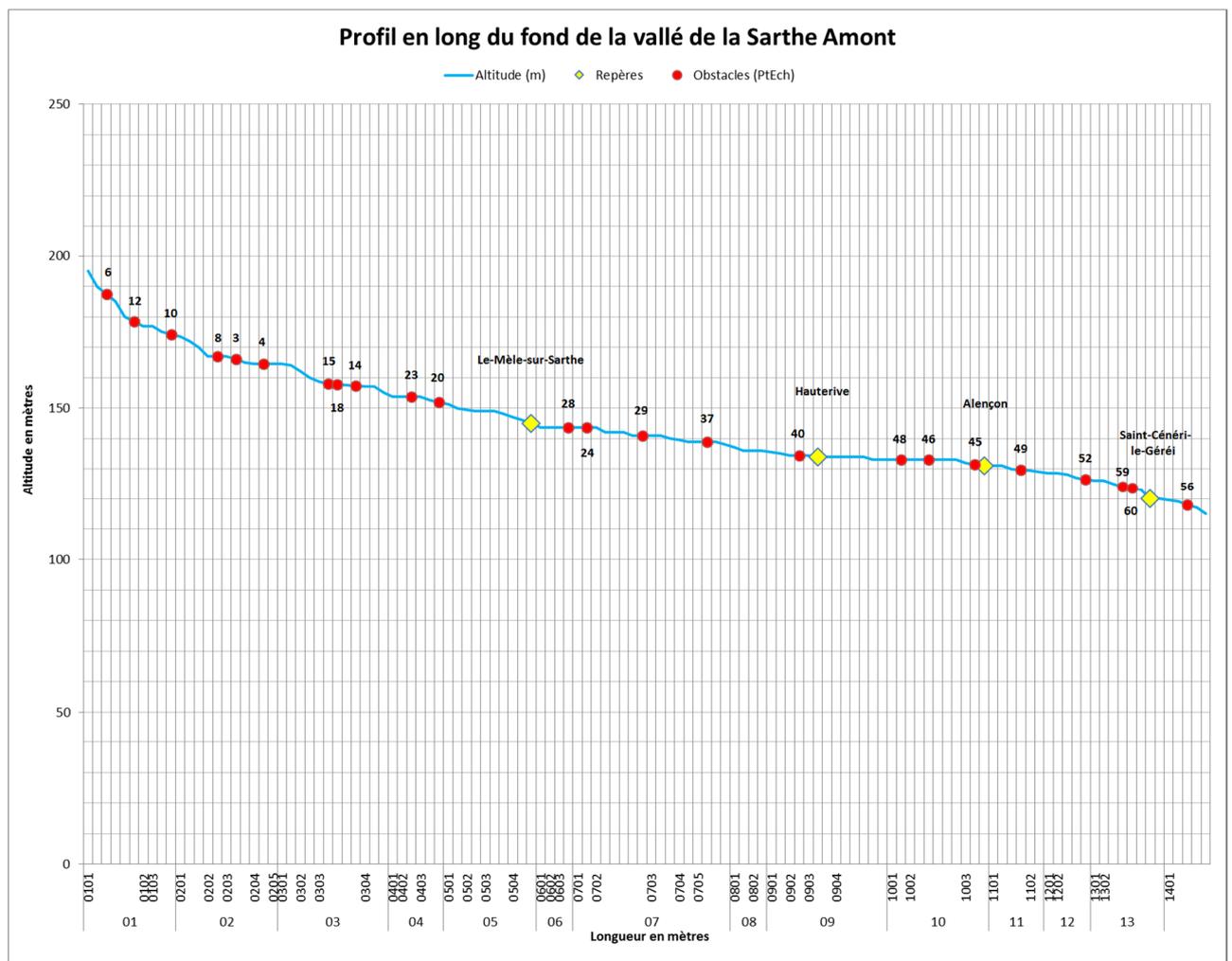


Figure 49 : Profil en long de la Sarthe, localisation des obstacles à l'écoulement et des limites des tronçons homogènes (01, 02...)

- *L'occupation du sol par l'agriculture*

A l'image de l'ensemble du bassin versant, le fond de la vallée de la Sarthe amont est surtout rural et occupé à 80% par des secteurs toujours en herbe (Figure 50).

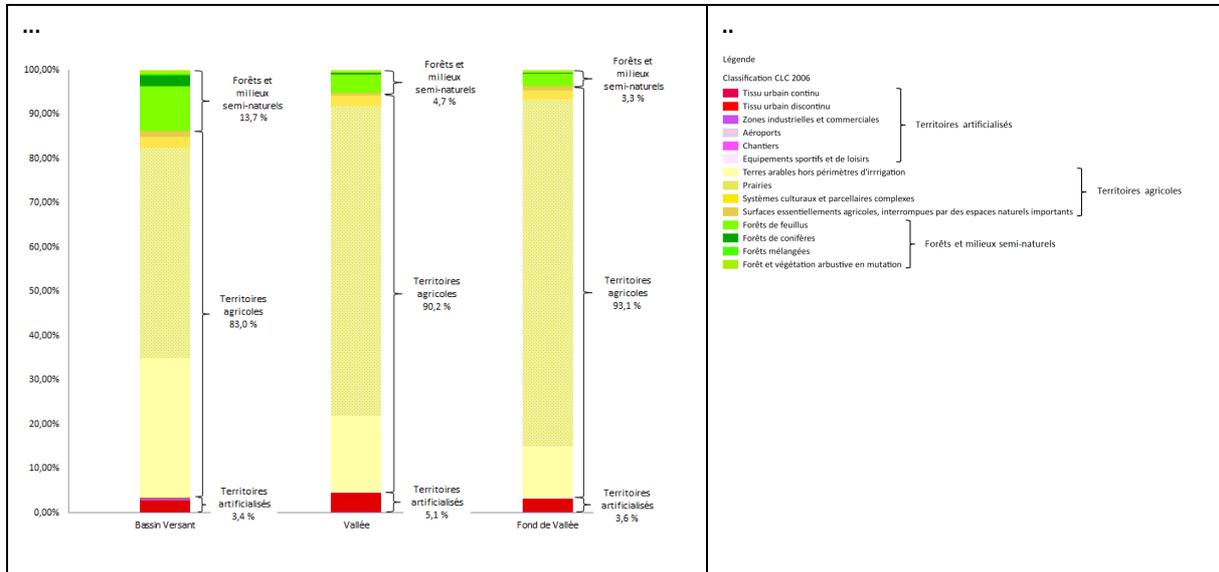


Figure 50 : Principales familles d'occupation du sol (CLC 2006)

L'exploitation agricole est effectuée sur des parcelles de tailles variées. A l'amont du Mêle sur Sarthe, elles sont de petites dimensions et fréquemment entourées des haies du bocage. Vers l'aval, les grandes parcelles dominent et occupent le fond évasé de la vallée.

Les caractéristiques du parcellaire agissent directement ou indirectement sur l'écoulement de l'eau :

- cloisonnement du lit majeur par les haies du bocage parfois implantées sur de petits bourrelets (Figure 51 submersion discontinue) ;
- drainage agricole permettant l'exploitation des grandes parcelles,
- rectification du tracé de la Sarthe, curage du chenal et régalage des berges



Figure 51 : Morcellement du lit majeur par les microtopographies (inondation de février 2014) (clichés C. Lhuillier)

Cartographie des habitats naturels - Légende :

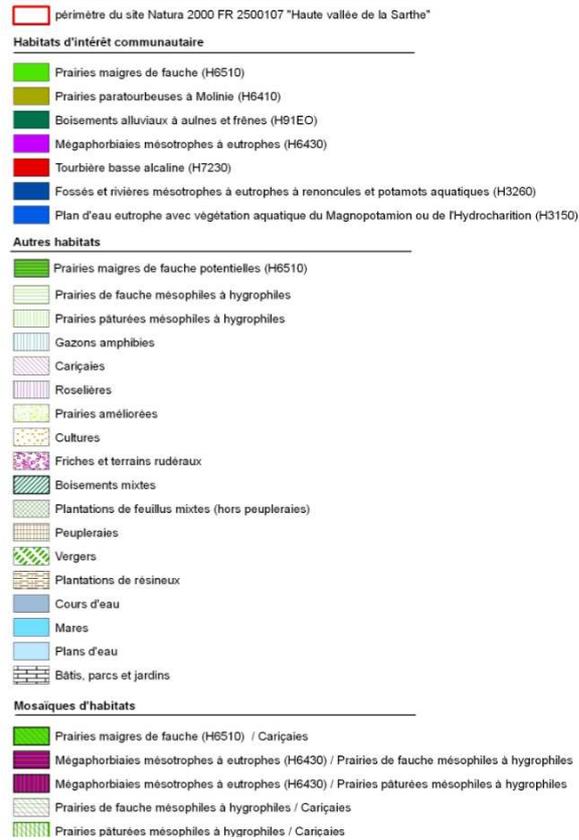


Figure 53 : Légende des cartes de l'Atlas Natura 2000

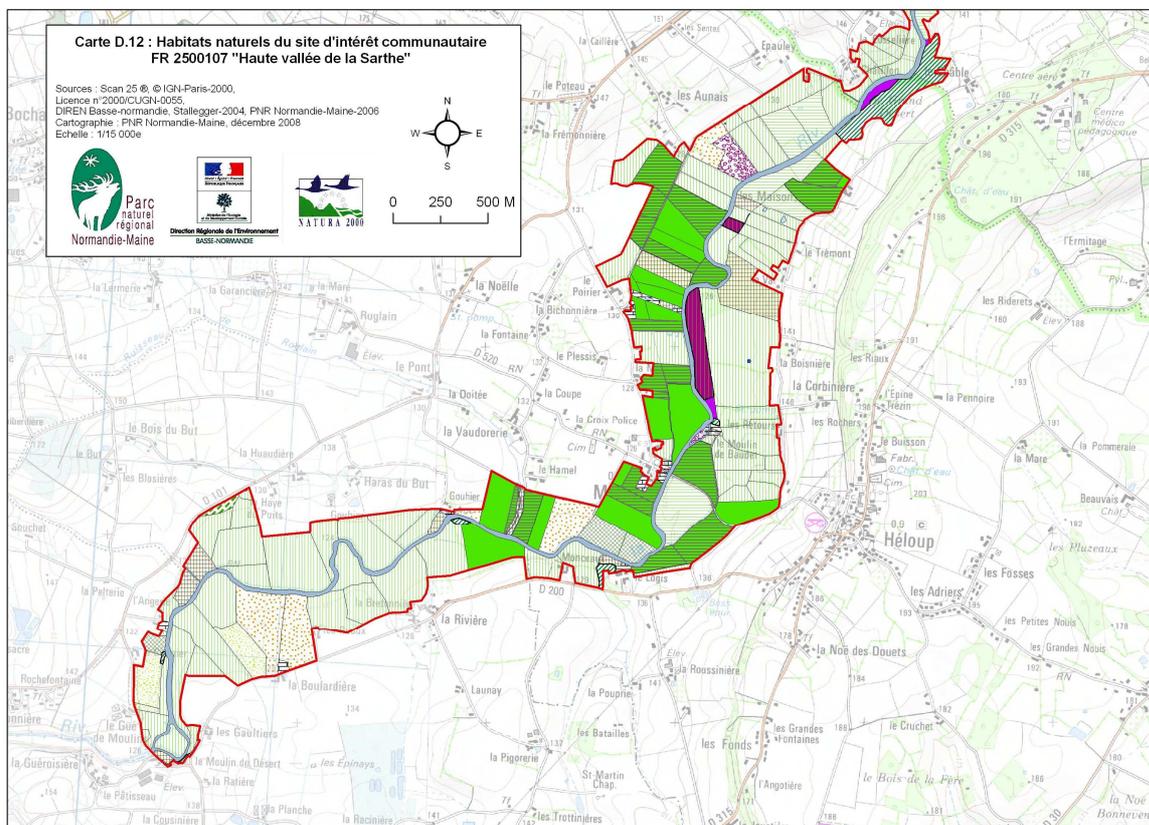


Figure 54: Exemple de carte de l'Atlas Natura 2000

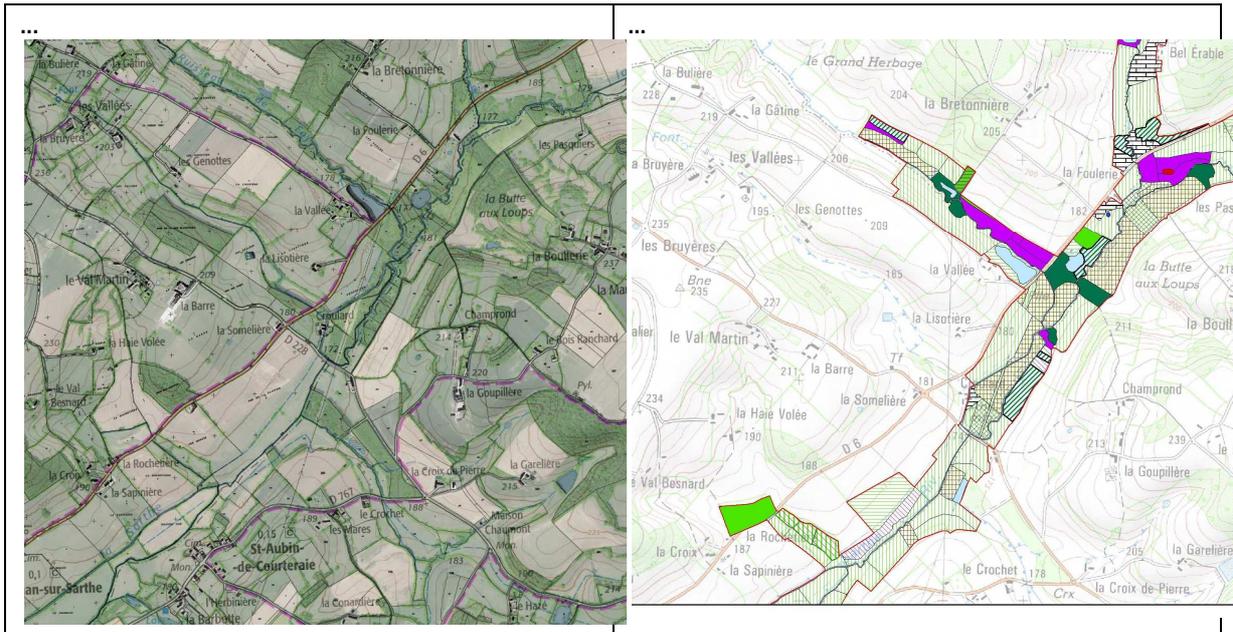


Figure 55 : Lit majeur de la Sarthe en amont de Saint Aubin de Courteraie ; modification de la végétation (extrait Atlas Natura 2000) en lien avec les aménagements hydrauliques (tracé sinueux de la rivière en amont de la D 228 et rectiligne en aval) (données IGN Geoportail)

Ces caractéristiques du fond de la vallée de la Sarthe agissent tant à grande qu'à petite échelle sur le degré d'hydromorphie des sédiments qui remplissent ce fond ; leur ressuyage, est ainsi ralenti ou accéléré selon les endroits, par les aménagements. Ces caractéristiques sont enregistrées par la végétation, révélatrice de cette humidité.

4.1.3 Découpage de la vallée en tronçons homogènes

Son objectif est de révéler les caractéristiques du fond de vallée et leurs modifications de l'amont vers l'aval. Ultérieurement, elles seront mises en regard de zones humides pour montrer dans quelle mesure ces caractéristiques les déterminent.

14 tronçons de vallées ont été définis à partir de critères morphométriques. Les données calculées à partir du MNT sont regroupées dans les tableaux figurant en annexe (Annexe I.5). Ils sont décomposés en 43 sous tronçons selon les aménagements principaux du fond de vallée, barrages, passages de voies de communication... (Annexes I.6. et I.7.).

Le graphique de la Figure 56 met en évidence une grande variété de formes. On y reconnaît cependant les trois zones identifiées par la géomorphologie (Tableau 18) :

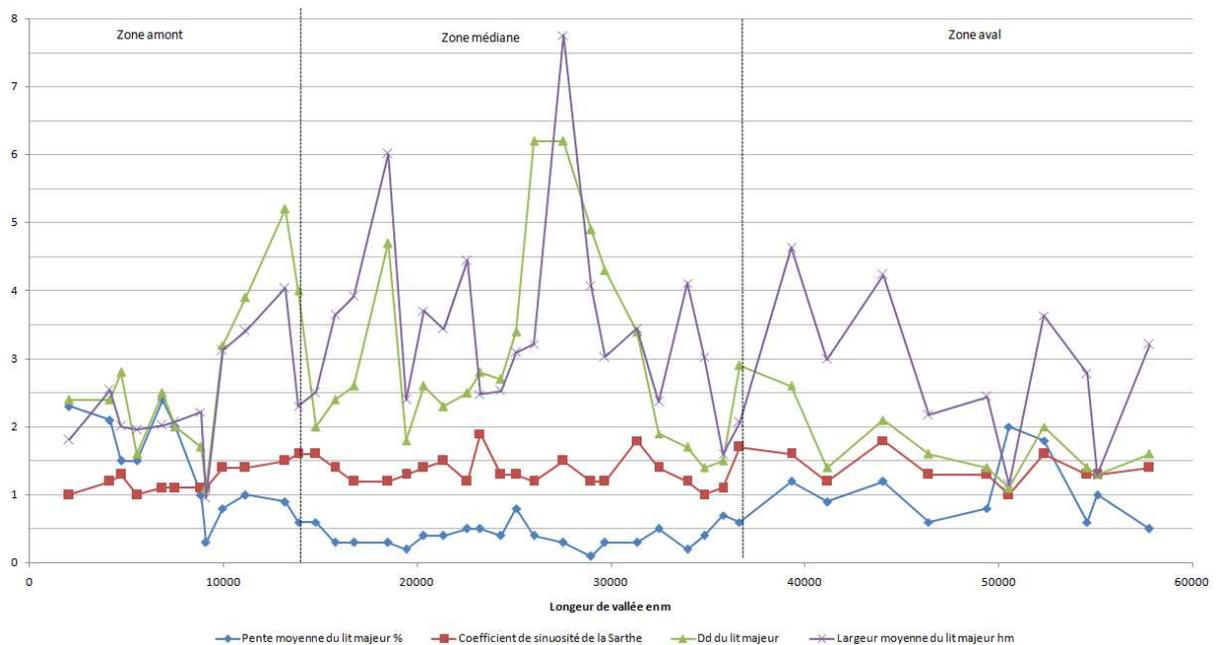


Figure 56 : Caractéristiques principales des sous tronçons

Tableau 18 : Caractéristiques morphométriques des zones de vallée :

Critère	Zone amont	Zone médiane	Zone aval :
Tronçons	1 - 3	4 - 10	11- 14
Pente	4 - 1%	Inférieure 1%	0.5 à 2.5 %
Coefficient de sinuosité de la Sarthe	1 - 1.5	1 - 2	1 - 1.8
Largeur du lit majeur	100 - 400 m	150 - 750 m	100 - 450 m
Densité de drainage du lit majeur	1 - 5	1,5 - 6	1 - 2,5

Mais les contrastes à l'intérieur de ces zones sont notables :

- pente et largeur du lit majeur (influencées par la présence ou non d'une basse terrasse) sont en grande partie reliées aux conditions géomorphologiques et peu concernées par les interventions anthropiques ;
- coefficient de sinuosité de la Sarthe et densité du drainage en lit majeur ont été modifiés par les interventions anthropiques :
 - le coefficient de sinuosité de la Sarthe varie de 1, tracé rectiligne dans les tronçons où la rivière a été "linéarisée" , à 2, tracé très sinueux probablement proche du tracé naturel ;
 - la densité de drainage est très contrastée en lien avec le drainage naturel mais également l'ajout de drains artificiels aériens (les drains enterrés ne sont pas connus). Cela apparaît aussi sur le graphique de la Figure 57 ;
 - qui montre qu'il y a peu de corrélation entre la surface du lit majeur et la densité de drainage. Mais il est aussi possible que les valeurs les plus élevées (> 5) atteintes en amont de la confluence de la Hoëne (sous tronçons 303) et en aval de Le Mêle sur Sarthe (tronçons 6 et 7) soient liées au drainage de sources situées au contact du Callovien sablo-argileux et des couches du Crétacé discordantes formées d'argiles vertes, glauconieuses, considérées comme un horizon sourceux (Moguedet 1998).

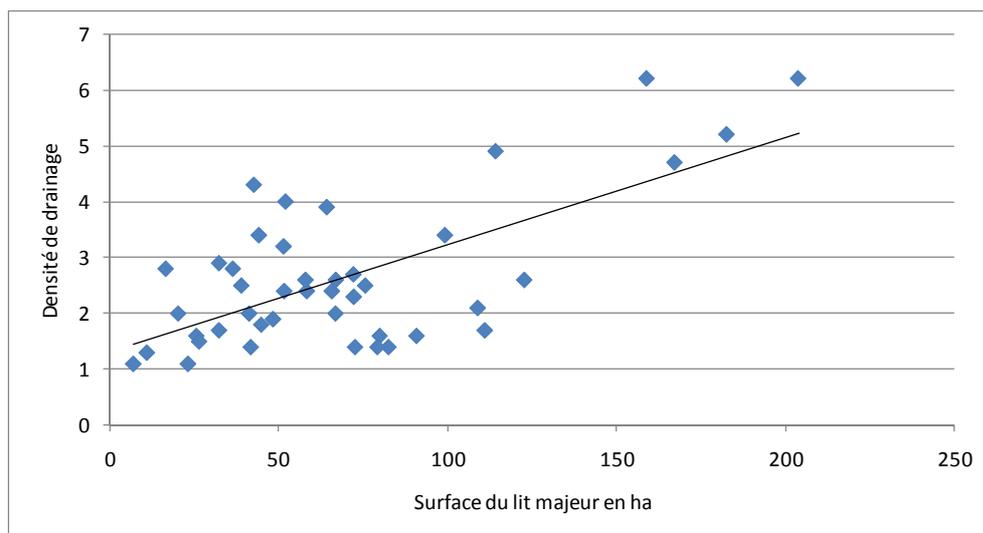


Figure 57 : Surface du lit majeur et densité de drainage

Conclusion :

Le fond de la vallée de la Sarthe présente dans le détail une mosaïque de milieux.

Les origines naturelles de cette mosaïque sont reliées à la résistance et à la perméabilité du substratum encaissant.

Les interventions anthropiques ont contribué à modifier ou peut être plutôt à arranger les conditions naturelles ;

- réduction des secteurs humides là où les parcelles agricoles ont été remembrées ;
- arasement des haies, disparition des chemins d'exploitation, drainage ;
- construction de remblais divers.

A très grande échelle, ces interventions introduisent une hétérogénéité dans le degré d'humidité du milieu et d'hydromorphie du sol mais selon des mailles de dimension variées. Les liens sont étroits entre le parcellaire qui sert de référence à l'exploitation agricole et au traitement de l'eau par les exploitants et la mosaïque de milieux présents dans le fond de vallée.

Pour la suite de l'étude, nous considérons que la végétation dont les caractéristiques ont été déterminées dans l'Atlas Natura 2000 est un indicateur fiable de l'humidité du sol (pas de carte pédologique dans la vallée de la Sarthe).

4.2 La végétation comme outil pour reconsidérer les zones humides¹

Les travaux envisagés ont pour objectif de produire un modèle capable de déterminer les meilleures conditions pour que des zones humides se développent dans le fond de la vallée de la Sarthe à une précision plus grande que celle des parcelles agricoles, unité de référence de l'Atlas Natura 2000.

¹ Ce paragraphe a été produit par Raquel Sanchez Carillo, stagiaire M2 Recherche au laboratoire ESO Le Mans (janvier mai 2016). François Messner, technicien au laboratoire ESO Le Mans a contribué à la mise au point du modèle réalisé par le traitement des données.

La démarche mise en œuvre pour identifier des zones humides potentielles comprend une recherche de facteurs qui déterminent ces ensembles et permettent de les simuler. Elle est ensuite appliquée à des sites spécifiques qui sont les barrages dans le but de mettre en évidence leurs impacts sur l'humidité. Elle est également appliquée aux tronçons de vallée afin de rechercher les liens entre formes et zones humides.

4.2.1 La construction du modèle

Ce modèle est réalisé en 5 étapes (Tableau 19)

Tableau 19 : Synthèse de la méthode appliquée. De gauche à droite, étape, manipulation, logiciel et sorties terrains effectuées pour la validation des résultats.

Étapes	Travaux	Outils	Vérification
1	Recherche bibliographique et d'informations géographiques. Etat des connaissances, cartographie de la zone d'étude	ArcGIS 10.3	Sortie terrain 21 et 29 janviers 2016
2	Analyse statistique des facteurs de contrôle par type de végétation	ENVI 4.8 ArcGIS 10.3	Sortie terrain 22 mars
3	Modèle statistique, arbre de décision	RStudia	
4	Traitement statistique de l'indice d'humidité et de verdeur en amont et en aval des obstacles à l'écoulement	ArcGIS 10.3	Sortie terrain 25 avril
5	Classification des types de végétation et des zones humides associées	ArcGIS 10.3	

- Les données du modèle

Les données utilisées sont présentées dans le Tableau 20. Elles prennent en compte les formations végétales définies et localisées dans l'Atlas Natura 2000, des données relatives aux configurations de terrains (réseaux hydrographique, routier et de voies ferrées, obstacles à l'écoulement) et à l'altitude et des données extraites des images satellites (données capables de révéler les états de surface du sol).

Tableau 20 : Métadonnées des couches spatiales utilisées. (*) Référentiel des Obstacles à l'Écoulement.

Données	Formations végétales Habitats Nat. 2000	Reseau. hydro graphique.	Reseau. routier	Reseau voies ferrées	ROE*	MNT25	Orthophoto 2010	Images Landsat 8, TOC
Organisme producteur donnée	PNRNM	IGN	IGN	SNCF	Eau France	IGN	IGN	USGS
Date acquisition/production	2007	1998	2006	2006	2013	1987-2001	2010	2015 (juin et décembre)
Syst. spatial réf.	NTF II	RGF93	RGF93	RGF93	RGF93	RGF93	RGF93	WGS84
Modèle de données	Vecteur	Vecteur	Vecteur	Vecteur	Vecteur	Raster	Raster	Raster
Fonctionnalité	Végétation	Dist. euclidienne au c. d'eau	Influence sur la végétation	Influence sur la végétation.	Influence sur la végétation	Altitude, pente	Fond carte	Humidité, verdure, brillance
Résolution temporelle								16 jours
Résol. spatiale	1:15000	1:50000	1:500000	1:500000	1:25000	25m	0.50m	30m
Fauchée								185km
Résol. radiométrique								12 bits
Résolution spectrale (bandes de Landsat8)	B1							0.43-0.45 µm
	B2							0.45-0.51 µm
	B3							0.51-0.59 µm
	B4							0.64-0.67 µm
	B5							0.85-0.88 µm
	B6							1.57-1.65 µm
	B7							2.11-2.29 µm

- Analyse statistique des formations végétales

Les données ont été traitées statistiquement (mesures de tendance centrale et de dispersion). L'objectif est d'étudier la séparabilité statistique des types de végétation identifiés et la faisabilité d'un modèle prédictif. Au total, on a considéré 10 facteurs de contrôle (Annexes I.8). La classification de la végétation (Figure 58 et Figure 59) est basée outre sur le document de Natura 2000, sur une sortie sur le terrain pour la validation des groupes de formations végétales. On a utilisé les logiciels ENVI 4.8 et ArcGIS.

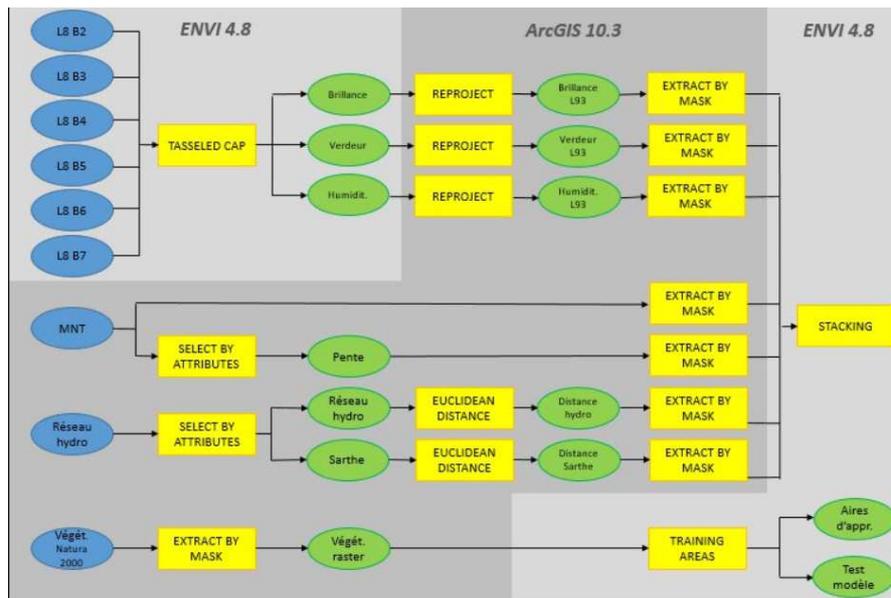


Figure 58 : Démarche retenue pour le traitement des données

Les données ont été traitées en deux familles, formations végétales et facteurs de contrôle.

- **Première famille des données : Formations végétales**

Elles proviennent des 26 classes d'habitats correspondant à 26 classes de végétation prises en compte dans l'Atlas Natura 2000. Le nombre de classes, peu opératif pour les analyses statistiques prévues, a nécessité un travail de reclassification dans le but de faciliter les calculs et ultérieurement l'interprétation des résultats (Figure 59).

Classification initiale (Habitats)	Première classification (Types d'occupation du sol)	Seconde classification (Formations végétales)
Fossés et rivières	Eau	
Plan d'eau eutrophe		
Cours d'eau	Prairies maigres	Prairies maigres
Plans d'eau		
Prairies maigres de fauche	Prairies méso-hygrophiles	Prairies méso-hygrophiles
Prairies maigres potentielles		
Prairies maigres/Cariçaies	Formations hygrophiles	Formations hygrophiles autres
Prairies améliorées		
Prairies de fauche méso-hygro	Cultures	
Prairies pâturées méso-hygro		
Prairies de fauche/Cariçaies	Mégaphorbiaies et friches	Mégaphorbiaies et friches
Prairies pâturées/Cariçaies		
Gazons amphibiens	Boisements	Boisements
Cariçaies		
Roselières	Peupleraies	Peupleraies
Tourbière basse alcaline		
Prairies paratourbeuses	Sol urbain	
Cultures		
Friches et terrains rudéraux		
Mégaphorbiaies		
Mégaphorbiaies/prairies de fauche		
Mégaphorbiaies/prairies pâturées		
Boisements alluviaux		
Boisements mixtes		
Plantations de feuillus		
Plantations de résineux		
Vergers		
Peupleraies		
Bâti, parcs et jardins		

Figure 59 : Classes de formations végétales. Source : GORET, JUHEL (2015)

Les 26 classes initiales, ont été réduites à 9 puis à 6. Les surfaces en eau, les cultures et le sol urbain présentant une disposition indépendante des caractéristiques du milieu physique ne sont pas pris en compte pour le modèle. N'ont été retenues que les classes concernant les zones humides selon deux critères principaux, fréquence théorique de submersion et pH des zones humides (Figure 60) (GORET, JUHEL, 2015). Cette classification a été validée sur le terrain en prenant en compte les conditions nécessaires au développement des formations végétales déterminées à partir de la bibliographie et certaines particularités.

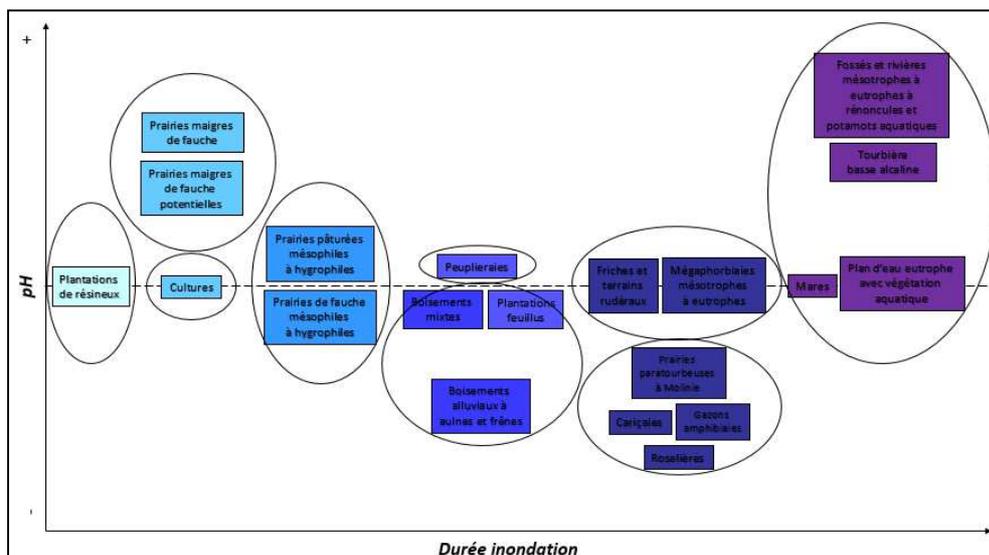


Figure 60 : Regroupement des formations végétales. Source : GORET, JUHEL (2015)

Dans le Tableau 19, sont notées les conditions principales du développement des formations végétales. Parmi les ensembles retenus :

- les mégaphorbiais et les friches ont été regroupées ; les observations de terrain confirment la faible extension des friches mais également la tendance à leur "humidification" qui se manifeste dès l'abandon de l'entretien de la surface du sol. Nous sommes partis de l'idée que cet abandon permet que s'instaurent des conditions favorables au développement de mégaphorbiais ;
- les autres formations hygrophiles regroupent les catégories de zones humides non prises en compte par les autres classes.

Tableau 21 : Quelques précisions sur les formations végétales étudiées.

Source: COMMISSION EUROPÉENNE 1999, DR ENVIRONNEMENT RHÔNE-ALPES 2007, PNR NORMANDIE-MAINE 2007

Formation végétale	Conditions	Observations
Boisement	Conifères: adaptés au manque d'eau (en saison de gelées). Feuillus : précipitations importantes, sol riche en nutriments.	Longues saisons de croissance (moins contrastées d'une année à l'autre).
Peupleraies	Espèce héliophile. Près du lit mais légèrement en hauteur, toujours avec l'accès à la nappe phréatique.	Coupe tous les 15 ans. Terroirs fertiles (difficiles de les trouver donc en état naturel).
Mégaphorbiaies et friches	Faible pente. Proches au lit.	Développement rapide en saison de croissance (juillet-août). Plante annuelle.
Autres formations hygrophiles	Importants besoins d'eau et des inondations récurrentes.	
Prairies mésophiles à hygrophiles	Eau en abondance.	
Prairies maigres	Grande capacité d'adaptation. Sols plus ou moins profonds. Humidité modérée.	Très fertiles. Système d'exploitation modifie cortège floristique.

- **Seconde famille des données : facteurs de contrôle**

Les données d'entrée sont le réseau hydrographique, le MNT 25 mètres et les images satellites Landsat OLI 8. Toutes les couches ont été traitées afin d'obtenir une matrice aux dimensions de l'espace Natura 2000 de la Haute Vallée de la Sarthe (fond de la vallée de la Sarthe), le système de référence spatiale RGF93 Lambert 93 et une taille de pixel de 5m x 5m.

L'humidité, la verdure et la brillance de la surface, calculées grâce à l'outil *Tasseled Cap* (ENVI 4.8), qui prend comme données d'entrée toutes les bandes de l'optique et de l'infrarouge corrigées (distorsion atmosphérique). Elles ont été ensuite traitées statistiquement et des nouvelles bandes ont été créées à travers une analyse proche de l'Analyse en Composantes Principales. Cette procédure a été réalisée pour des images prises à deux dates : 30 juin 2015 (image prise pendant une période sans pluie et 7 décembre 2015 correspondant à des périodes sans précipitations (Annexes I.9. Diagrammes ombrothermiques).

L'humidité de la surface montre celle du sol et du couvert végétal compris. La verdure représente l'activité végétative de la Surface. Elle dépend donc de la densité de la végétation et des espèces composant le cortège floristique. La brillance est indirectement un indicateur des surfaces anthropisées ou dépourvues d'eau. La pente et l'altitude, qui ont été obtenues directement à partir du Modèle Numérique du Terrain à une résolution de 25 mètres. La pente s'exprime en pourcentages et l'altitude en mètres.

La distance à la Sarthe et aux autres cours d'eau, calculée à partir l'outil *Euclidean Distance* (ArcGIS 10.3). La Distance s'exprime en mètres. On a pris la décision de séparer la Sarthe de ses tributaires puisqu'on considère qu'elle exerce une influence différente liée à un lit plus grand capable d'évacuer des volumes d'eau plus importants (plus grande puissance hydraulique, chenal plus large et plus profond).

L'outil *Zonal Statistics as Table* (ArcGIS 10.3), permet de produire un résumé statistique pour les deux familles de données. Il comprend le minimum, le maximum, la moyenne, l'écart-type et la somme de tous les facteurs.

- ***Calcul du modèle de répartition de la végétation***

La modélisation, dont le but est de prédire le comportement de la végétation uniquement à partir des facteurs naturels, a été lancée sur l'interface du logiciel Rstudio. Les fichiers d'entrée sont les couches spatiales des facteurs de contrôle et des aires d'apprentissage (issues de la couche des types de végétation de Natura 2000, de vérifications sur les photographies aériennes et sur le terrain). Cette procédure s'appuie sur le principe des arbres de décision. Elle nécessite une matrice de données raster (facteurs de contrôle) et une couche de polygones (aires d'apprentissage).

Trois algorithmes ont été testés ; SVM Radial, Random Forest et C5.0 de la Library CARET (RStudio) :

- Le modèle SVM Radial, ou Support Vector Machines, est un classifieur issu des méthodes de l'apprentissage automatique recherchant la séparation optimale entre les classes. Les aires d'apprentissage sont traitées comme vecteurs et elles sont séparées avec des hyperplans.
- Une meilleure précision théorique est obtenue en appliquant le modèle Random Forest, qui est un arbre de décision prenant en compte un caractère aléatoire dans la sélection de l'échantillon des aires d'apprentissage.
- Le modèle C5.0 est capable de gérer le problème des données manquantes. Il est basé sur la division de l'échantillon (d'aires d'apprentissage) selon le champ qui offre le gain maximal d'information. Les sous-échantillons définis lors de la première division se re-divisent en se basant sur un autre champ. Le processus se répète jusqu'à qu'il est impossible de diviser les sous-échantillons. Finalement, les sous-échantillons qui ne contribuent pas significativement au modèle sont supprimés.

- ***Données injectées dans le modèle***

Les échantillons sont constitués par des aires d'entraînement issus la classification des formations végétales en 6 classes (de l'étape 2) (Annexes I.10. et I.11) :

- mégaphorbiaies et friches ;
- prairies maigres ;
- prairies mésophiles à hygrophiles ;
- boisements ;
- peupleraies ;
- autres formations hygrophiles.

Les variables explicatives seront les facteurs de contrôle retenus lors de l'étape 2 (Annexe I.12) :

- l'humidité au 30 juin 2015 ;
- l'humidité au 7 décembre 2015 ;
- la verdeur au 30 juin 2015 ;
- la verdeur au 7 décembre 2015 ;
- la brillance au 30 juin 2015 ;
- la brillance au 7 décembre 2015 ;
- la distance à la Sarthe ;
- la distance aux cours d'eau (Sarthe on comprise) ;
- l'altitude ;
- et la pente.

- **Traitement des données par les modèles**

Les résultats issus de la modélisation sont :

- les règles des seuils de chaque facteur qui contrôle la répartition spatiale des classes de végétation ;
- la prédiction (Figure 61, Figure 62 et Figure 63) de l'appartenance aux classes de l'ensemble des pixels qui constituent la zone d'étude ;
- et pour chaque pixel, la probabilité d'appartenance aux classes issues de la prédiction.

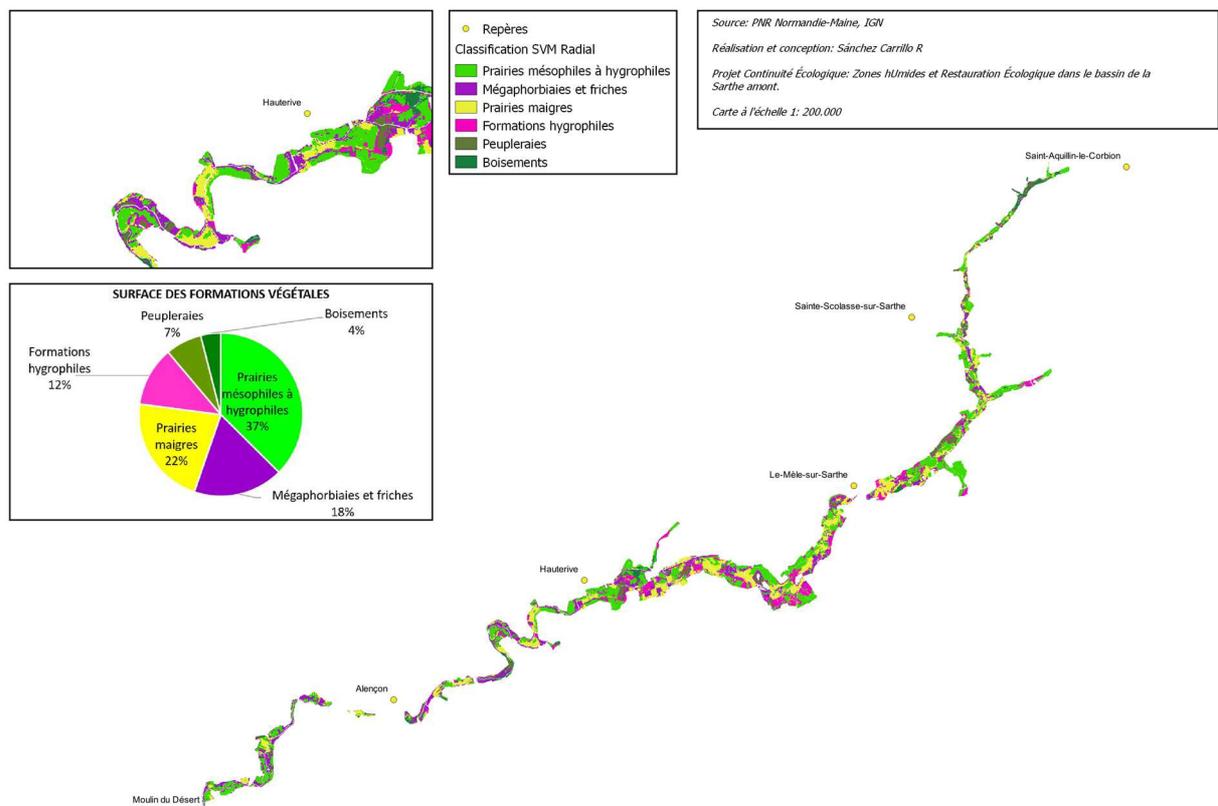


Figure 61 : Répartition des formations végétales d'après le modèle SVM Radial

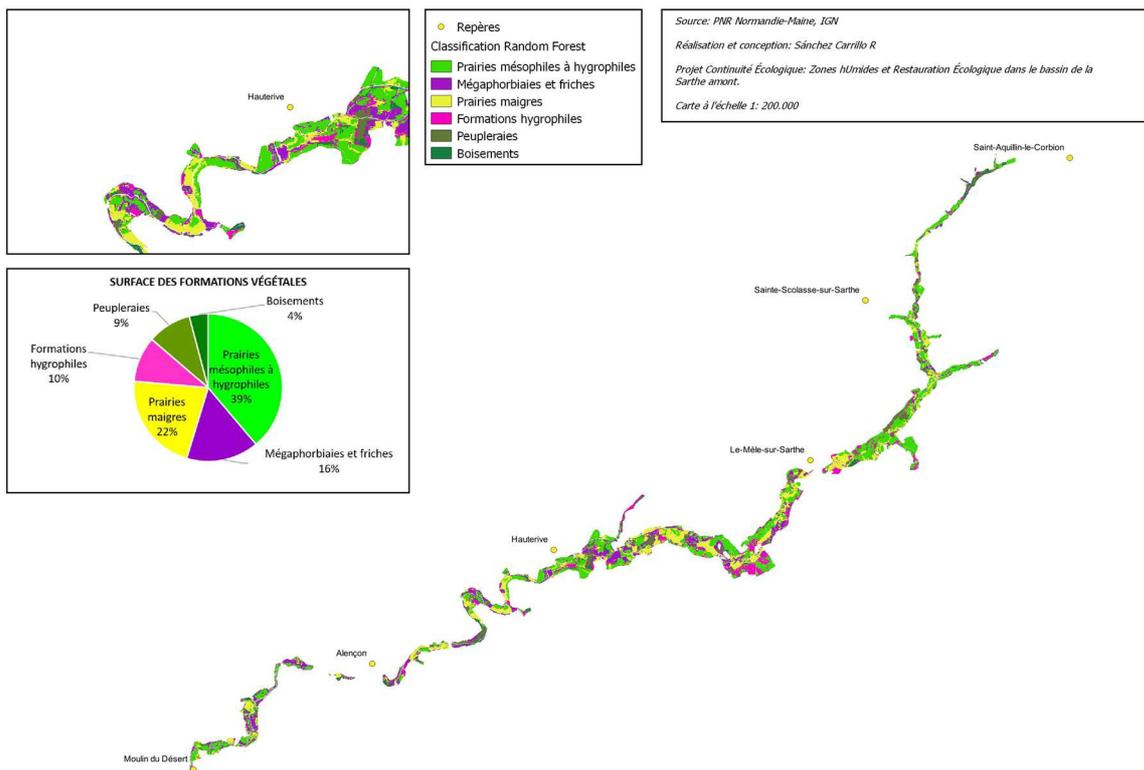


Figure 62 : Répartition des formations végétales d'après le modèle Random Forest

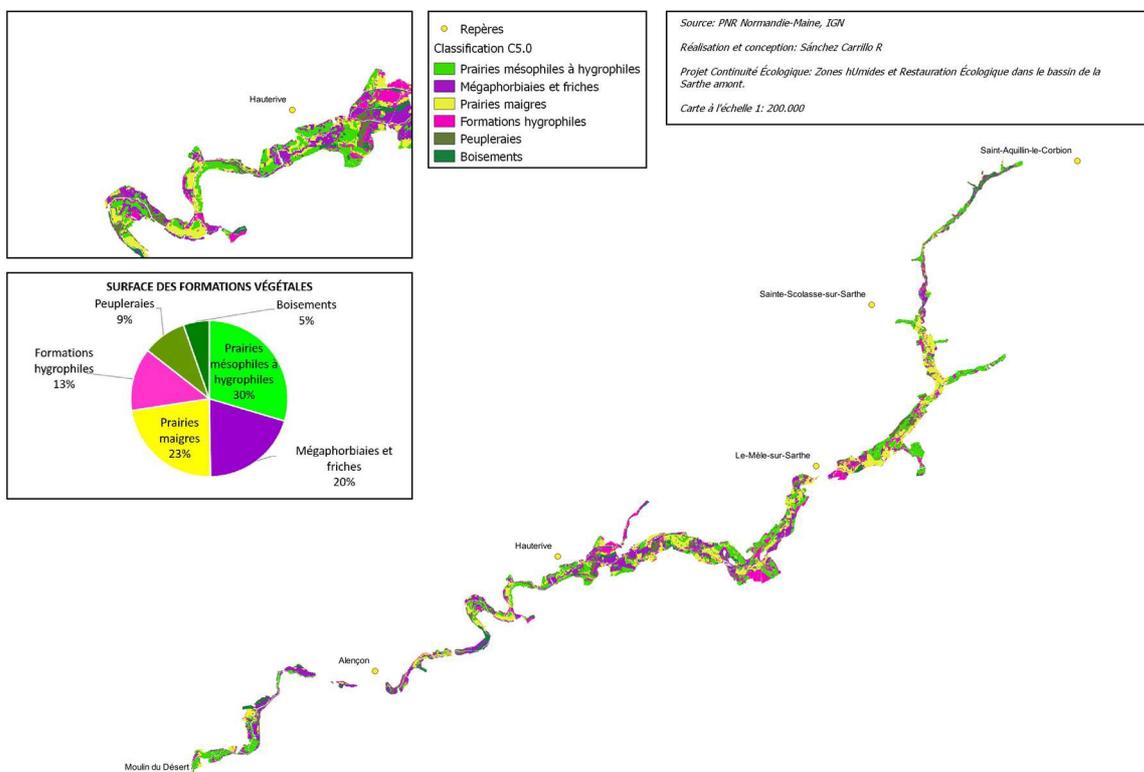
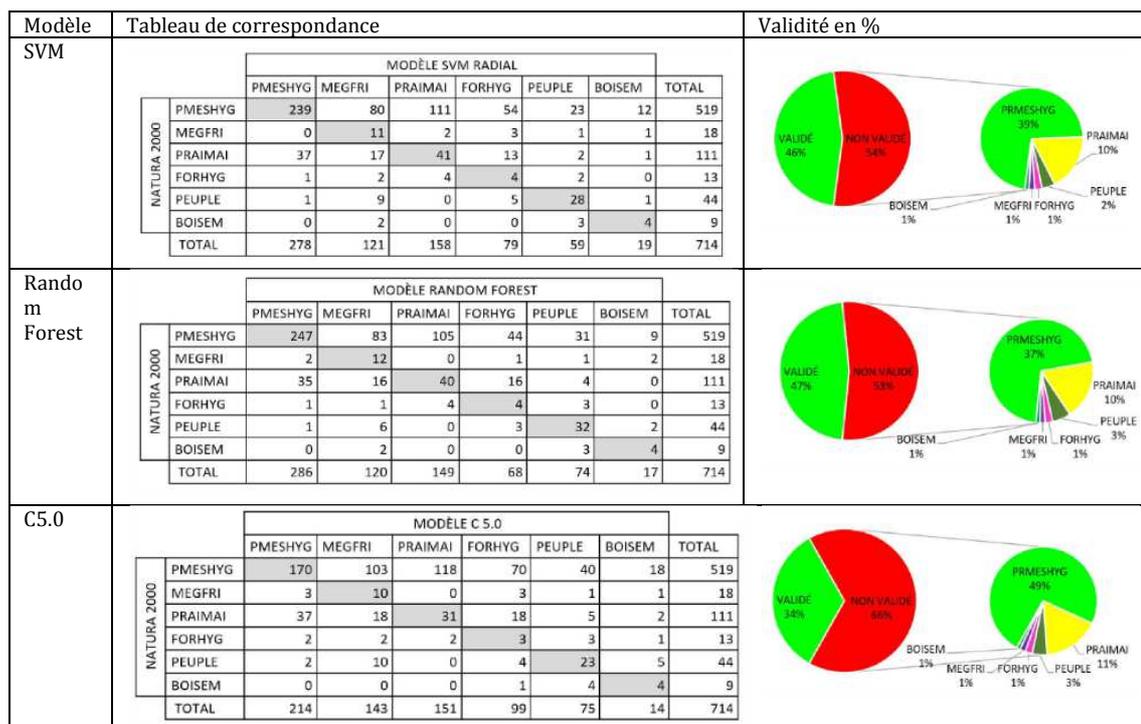


Figure 63 : Répartition des formations végétales d'après le modèle C5.0

L'interprétation des modèles a été possible grâce au calcul de la matrice de validation (ArcGIS). La matrice prend comme données d'entrée un échantillon de 714 points, générés à partir d'une grille de 200m x 200m (Figure 64). Un tableau à double entrée met en lien les attributs correspondant aux habitats de l'inventaire Natura 2000 et les habitats prédits par le modèle. Cette validation est externe, les points d'entraînement n'étant pas utilisés pour le calcul des modèles. Le tableau, permet de valider les données et d'estimer la fiabilité des modèles. Les valeurs figurant dans la diagonale, devront être le plus près de celles de l'inventaire du document Natura 2000 (Annexe I.14).



Abréviations:

PMESHYG: Prairies mésophiles à hygrophiles
 MEGFRI: Mégaphorbiaies et friches
 PRAIMAI: Prairies maigres
 FORHYG: Formations hygrophiles
 PEUPLE: Peupleraies
 BOISEM: Boisements

Figure 64 : Performance de la modélisation (3 modèles testés)

- *Analyse statistique de la végétation en amont et en aval des obstacles à l'écoulement.*

La démarche de simulation de l'emplacement des zones humides a été appliquée à des sites équipés de barrage. L'objectif est de mettre en évidence leur influence sur l'humidité dans le lit majeur. Autour de chaque obstacle, nous avons défini pour le traitement, une aire d'influence circulaire de 250m de rayon, centrée sur le barrage et divisée en deux, perpendiculairement au lit majeur afin de créer deux zones, de part et d'autre de l'obstacle. À partir de cette couche, on a réalisé un *Intersect* avec la couche d'occupation du sol, un autre avec l'humidité et un autre avec la verdure. Ainsi, avec les outils de statistique zonale (ArcGIS 10.3) on a eu les statistiques de tendance centrale et de dispersion et on a réalisé les documents suivants :

- contraste amont/aval des occupations du sol pour une aire d'influence de 250 mètres à partir des obstacles retenus. La végétation se présente telle qu'elle a été saisie dans le modèle C5.0, en 6 classes (boisements, peupleraies, mégaphorbiaies et friches, prairies mésophiles à hygrophiles, formations hygrophiles autres et prairies maigres (Annexe I.13 N° I 4j1 à I 4j3)
- contraste amont/aval de l'humidité aussi pour une aire d'influence de 250 mètres. L'humidité se présente en 10 classes (méthode Natural Breaks) en fonction de l'humidité de la surface calculée avec Tasseled Cap. On a réalisé une carte pour chaque date disponible (30 juin et 7 décembre 2015) (Annexes I.13. N° I 4j 4 à I 4j9).
- contraste amont/aval de la verdure avec une ampleur de 250 mètres depuis les obstacles. On a également produit une carte pour chaque date (30 juin et 7 décembre 2015) (Annexes I.13. N° I 4j10 à I 4j15)

Conclusion : critique des données et des traitements

1 : La taille de la zone d'étude complique la réalisation d'une cartographie ex novo à l'échelle du détail souhaitée pour l'analyse des zones humides. L'abondance des données constitue une gêne aux traitements statistiques et donne lieu à des résultats hétérogènes d'interprétation complexe.

2 : La résolution spatiale des données traitées varie de 5 à 30 mètres ce qui rend leur étude difficile. La surface des zones humides est souvent petite ; les pixels peuvent ainsi contenir différentes occupations (mixel ou pixel mixte). Elles sont par ailleurs calées sur les mailles du parcellaire ce qui n'est pas adapté à la taille réelle des zones humides dont la surface est parfois inférieure à un are. Une même parcelle peut contenir différents types de cortèges floristiques. Leurs limites naturelles ne sont pas des lignes droites, mais des transitions progressives souvent irrégulières. À travers la photo-interprétation des orthophotos de 2010 utilisées pour la sélection d'aires d'entraînement on a essayé de diminuer cette erreur.

3 : On ne disposait que d'un nombre limité d'images satellites de libre accès aux moments souhaités durant les années 2014 et 2015. Une analyse multi-temporelle complète aurait pu apporter plus d'éléments de discrimination entre les types de végétation (par exemple, entre cultures et prairies). Les dates favorables sont octobre-janvier, le printemps tardif et le début d'été. Nous n'avons disposé que de la première et de la dernière, juin et octobre 2015. Les données seront comparées à celle de 2007. Il s'avère à partir de vérifications sur les photographies aériennes que la végétation s'est peu modifiée entre 2007 et 2015 (retouches locales aux abords de la voie rapide RN12 et de l'agglomération d'Alençon).

4 : La prise en compte d'éléments anthropiques pour les traitements statistiques n'est pas simple ni automatique. S'agissant d'un bassin versant hautement modifié par l'homme, les facteurs explicatifs de nature humaine sont divers. Par exemple, on ne dispose pas d'information sur les haies du bocage à l'échelle de l'étude et leur identification est complexe, de plus seul leur amont est intéressant. La complexité est encore accrue lorsqu'il s'agit de prendre en compte les micro topographies que le MNT 25 ne permet pas de détecter. Il a été choisi de délimiter l'amont et l'aval des barrages par une ligne rectiligne alors qu'un tracé respectant les micro-topographies aurait été plus juste.

4.2.2 Interprétation des résultats du modèle

La Haute Vallée de la Sarthe est caractérisée par une précoce exploitation agroforestière, avec un paysage hautement modifié qui ne répond plus aux facteurs naturels mais en grande partie aux systèmes d'exploitation choisis par les agriculteurs qui mettent en valeur le fond de la vallée. Ce choix s'appuie sur la volonté d'obtenir la plus grande rentabilité économique. Ainsi, les propriétaires retiennent un système ou un autre en fonction des potentialités du milieu et du besoin des plantes mais aussi des conditions économiques (plantation de peupliers ou de conifères sur les parcelles abandonnées par la mise en valeur agricole, friches herbacées...). L'état actuel du milieu est ainsi dû tant aux conditions naturelles qu'à leurs modifications d'origine anthropique. La détermination de la capacité d'adaptation de la végétation à la distribution des agents externes est compliquée.

L'interprétation des résultats prend ainsi en compte différents aspects en lien avec les données disponibles. Il s'agit en plus des caractéristiques générales de la vallée de la Sarthe, de trois autres aspects :

- caractérisation des formations végétales selon les facteurs physiques et les facteurs dépendants de la végétation (télédéetectées à partir des images de juin et décembre 2015).
- Possible scénario de répartition de la végétation selon le modèle statistique C5.0.
- Estimation de l'influence des obstacles transversaux à l'écoulement dans le lit mineur de la Sarthe sur l'humidité et l'activité végétative des formations en amont et en aval.

4.2.2.1 Caractérisation des zones humides

L'étude des conditions de chaque formation végétale (6 catégories de végétation) a été réalisée à travers les mesures de distribution centrale et de dispersion des facteurs naturels. Les résultats ont été représentés sous forme de *boxplot* dans le but de rendre plus facile la lecture globale. Les objectifs de cette analyse statistique sont :

- calculer un modèle naturalisé de la répartition des zones humides,
- analyser les conditions favorables à la végétation des zones humides.

Les variables utilisées se divisent en deux groupes :

- Le premier, composé de variables complètement indépendantes de la végétation. Il s'agit des caractéristiques du milieu physique.
- Le deuxième groupe est constitué par les propriétés télédéetectées, dépendantes de la végétation.

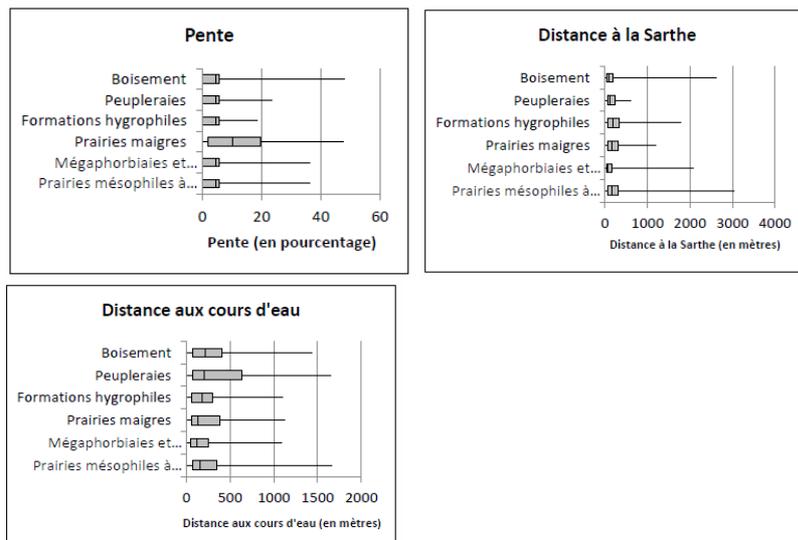
Milieu physique

- *Pente*

La pente intervient assez peu. Peu contrastée et faibles, elle ne paraît pas être un critère discriminant que pour les prairies maigres qui ont par ailleurs une grande capacité d'adaptation à des conditions environnementales diverses. Les maximums et minimums montrent néanmoins, des différences notables ; c'est le cas des peupleraies et des « autres formations hygrophiles » qui sont moins éloignés de leur médiane (moindre tolérance à la pente ou hasard).

- **Distance à la Sarthe et aux autres cours d'eau**

La distance à la Sarthe des maximums et des minimums des peupleraies et des prairies maigres à leur médiane, met en évidence une distribution plus homogène. Par ailleurs, les trois premiers quartiles (la plupart des cas) des mégaphorbiaies et des boisements sont plus proches du zéro. En prenant en compte les autres cours d'eau, on constate une légère différence entre les "autres formations hygrophiles", les mégaphorbiaies et les prairies maigres, et le reste. Les premières seraient en lien avec la distance aux cours d'eau. Les secondes semblent indépendantes.



Source : PNR Normandie-Maine, IGN.

Figure 65 : Variables indépendantes de la végétation en mètres (en pourcentage la pente).

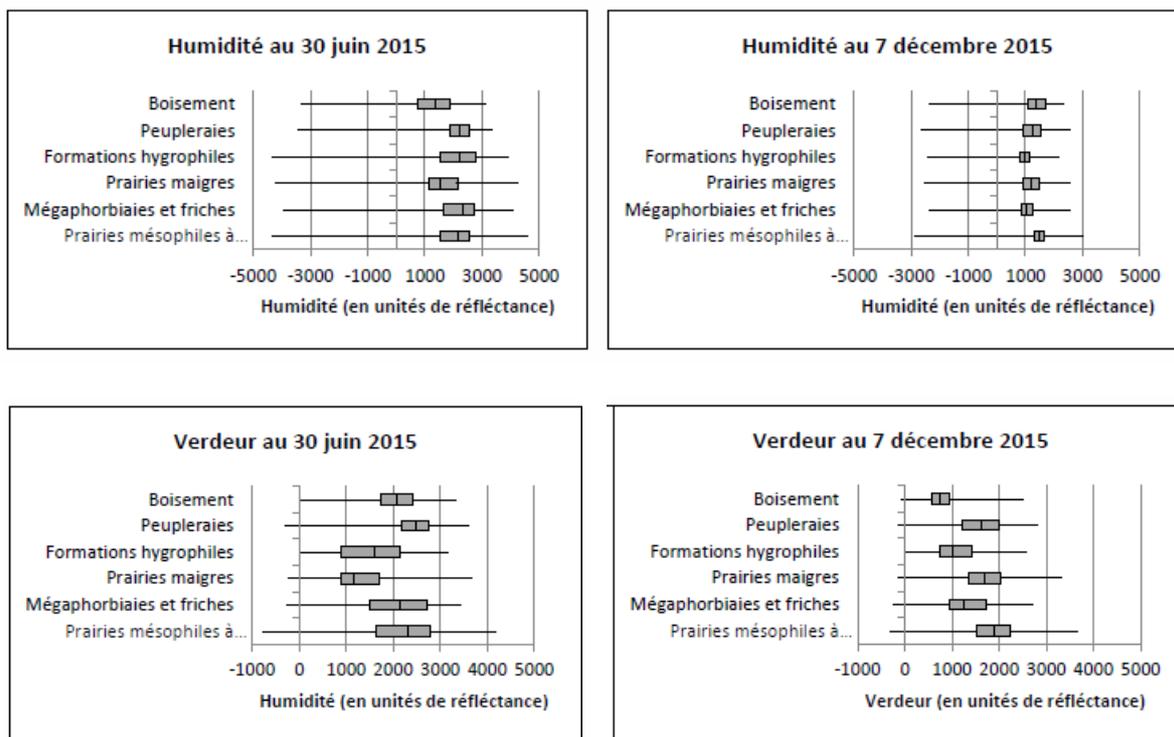
On peut donc retenir que préférentiellement, les boisements sont plus près de la Sarthe, les mégaphorbiaies sont près de la Sarthe et des autres drains, et les autres formations hygrophiles près des drains autres que la Sarthe.

Végétation

- **Humidité et verdeur en juin et en décembre**

Dans la verdeur, les deux variables présentent une inversion d'une date à l'autre. Les formations ont donc des rythmes différents dans leurs cycles végétatifs.

En été, les peupleraies, les autres formations hygrophiles et les mégaphorbiaies sont aux endroits les plus humides. En hiver l'humidité est plus élevée dans les boisements et les prairies mésophiles à hygrophiles. Ce fait pourrait être le reflet de la réponse différente au stress hydrique ou aux seuils d'inondation ou niveau de submersion.



Source : PNR Normandie-Maine, USGS

Figure 66 : Variables dépendantes de la végétation.

D'un autre côté, la dispersion des variables est plus faible en hiver qu'en été (humidité élevée partout). L'activité chlorophyllienne plus discriminante que l'humidité est un indicateur indirect de la disponibilité d'eau même si elle dépend aussi des températures. Ainsi, les plus grandes valeurs sont atteintes en été.

Pour aller plus loin dans l'interprétation des données il faudrait considérer la profondeur du système racinaire et la structure des réservoirs d'eau souterraine mais qui sont des données non disponibles.

Ainsi, l'humidité seule ne serait pas assez discriminante. Cependant on dispose des jeux de données à deux dates pour deux variables : humidité et verdeur. Si la première n'est pas assez discriminante, la deuxième peut apporter des nuances (indirectement liées à l'humidité).

4.2.2.2 Scénario de répartition de la végétation d'après les modèles statistiques

Les modèles statistiques calculés ont une fiabilité inférieure au 50% pour notre zone d'étude, résultat de la faible résolution spatiale et temporelle des données considérées dans le calcul. Cependant, la tendance générale de la répartition spatiale des formations végétales se rapproche de la réalité (Annexe I.14).

Les proportions d'occupation du sol sont semblables. Bien que la surface occupée par les prairies mésophiles à hygrophiles diminue en faveur des autres formations hygrophiles et des mégaphorbiaies et friches. Les prairies mésophiles à hygrophiles et les prairies maigres restent prédominantes dans le fond de la vallée de la Sarthe Amont. Elles sont suivies par les mégaphorbiaies et les autres formations hygrophiles. Les formations arborées sont en dernière position. Dans une vallée plus naturelle, où l'exploitation par l'agriculture n'est pas prise en

compte (avec toutes les pratiques que ceci implique, comme le drainage agricole), les conditions d'humidité devraient permettre une occupation sur des surfaces bien plus grande, par la végétation hygrophile adaptée à des submersions fréquentes.

Le Tableau 22 montre les résultats obtenus par les trois modèles mobilisés pour prédire la répartition des 6 grandes formations végétales retenues.

Le modèle C5.0 est le moins performant (couvert végétal restitué à 33%). Les deux autres modèles ont une fiabilité de 46% (SVMR) et 47% (Random Forest).

Tableau 22 : Comparaison des surfaces des formations végétales de l'inventaire Natura 2000 et des modèles statistiques. Source : PNR Normandie-Maine.

FORMATIONS VÉGÉTALES	TRAVAIL SUR LE TERRAIN		MODÉLISATION					
	Natura 2000		SVMR		Random Forest		C5.0	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Prairies mésophiles-hygrophiles	204550	71.9	108398	37.5	112474	38.9	85663	29.7
Mégaphorbiaies et friches	7142	2.5	51421	17.8	45609	15.8	58234	20.1
Prairies maigres	45382	15.9	63110	21.8	62808	21.7	65993	22.8
Autres formations hygrophiles	4479	1.6	34078	11.8	28828	10.0	37719	13.0
Peupleraies	17715	6.2	20721	7.2	27615	9.54	26166	9.0
Boisements	5333	1.9	11456	4.0	11850	4.1	15409	5.3

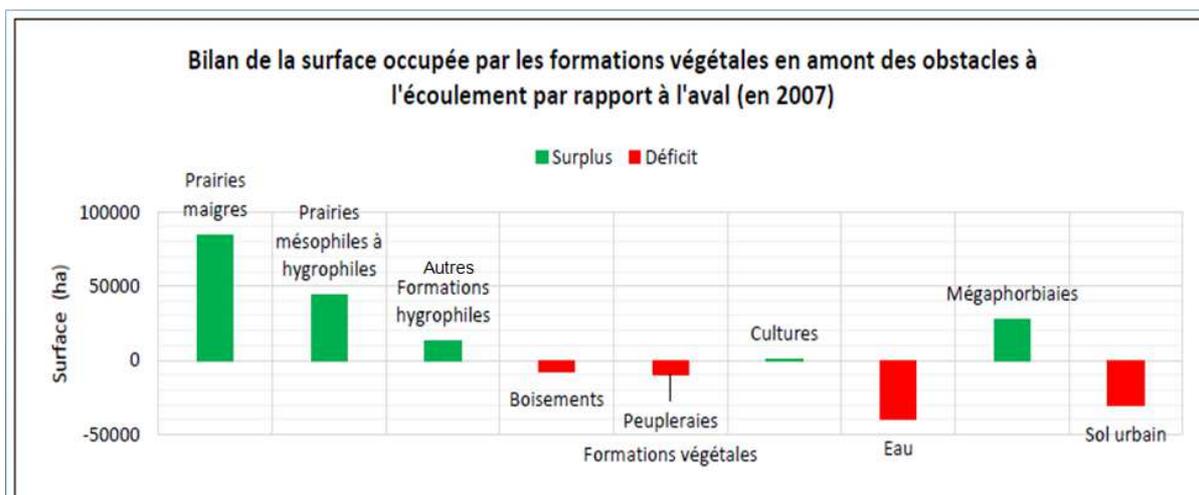
Même si le modèle Random Forest est plus fiable en termes de pourcentage, la répartition des formations végétales dessinée par le modèle SVMR semble plus raisonnable. On repère moins de pixels isolés avec des valeurs différentes de celles de son entourage. Les clusters sont mieux définis. Il produit les résultats les plus fiables soit en termes de pourcentage, soit en termes de répartition spatiale. Ces résultats seront pris en compte ultérieurement pour établir les liens entre la végétation et les caractéristiques de la vallée de la Sarthe.

4.2.3 **Contraste entre l'amont et l'aval des obstacles à l'écoulement**

L'analyse comprend une comparaison de la végétation à l'amont et à l'aval des ouvrages hydrauliques. Cette végétation est celle qui a été repérée en 2007 et cartographiée dans l'atlas Natura 2000 (Annexe I.13).

- **Occupation du sol**

Les usages du sol ne montrent pas une grande différence entre l'amont et l'aval des obstacles. Une interprétation possible serait que les activités économiques ont hautement modifié la végétation. Cette dernière ne répondrait plus à des facteurs naturels mais à la configuration d'un paysage dénaturalisé (modifications des circuits naturels de l'eau par les aménagements, du drainage des sols en particulier).



Source : PNR Normandie-Maine.

Figure 67 : Bilan d'occupation du sol en amont des obstacles en 2007. Les différences ont été calculées en soustrayant à la surface en amont, la surface en aval. Lorsque la surface est plus grande en amont, le résultat est positif.

On note cependant que les mégaphorbiaies et les autres formations hygrophiles, qui sont les habitats sous influence forte de la présence d'eau, occupent des surfaces un peu plus grandes en amont des ouvrages qu'en aval (sauf si on considère que les écarts très faibles, ne sont pas significatifs !) (Tableau 23 et Figure 67). Mais dans le détail les situations sont très variables.

Tableau 23 : Surface occupée par les formations végétales en hectares et en pourcentage ainsi que la différence entre l'amont et l'aval.

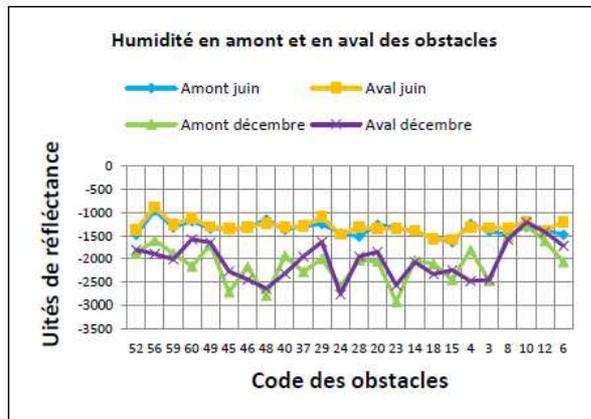
	Formations végétales	Amont				Aval				Différence (amont-aval)	
		Surface		μ	σ	Surface		μ	σ	ha	%
		ha	%			ha	%				
	Prairies maigres	270.219	17,5	11.259	15.805	186.300	12,7	7.762	11.200	83.919	4,7
	Pra. més. à hygro.	969.780	63,0	40.407	21.532	926.067	63,5	38.586	17.937	43.712	-0,4
	Form. hygrophiles	16.211	1,0	675	1.157	3.639	0,2	151	290	12.572	0,8
	Boisements	33.504	2,1	1.396	2.010	40.952	2,8	2.349	2.349	-7.447	-0,6
	Peupleraies	35.645	2,3	1.485	2.632	45.669	3,1	3.008	3.008	-10.023	-0,8
	Cultures	11.857	0,7	494	871	11.371	0,7	868	868	486	-0,0
	Eau	128.027	8,3	5.334	3.095	167.781	11,5	5.316	5.316	-39.753	-3,1
	Mégaphorbiaies	64.542	4,1	2.689	3.720	37.599	2,5	2.208	2.208	26.943	1,6
	Sol urbain	7.383	0,4	307	589	37.676	2,5	1.911	1.911	-30.293	-2,1

Source: PNR Normandie-Maine

- *L'humidité et la verdure*

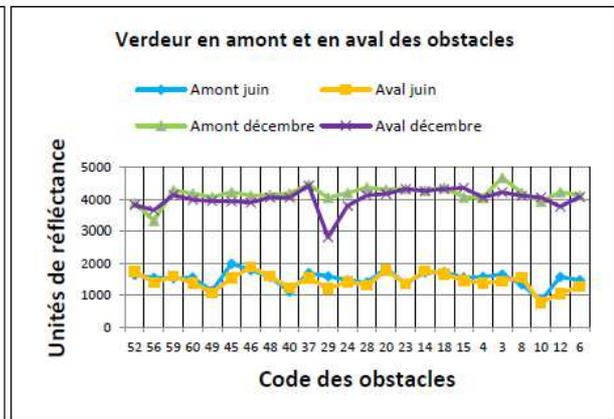
Quel que soit le moment et le lieu, les contrastes sont faibles et les situations très variables d'un ouvrage à l'autre comme le montre la Figure 68 et Figure 69. Tout juste peut-on noter que les contrastes sont un peu plus accusés en hiver qu'en été et davantage pour l'activité végétative que pour l'humidité.

Figure 68 : Humidité en amont et en aval des obstacles



Source : USGS

Figure 69 : Verdeur en amont et en aval des obstacles



Source : USGS

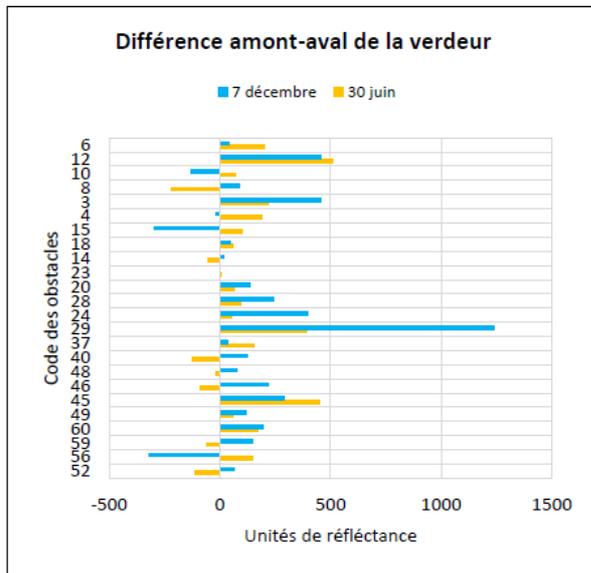
Cette activité est toujours un peu plus forte à l'amont des ouvrages quelle que soit la saison. (Tableau 24). Mais cela est plus ou moins marqué selon les formations végétales dominantes. Par ordre décroissant il s'agit des prairies mésophiles à hygrophiles, puis des prairies maigres et des mégaphorbiaies (Figure 70 et Figure 71)

Tableau 24 : Différence amont-aval de l'humidité et de la verdeur pour les deux dates disponibles. Si négative, amont plus sec. Si positive, amont plus humide (Source: USGS, Eau France).

	Différence (amont-aval)			
	Verdeur		Humidité	
	30 juin 2015	7 déc. 2015	30-juin-15	7 déc. 2015
Moyenne	94,47	151,36	-49,33	-50,55
Écart-type	132,84	190,93	68,45	228,02

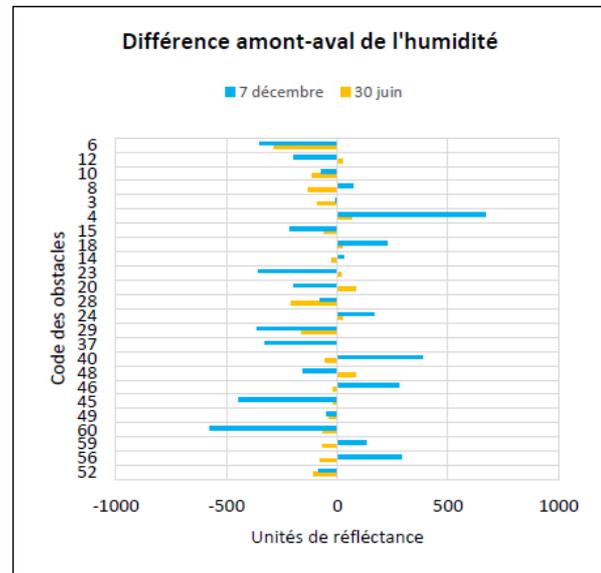
En été les contrastes sont moindres. Les plus grandes valeurs sont en aval, sauf dans des cas isolés (obstacles n° 48, 20 ou 15). Par ailleurs on peut établir un lien « discret » avec la hauteur de chute des barrages. Les plus grandes génèrent des contrastes amont aval plus grands. Mais cela n'apparaît qu'en hiver.

Figure 70 Différence amont-aval de la verdure pour les deux dates disponibles. Si négative, amont sec. Si positive, amont plus humide.



Source : USGS, Eau Fance.

Figure 71 : Différence amont-aval de l'humidité pour les deux dates disponibles. Si négative, amont sec. Si positive, amont plus humide.



Source : USGS, Eau Fance.

Il est probable que tous ces résultats soient influencés outre par les aménagements, par la microtopographie de la surface du sol et par la variété des matériaux qui remplissent le fond alluvial comme cela sera montré dans la deuxième partie de ce rapport.

Les vérifications sur le terrain ont montré que les anomalies (aval d'ouvrage plus humide que l'amont) correspondent toutes à des situations spécifiques : irrégularité de la surface du sol, cloisonnement du fond de la vallée, aménagement et blocage du lit majeur contre le versant... (Figure 72).

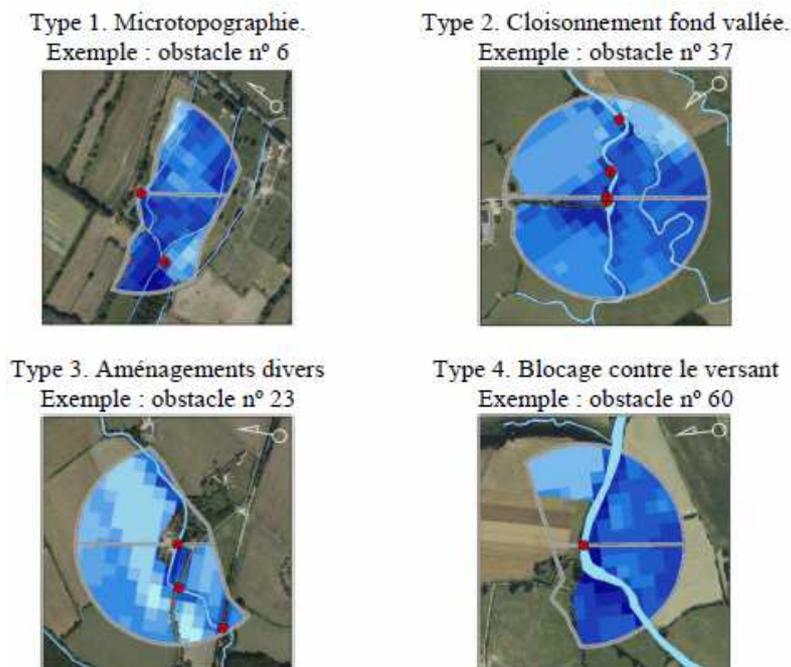


Figure 72 : Types d'anomalies : cas d'étude dont la plus élevée humidité est en aval.

Ainsi à partir de ces résultats, seules des tendances ont pu être mises en évidence par le traitement des données dont la qualité, en particulier la précision est insuffisante. Des traitements ultérieurs devront mobiliser d'autres données permettant de détecter les irrégularités de la topographie du lit majeur, naturelles (anciens lits par exemple) ou construites (passage de voies de communication, digue et rehaussement de berges...).

Conclusion sur les résultats issus du traitement de la végétation par les modèles :

Les facteurs de contrôle du milieu physique (altitude, pente et distance aux cours d'eau) ne déterminent pas la répartition des formations végétales. Ce sont les variables obtenues par télédétection qui font la différence.

L'humidité seule ne serait pas assez discriminante. Cependant on dispose de jeux de données à deux dates pour deux variables : humidité et verdure. Si la première n'est pas assez discriminante, la deuxième apporte parfois des nuances (indirectement liées à l'humidité).

Comme pour les facteurs de contrôle, la précision des modèles statistiques est assez faible. Ceci est le résultat de la faible résolution spatiale et temporelle des données considérées dans le calcul. Cependant, la tendance générale de la répartition spatiale des formations végétales se rapproche de la réalité.

Parmi les modèles calculés, c'est le modèle SVMR, celui qui montre les résultats les plus fiables soit en termes de pourcentage, soit en termes de répartition spatiale.

Nos traitements montrent cependant qu'il existe des différences entre l'amont et l'aval des barrages.

- Globalement, l'amont compte sur une plus grande surface de « autres formations hygrophiles ».
- L'activité chlorophyllienne y est toujours plus élevée.

Mais d'après les données exploitées, il ne semble pas y avoir un lien direct entre les obstacles et la répartition des zones humides compte tenu de la diversité des situations et de l'influence combinée des conditions naturelles et des aménagements.

L'interprétation de la classification des zones humides à travers le modèle SVM Radial à l'aide des sous-tronçons et des obstacles à l'écoulement (ROE et voies de communication) ne montre pas a priori un lien clair. Les analyses du paragraphe suivant montrent qu'on ne peut pas attribuer par défaut un impact des obstacles à l'écoulement sur la végétation des zones humides d'après la démarche appliquée.

4.3 Recherche de liaisons entre la caractéristique du couvert végétal et la morphologie du fond de vallée :

Les résultats issus de la modélisation ont été mis en regard des zones et tronçons de vallée afin de rechercher des liaisons entre la forme de la vallée et la présence de zones humides marquées identifiées par les formations végétales (Figure 73, Annexe I.15)

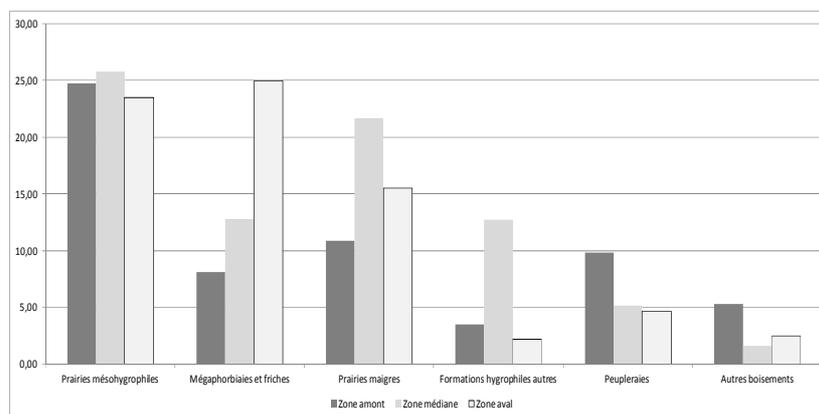


Figure 73 : Formations végétales, surface occupée en % de la surface du lit majeur

La Figure 73 montre un état général de la répartition des formations végétales :

- les formations ligneuses, peupleraies et autres boisements sont les plus étendues dans la partie supérieure de la vallée située dans le Perche caractérisé par une déprise agricole notoire.
- les formations prairiales, prairies mésohygrohiles et maigres occupent des superficies peu variées d'une zone à l'autre. Les prairies maigres occupent cependant plus de 20% du fond de vallée de la zone médiane là où il est le plus large. Cette formation végétale semble aussi exploiter les microtopographies du sol, légèrement en relief dans le lit majeur, qui n'ont pas pu être prises en considération dans notre étude.
- les formations plus caractéristiques de secteurs humides occupent des surfaces très variables. Les mégaphorbiaies et les friches sont les plus étendues dans la zone aval, située en partie dans l'aire périurbaine d'Alençon (terrains abandonnés par la mise en valeur agricole ?). Les autres formations hygrophiles occupent le plus d'espace dans la zone médiane. Le lit majeur plus large comprend là de nombreuses traces d'anciens lits de la Sarthe ainsi que les lits actuels des ruisseaux affluents. Ils sont inscrits en creux dans le fond et ce qui favorise les formations hygrophiles.

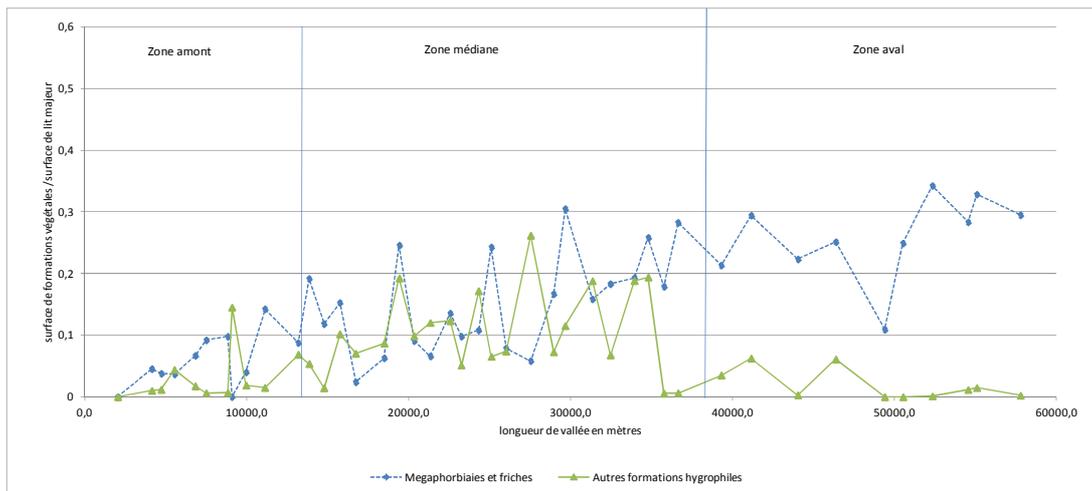


Figure 74 : Formations végétales hygrophiles par hectares de lit majeur

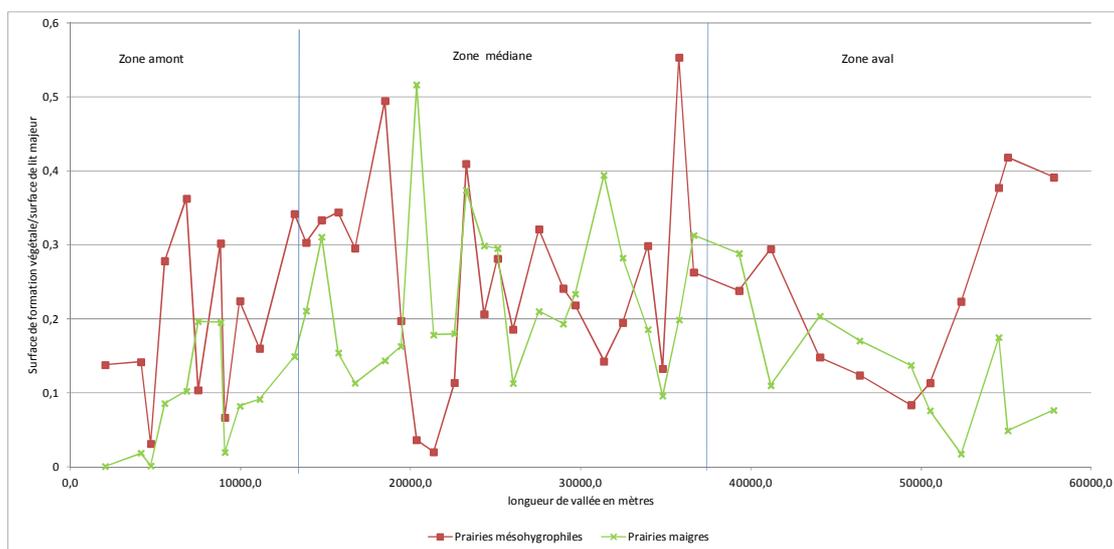
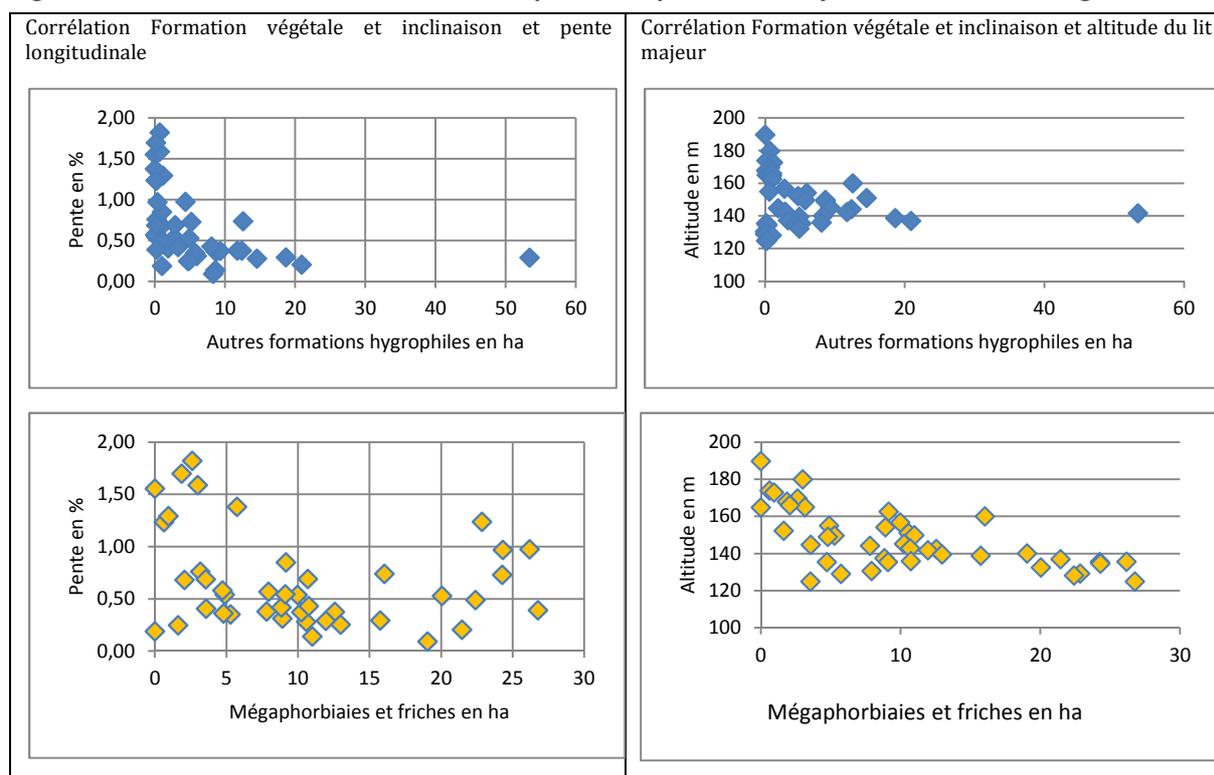


Figure 75 : Formations prairiales par hectares de lit majeur

La Figure 74 et la Figure 75 montrent la très grande hétérogénéité d'un sous tronçon à l'autre. On retrouve là les caractéristiques déjà mises en évidence par l'analyse de la végétation en amont et en aval des ouvrages hydrauliques.

Par ailleurs il n'a pas été possible d'établir des corrélations entre les caractéristiques morphométriques des tronçons et sous tronçons et la répartition des formations végétales comme le montre la Figure 76. On note cependant quelques tendances en accord avec la baisse de la pente et celle de l'altitude de l'amont vers l'aval. Mais les corrélations ne sont pas bonnes.

Figure 76 : Corrélation entre caractère morphométriques du lit majeur et formations végétales :



Conclusion :

L'étude des zones humides dévoile une problématique complexe due à l'incertitude des facteurs qui l'entourent. Elle montre que leur localisation est expliquée par de nombreux facteurs ce qui rend l'établissement d'un modèle prédictif difficile.

Ce travail était exploratoire et avait comme finalité de travailler avec les données disponibles en vue de déterminer des critères de localisation des zones humides et de proposer une typologie.

Il est apparu au cours de notre analyse, que la plupart de ces données sont peu adaptées à un travail à très grande échelle permettant de prendre en compte des espaces de très petites superficies, allant de quelques mètres carrés à quelques ares.

Conclusion de la première partie

Finalement, les apports de notre analyse sont plutôt modestes et posent plus de questions qu'ils n'apportent de réponses. Cependant ils éclairent la thématique des zones humides influencées par les obstacles à l'écoulement. Ils montrent également quels sont les facteurs qui expliquent les zones humides, quel est leur poids et comment ils se combinent. Ces facteurs se réfèrent aux conditions régionales, locales et ponctuelles.

1. Les conditions régionales

Ce sont celles qui règlent le fonctionnement des bassins versants et des cours d'eau dans tout l'ouest de la France :

- Les conditions morphométriques et géomorphologiques : elles favorisent une circulation lente de l'eau dans le fond de la vallée de la Sarthe très faiblement inclinée. De ce fait, ces conditions favorisent une imprégnation quasi-continue par l'eau, des sédiments, majoritairement de texture fine, qui en remplissent le fond. Ces conditions s'expriment dans toute leur plénitude dans la partie médiane de la vallée. Elles sont un peu différentes en amont et en aval où le fond est plus étroit.
- Les conditions hydrologiques et hydrogéologiques : les lits fluviaux réagissent aux conditions hydroclimatologiques régionales ; le climat océanique est à l'origine du régime pluvio évaporal de la Sarthe. Par ailleurs, crues et étiages ne sont excessifs qu'exceptionnellement. Mais ils réagissent aussi aux apports souterrains. Les lits de la Sarthe amont et les zones humides qu'ils contiennent, sont principalement alimentés par les eaux de surface. Les apports souterrains peu abondants du fait de la faible perméabilité du substratum ne semblent jouer qu'un rôle secondaire.
- Les conditions économiques régionales : elles appartiennent à deux familles :
 - les plus anciennes ont conduit à la mobilisation de l'énergie hydraulique grâce aux barrages et moulins. Les barrages sont les principaux obstacles à l'écoulement de l'eau ;
 - Les récentes permettent des activités différentes entre l'amont du bassin qui comprend un milieu rural majoritairement agricole et l'aval influencé par la ville d'Alençon ce qui a créé une zone périurbaine où le milieu rural comprend d'autres activités que l'agriculture (extension de l'habitat, développement des fonctions tertiaires...)

Ces conditions qui influencent les usages du sol agissent sur la nature des actions anthropiques associées, drainage des terres, rectification du tracé de la Sarthe et de ses affluents, curage des lits et régalinge des berges...modification de l'occupation du sol

Ces actions agissent profondément sur le transfert de l'eau dans le fond de vallée, tant en surface que sous la surface.

2. Les facteurs locaux :

Les conditions naturelles présentent à l'intérieur du bassin versant de la Sarthe des variantes qui expliquent les différentes formes de la vallée, du tracé et de l'alimentation en eau de la Sarthe :

- Variation de la largeur de la vallée liée à l'affleurement dans toute sa partie médiane d'un substratum faiblement résistant propice au façonnement d'une véritable cuvette.
- Alimentation du réseau hydrographique majoritairement assurée par les précipitations. Mais à cette échelle locale, quelques venues d'eau souterraines sont à prendre en considération. Elles sont repérées au contact de minces niveaux de marnes et de grès ou de craie. A l'aval de Sainte Scolasse sur Sarthe et à l'aval de Mêle sur Sarthe ces apports souterrains contribuent à alimenter en surface un réseau de drains plus dense qu'ailleurs (Dd proche ou supérieure à 3 dans les sous tronçons 302, 303, 304, 702, 703, 704, 705). Elles participent ainsi à l'imprégnation en eau des alluvions du lit majeur. A l'aval d'Alençon, où le substratum encaissant est imperméable et le fond de vallée étroit, les échanges d'eau s'effectuent entre la nappe alluviale, les zones humides et la Sarthe.

3. Les spécificités ponctuelles :

Il s'agit principalement des microformes topographiques, en lien avec d'anciens lits de la Sarthe ou encore avec des aménagements anciens dont les plus importants sont les obstacles qui modifient l'écoulement de l'eau en surface et sous la surface. Mais comme cela a été montré, ils n'agissent que discrètement sur les zones humides. Mais il a été possible de montrer que l'amont des ouvrages présente une plus grande humidité que l'aval et que les contrastes sont plus marqués en été qu'en hiver.

4. Les critères pour la définition de types de zones humides :

Un des objectifs de cette étude était de définir des types de zones humides selon les facteurs qui les déterminent et leur combinaison. Nos résultats indiquent que compte tenu des données utilisées, ces types ne peuvent pas être définis du moins en prenant en compte les niveaux scalaires les plus grands.

Dans le fond de la vallée de la Sarthe, les zones humides, compte tenu de la lente circulation de l'eau, sont finalement présentes partout comme l'avait déjà montré l'étude du SAGE (2010) ce qui a déterminé la délimitation de ZNIEFs. Mais malgré tout, la répartition des formations végétales montre que cette humidité est plus ou moins grande selon les endroits. Si les conditions naturelles y contribuent, leurs incidences sont brouillées par les aménagements.

Ainsi à défaut de proposer des types, peut-on retenir les grandes tendances qui influencent les zones humides : on note que les formations végétales les plus caractéristiques de l'hydromorphie des sols sont les mégaphorbiaies auxquelles nous avons associé les friches ainsi que les autres formations hygrophiles, cariçaies, roselières, tourbières.... Elles occupent 71ha dans la zone amont de la vallée, 411ha dans la zone médiane et 200ha dans la zone aval. Par rapport à la superficie du fond de vallée, cela représente respectivement 11%, 25% et 27%. Malgré les différences qui ont été soulignées, en pourcentage l'écart est faible entre la zone médiane et la zone aval. Ainsi semble-t-il exister au moins deux familles de zones humides dans le fond de la vallée :

- celles des secteurs larges du lit majeur (étalement de l'eau et des sédiments, pente faible, imprégnation des sédiments par les eaux de surface et les venues souterraines...);
- celles des secteurs étroits en aval des secteurs élargis (moindre étalement de l'eau et des sédiments, substratum imperméable, échange entre l'eau de la nappe alluviale et celle des chenaux superficiels).

La production scientifique sur la problématique de cette étude est peu abondante. La plupart des travaux sont réalisées par télédétection, mais les dimensions des zones humides diffèrent. Il s'agit de zones humides plus larges et souvent situées dans le milieu littoral. D'un autre côté, les effets anthropiques dans les vallées de plaine et plateaux ont été également peu explorés.

Par rapport à nos résultats, on note ainsi que les zones humides doivent leur présence aux conditions diverses que nous venons d'évoquer. Mais elles sont aussi influencées par la modification des conditions du milieu d'un endroit à l'autre (amont et aval de barrage, variation dans la largeur de la vallée...) ainsi que d'une période et d'un moment à l'autre (changement des

conditions économiques, variation des conditions hydroclimatologiques entre la saison hivernale et la saison estivale).

Elles répondent ainsi à un subtil dispositif, organisé dans l'espace et au cours du temps.

Les sites de mesures étudiés dans le cadre de cette étude CEZURES sont localisés respectivement dans le secteur élargi de la vallée et dans le secteur étroit de cette vallée. Ils mettront ainsi en évidence des fonctionnements de zones humides très différents.

DEUXIEME PARTIE : Analyse à l'échelle des sites d'étude

Les mesures effectuées dans les deux sites, Moulin de Hauterive et Moulin du Désert ont pour objectifs de comprendre le système Sarthe/lit majeur/zone humide/seuil dont les composants sont inter-reliés. Il s'agit de déterminer ses caractéristiques et d'identifier les modalités de leurs liaisons qui expliquent le fonctionnement du système et sa dynamique.

Ces composants sont :

- Les caractéristiques géomorphologiques
- Les variations des niveaux d'eau (nappe et rivière)
- Les différentes réactions du milieu à cette dynamique.

L'analyse est faite à partir :

- **des relevés de terrain** ayant permis de cartographier les formes du lit majeur (microtopographies relevées par Lidar terrestre en cours d'exploitation) et leurs spécificités géomorphologiques d'une part (relevés de terrain et interprétation de documents divers) et les caractéristiques phytoécologiques d'autre part (relevés de terrain) ;
- **des mesures de terrain** concernant les niveaux d'eau les conditions climatologiques, la conductivité hydraulique, l'humidité du sol et la chimie de l'eau.

Elle est organisée en 4 étapes :

1. détermination des conditions des mesures qui influencent les résultats (types de mesures et matériel utilisé, période de mesures et morphologie des sites et matériaux du remplissage alluvial)
2. étude de la variation des niveaux d'eau au cours de l'ensemble de la période de mesures
3. analyse du rôle des barrages sur le toit de la nappe, transversalement et longitudinalement par rapport à la Sarthe.
4. prise en compte de la végétation considérée comme indicateur principal du fonctionnement hydrique de zones humides.

1 Détermination des conditions de mesures

Les zones humides s'égrènent tout au long de la vallée de la Sarthe comme cela a été montré dans la première partie. Les sites que nous avons retenus pour ce projet CEZURES, Hauterive et Désert sont à coté de barrages et d'accès facile (proximité de route et autorisation des propriétaires d'utiliser leur parcelle pour la mise en place et le suivi de nos installations de mesures). Les hauteurs des déversoirs sont 1.30m à Hauterive et 0.8m au moulin du Désert.

- A Hauterive, toutes les installations de mesures sont en rive gauche de la rivière dans un espace délimité par la Sarthe et le bras de décharge du canal. Dans le fond alluvial, les sédiments fins prédominent.
- Au Moulin du désert, les installations sont situées de part et d'autre de la rivière dans un espace délimité par les versants de la vallée. Les matériaux du remplissage alluvial sont injectés de colluvions. La configuration des sédiments suggère des conditions de dépôt forcé contre le versant de rive gauche qui domine directement la Sarthe et contre lequel la rivière vient buter avant de changer de direction.

La localisation des points de mesures apparaît sur les figures 7 et 8 de la première partie de ce rapport et dans les annexe II.1. et II.3.

1.1 Caractéristiques géomorphologiques des sites de mesures

Les données utilisées proviennent :

- des relevés de terrain ayant permis de cartographier les parties de vallée contenant les sites de mesures (relevés fait en janvier février et en juillet 2014),
- de relevés Lidar héliportée (survol en 7 février 2015) : le traitement des données effectué par la société VINCI Construction Terrassement a permis de produire des images géoréférencées ainsi qu'un MNT. La précision est suffisante pour représenter la variation des altitudes dans les deux sites à très grande échelle (tracé des isohypses équidistantes de 10 cm).
- d'analyses de sédiments prélevés lors de l'installation des piézomètres (prélèvements et analyses ont été effectués par le laboratoire GEOPHEN)
- de mesures sur le terrain de la conductivité hydraulique et de l'humidité du sol.

Les deux sites de mesures sont localisés dans la moitié inférieure de la vallée et appartiennent aux tronçons 9 (qui comprend 4 sous tronçons) et 14 du découpage précédent (Figure 77). Le fond de vallée est entièrement occupé par des zones humides.

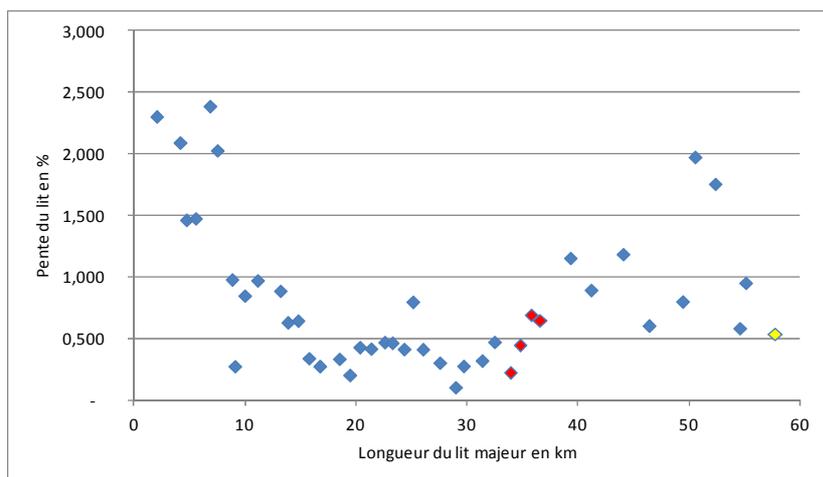


Figure 77 : Caractéristiques morphométriques des sous-tronçons (tronçon 9, Hauterive points rouges, tronçon 14, Desert point jaune)

1.1.1 Le site de Hauterive

Le site de Hauterive se trouve juste en amont du resserrement de la vallée à l'Est d'Alençon marqué par une légère augmentation de la pente longitudinale du lit majeur (Erreur ! Source du renvoi introuvable. et Figure 79). Le lit majeur est large de près de 300m.

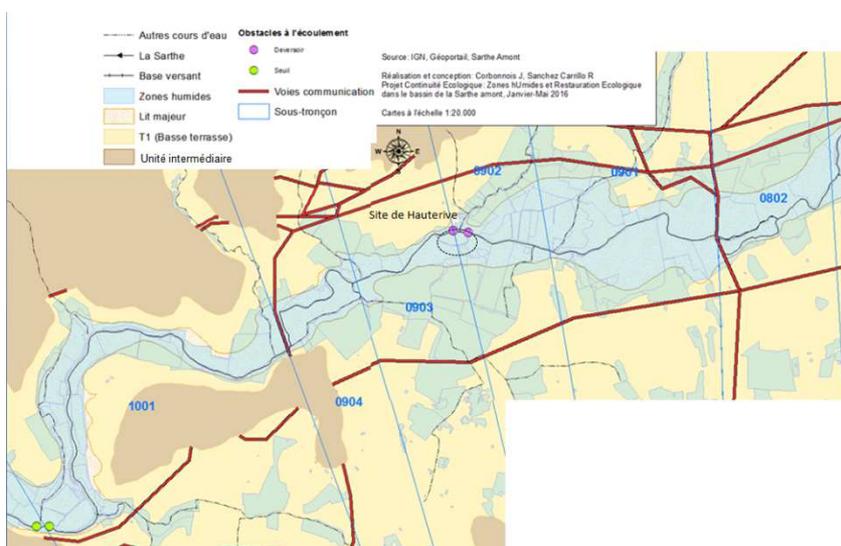


Figure 78 : Le fond de la vallée de la Sarthe aux abords du site de Hauterive

Il est dominé de part et d'autre par la basse terrasse au-delà de laquelle une unité intermédiaire (colluviale et alluviale) très étendue mène jusqu'à la base des versants de la vallée. L'ensemble de ces morphologies est inscrit dans le substratum encaissant constitué par les matériaux à dominante argileuse du Callovien. Faiblement résistants, ils ont permis que la Sarthe y dégage une vallée large.

A plus grande échelle, le Callovien comprend de minces bancs calcaro-marneux (quelques mètres d'épaisseur) qui sont assez résistants pour armer des replats portant la basse terrasse ou de courtes ruptures de pentes, transversales et longitudinales au lit de la Sarthe. Ils constituent des

sites favorables pour l'implantation d'habitations (hameau du moulin, Château de Bias, Château des Loges) ou de barrages ; celui de Hauterive a dû être construit sur un haut fond armé par un banc de roche résistante qui affleure d'ailleurs en rive droite juste en aval du barrage sur 4m de hauteur et contre lequel la rivière vient buter (Figure 79)

Le lit majeur est rempli sur quelques mètres d'épaisseur des alluvions limono-sablo-graveleuses mises en place récemment par la rivière. Il est parcouru par le lit sinueux de la Sarthe dont le tracé actuel est quasi stable (érosion fluviale peu développée, Figure 79). Mais il subsiste les marques d'anciens chenaux indiquant une mobilité latérale antérieure. Leur bonne conservation à proximité du barrage suggère une modification du tracé réalisée au moment de la mise en place de l'ouvrage. L'actuel bras de décharge du moulin de Hauterive emprunte une partie de l'ancien lit.

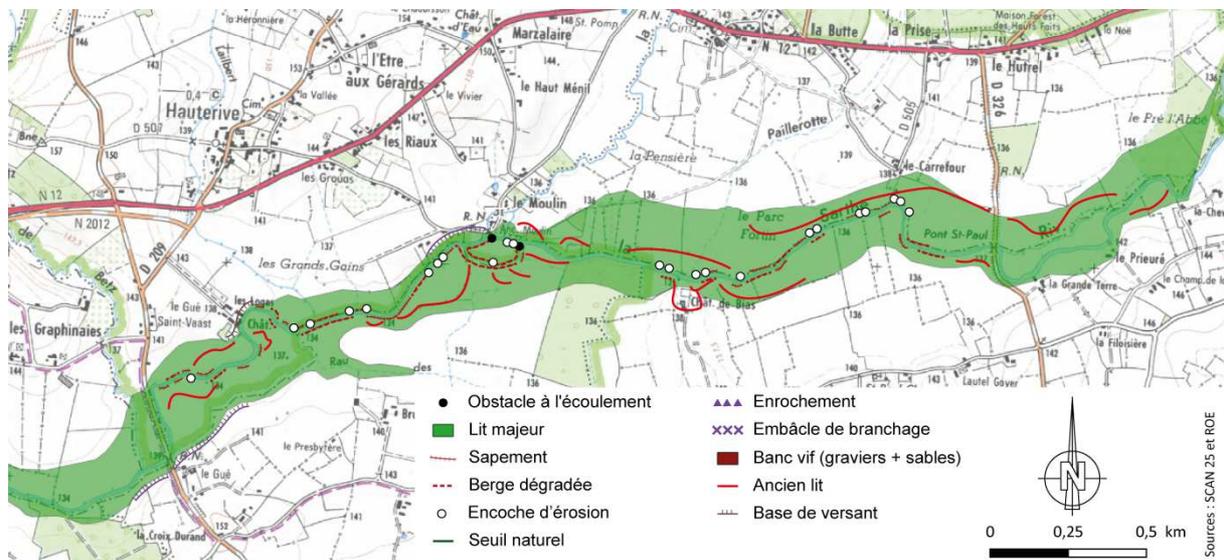


Figure 79 : Lit mineur et lit majeur aux abords du site de Hauterive

Ainsi en plus des bourrelets de réglage qui surélèvent les berges (petites digues discontinues) le lit majeur est bien irrégulier dans le détail comme le montre l'image LIDAR (Figure 80). Les micro-reliefs hauts de 10 à 30cm agissent sur les chemins de l'eau de ruissellement à la surface du sol (écoulement rapide dans les anciens chenaux, stagnation de l'eau dans les creux fermés).



Figure 80 : Image aérienne et courbes de niveaux issues du levé Lidar du site de Hauterive

D'autres irrégularités agissent sur les chemins souterrains de l'eau à travers les sédiments encaissant du lit. L'eau souterraine transite préférentiellement par les alluvions du lit majeur qui surmontent les couches géologiques quasi imperméables du substratum. On ne connaît pas le rôle des bancs résistants calcaro-marneux du Callovien sur l'eau souterraine.

Aux abords immédiats du site de Hauterive, les matériaux du remplissage alluvial ont été décrits et analysés à partir des carottes de sédiments prélevées lors de l'installation des piézomètres (localisation et description des carottes, Annexes II.1 et II.2). La Figure 81 renseigne sur la granulométrie et la Figure 82 donne les textures par grandes classes.

Généralement, on trouve sous la surface et jusqu'à 1 à 2 m de profondeur des sédiments fins, limono-argileux, bruns à figures d'hydromorphie peu affirmées (Composition LAS : 40% limons, 35% argiles, 25% sables, Tableau 25) et en dessous, des niveaux sableux et/ou graveleux irréguliers (lentilles épaisses de 15 à 20 cm). Ces matériaux se sont mis en place à la toute fin du Quaternaire au moment de l'instauration des conditions climatiques actuelles selon le scénario suivant (hypothèse) :

- construction du fond par des dépôts de sables et de graviers mis en place par la Sarthe, observés à la base des carottes (la Sarthe pouvait avoir un ou plusieurs chenaux).
- apport ultérieur de graviers dans les chenaux les plus actifs (HP7, 5, 3), abandon progressif des autres où se mettent en place des sables puis des limons et limons sableux
- apports anthropiques en particulier à proximité de la Sarthe (régalage des berges par les matériaux extraits du lit lors de curages, coquilles et débris de coquilles) ou bien maintien de creux et décantation de fines apportées par les eaux de débordement de la Sarthe (cas de HP 8, 4).

Mais quelques sondages ont des profils particuliers :

- HP1 : ni sables ni graviers ; il peut s'agir de sédiments apportés
- HP 12 et 13 : sondages hors influence des barrages et de la Sarthe. Matériaux sableux à limono-sableux, très hydromorphes

Tableau 25 : Épaisseur des matériaux fins de surface dans les sondages de Hauterive

Épaisseur de matériaux fins	Piézomètres
1.5 - 2m	HP6, HP2 et HP1
1- 1.5m	HP 4, 8, 9, 10, 12, 13
<1m	HP 2, 3, 5, 7

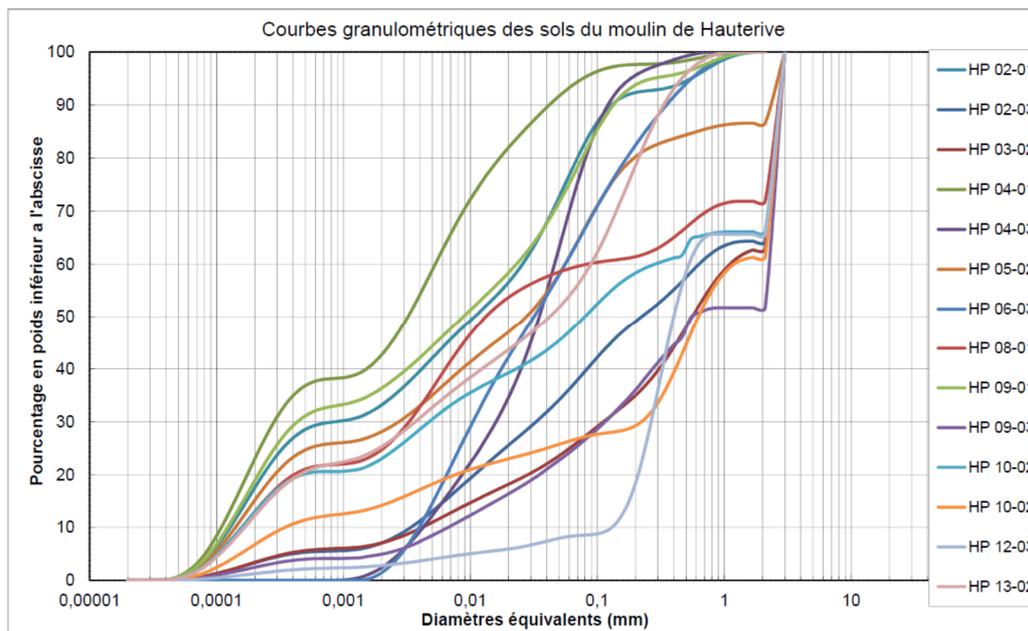


Figure 81 : Courbes granulométriques des échantillons de Hauterive

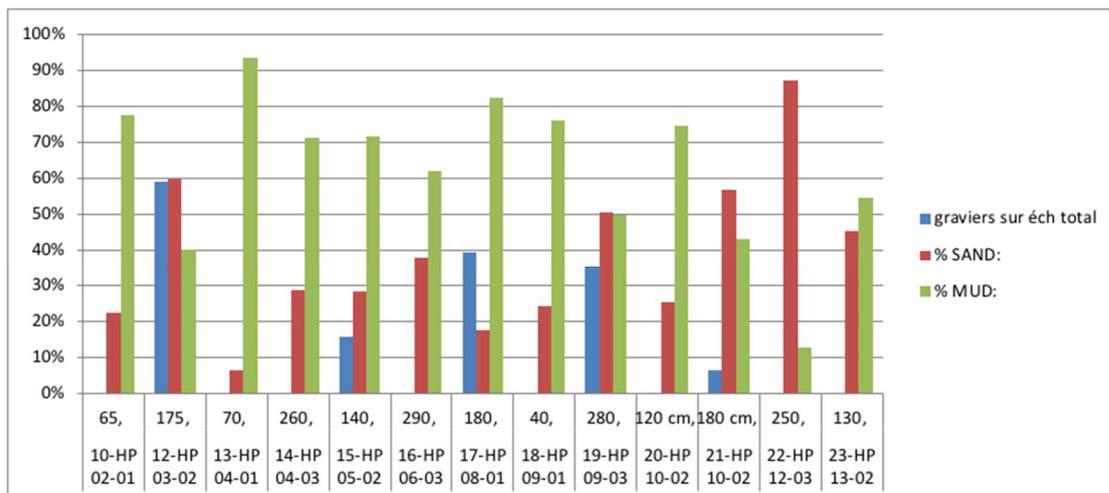


Figure 82 : Texture des alluvions de Hauterive

On retiendra ainsi que les caractéristiques géomorphologiques du site de Hauterive sont celles d'un milieu à travers lequel l'eau circule difficilement :

- en surface, la microtopographie présente de petites formes mal raccordées les unes aux autres ce qui handicape le ruissellement et favorise le piégeage de l'eau dans les creux de la topographie.
- sous la surface, les matériaux fins rendent les échanges horizontaux difficiles. Les niveaux graveleux ou sableux sont discontinus et compartimentent l'aquifère alluvial.

Ces conditions sont propices à un engorgement quasi permanent des sédiments par l'eau livrée par les précipitations ou par la Sarthe et qui alimente la nappe alluviale.

1.1.2 Le site de Moulin du Désert :

A l'entrée des gorges de Saint Ceneri, la vallée de la Sarthe a une forme irrégulière, petits bassins évasés raccordés par des secteurs étroits, selon les configurations du substratum géologique encaissant, granite, granodiorite et recouvrement de minces restes de couches sédimentaires (Lias et Bajocien) parcourus par des failles (Tronçon 14). Vers l'aval, le site de Moulin du Désert occupe un secteur étroit de la vallée dominé en rive droite d'abord puis en rive gauche par des versants raides hauts de 5 à 15m façonnés dans les granodiorites du massif armoricain qui fournissent un soubassement résistant au barrage construit sur une rupture naturelle de la pente du lit dans un coude du tracé. Le fond de vallée comprend plusieurs terrasses alluviales. Le lit majeur a une largeur moyenne de 300m et ne dépasse pas 100 m à l'aval. Le tracé comprend des parties rectilignes raccordées par des boucles isolées. Mais la pente longitudinale marquée (lit majeur incliné à 0.5%) détermine une activité morphogène notable (Figure 83 et Figure 84).

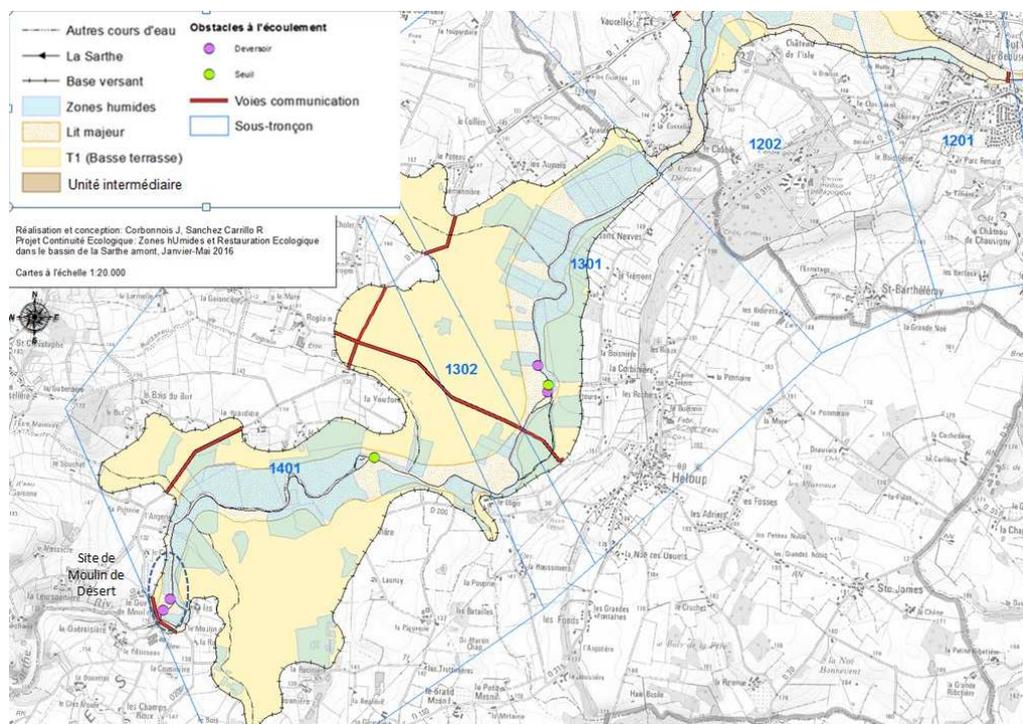


Figure 83 : Le fond de la vallée de la Sarthe aux abords du site de Hauterive

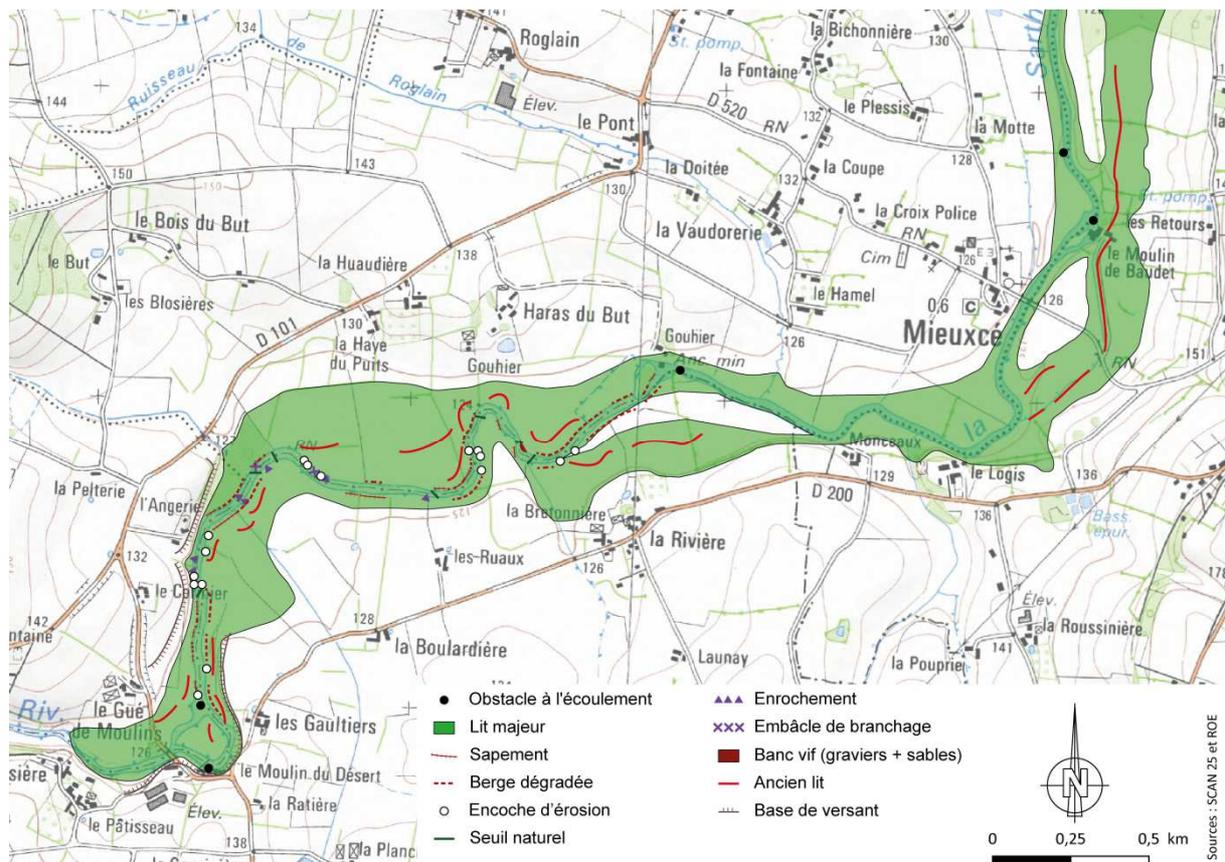


Figure 84 : Lit mineur et lit majeur aux abords du site de Hauterive

L'image issue du levé Lidar du site (Figure 85) représente un lit majeur très étroit, irrégulier dans le détail. Longitudinalement on repère de part et d'autre de la Sarthe, un petit niveau de très basse terrasse à moins d'un mètre au-dessus du lit majeur actuel, un ancien lit encore bien visible en rive gauche (il est parallèle à la Sarthe, juste en arrière de la berge) et un autre en rive droite (Figure 84). Par ailleurs, le lit majeur est incisé à trois endroits par des canaux de drainage perpendiculaires au lit mineur, qui évacuent l'eau du versant et du fond de vallée.



Figure 85 : Image aérienne et courbes de niveau issues du levé Lidar du site du Moulin du Désert

Ce lit est rempli de sédiments récents plus hétérogènes et grossiers qu'à Hauterive (Localisation et description des carottes, Annexes II.3 et II.4). Les fractions sableuses et graveleuses y sont plus abondantes (Figure 86 et Figure 87). Les alluvions transportées par la Sarthe sont mélangées à des colluvions issues des versants très proches et peut être également à des apports anthropiques.

Comme à Hauterive, les sédiments ont été mis en place en plusieurs étapes (hypothèse) :

- remblaiement grossier qui remplit le fond et dont on trouve des graviers au-dessus du lit majeur actuel, en DP 14, DP 4 et probablement aussi en DP6 (altitude des graviers à 121.8 / 122 m) ;
- incision par un cours d'eau sinueux ou à plusieurs bras, des graviers qui sont partiellement déblayés ;
- construction du lit majeur, emboîté dans les graviers précédents (qu'on retrouve à 121.3 m), par des dépôts de nature variée :
 - dans un chenal principal, mise en place de sédiments plutôt grossiers, graviers et sables (DP3, DP2 et DP11) surmontés de colluvions injectés en DP2 et DP3 de graviers (passées vers 1m de profondeur) + DP7 et DP8 comprenant des sables verts également décrit en DP3 ;
 - latéralement, peut-être dans des chenaux secondaires en voie d'abandon :
 - formation de tourbe décrite en rive gauche dans les carottes DP10, 12, 16, 9 (arrêt du sondage 9 à 2m) et en rive droite, en DP5 (pas de tourbe mais argiles très sombres).
 - au-dessus mise en place des colluvions (LA à granules et petits graviers dispersés) puis de LA à débris de charbon (phase de défrichage ou travaux ayant pu accompagner la rectification du tracé de la Sarthe au moment de la construction du barrage).

Trois sondages sont hors schéma : DP1 où les matériaux sont fins sur toute la profondeur (dépôt en zone de décantation ? ou influence anthropique ?), DP13 et DP15 où les matériaux sont des colluvions fines à graviers déposés sur du sable (arène granitique) (Figure 86 et Figure 87).

Tableau 26 : Regroupement des carottes selon la perméabilité (critère : épaisseur sous la surface du sol des matériaux fins)

Épaisseur de matériaux fins	Piézomètres
>2m	DP1 et DP 17
1.5 - 2 m	DP4, DP6, DP7, DP15 et DP5
1 - 1.5 m	DP 2, DP7, DP9, DP10, DP11, DP12, DP13, DP14 et DP16
<1 m	DP3 et DP 8

Dans ce site du Moulin du Désert, les conditions géomorphologiques sont favorables à la circulation plus rapide de l'eau tant en surface que sous la surface : pente notable, matériaux grossiers. Mais la fermeture de la vallée au droit du barrage crée une cuvette qui ralentit l'évacuation de l'eau et contribue à l'imprégnation des matériaux.

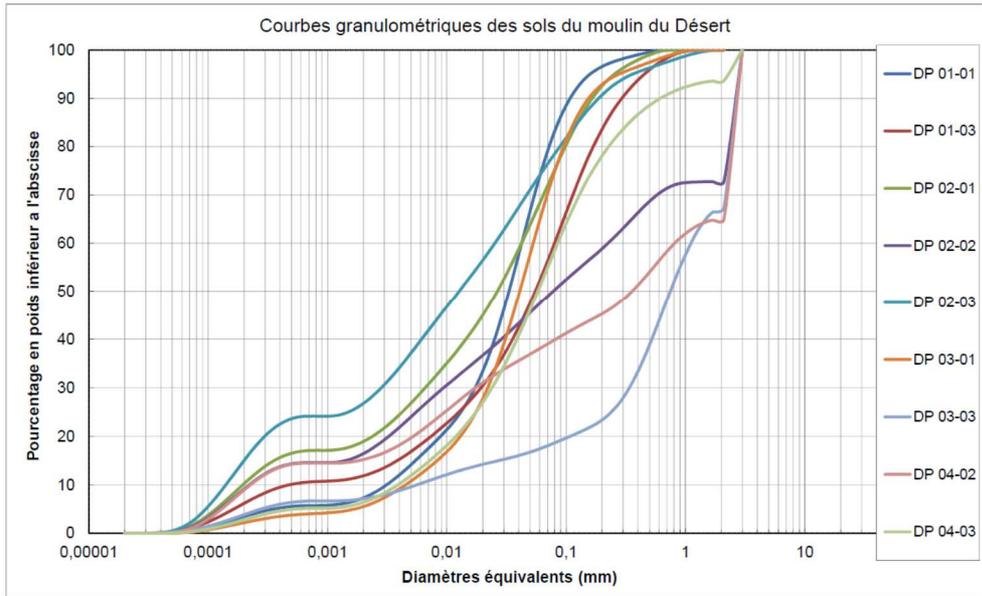


Figure 86 : granulométrie des échantillons de Moulin du Désert

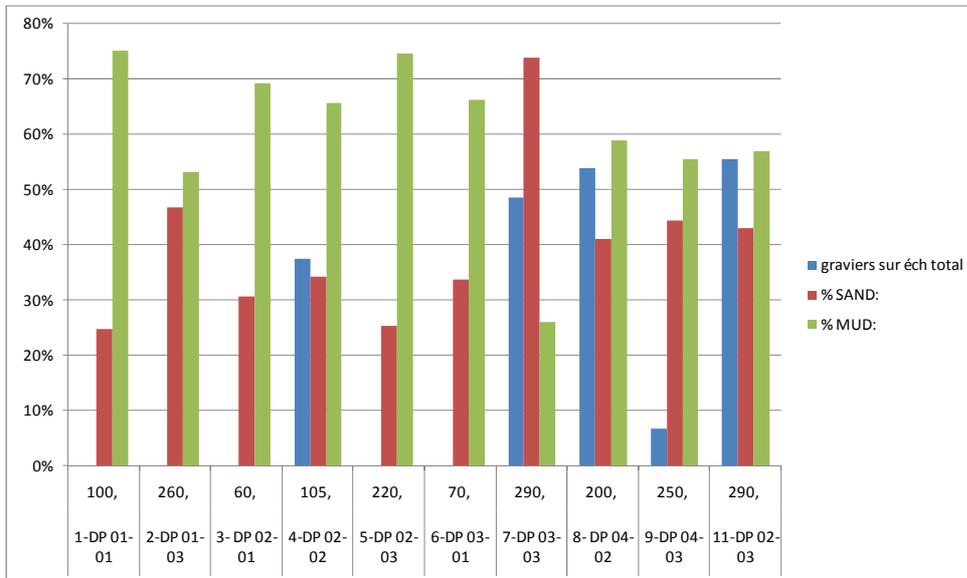


Figure 87 : Texture des matériaux de Moulin du Désert

Les conditions géomorphologiques (microtopographies en lit majeur et caractéristiques des sédiments) (Figure 88) agissent sur le cheminement de l'eau et interviennent ainsi sur les variations des niveaux souterrains et superficiels de l'eau. Elles expliquent des comportements hydriques variés.

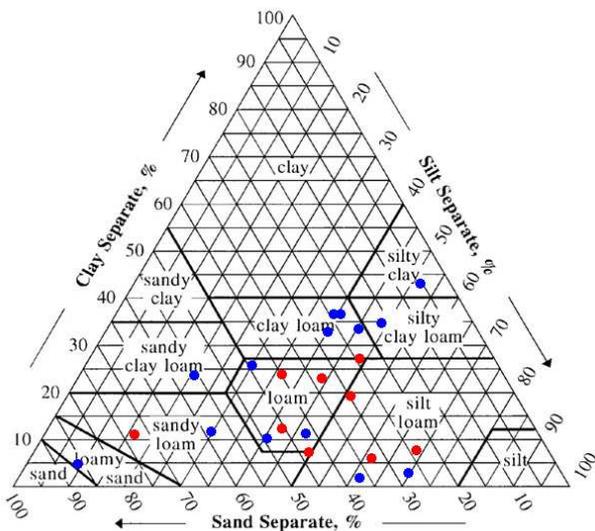


Figure 88 : Texture des échantillons des sols des sites sur le triangle de texture de USDA (United States Department of Agriculture) : moulin du Désert (points rouges) et moulin de Hauterive (points bleus) (pourcentages des proportions Argile (< 0,002 mm), Limon (0,05 - 0,002 mm) et sable (> 0,05 mm) dans la partie fine des échantillons des deux sites tracés sur le triangle de texture de USDA).

1.2 Comportement hydrique des matériaux du fond alluvial

Il est évalué par des mesures de conductivité hydraulique, de variation des taux d'humidité du sol et des caractéristiques physicochimiques de l'eau. Le choix du matériel et de la méthode de mesure sont détaillés dans l'annexe II.5.

1.2.1 La conductivité hydraulique

Les phénomènes de transfert de l'eau dans les sols impliquent toujours la perméabilité qui traduit la facilité ou la difficulté qu'à l'eau de traverser un massif de sol. Les géologues et hydrologues ont appelé ce paramètre K, coefficient de perméabilité. Mais le terme de conductivité hydraulique a été préféré en raison du fait que de nombreux autres phénomènes de conduction sont décrits par une équation de la forme de celle de Darcy et parce que le coefficient de proportionnalité dans ces équations de transfert est appelé couramment conductivité. Le terme de conductivité hydraulique s'est donc assez rapidement imposé.

La connaissance des transferts d'eau, dans la zone non saturée, au-dessus du niveau de la nappe, permettent d'apporter des solutions aux problèmes liés à l'infiltration de la pluie dans le sol et l'eau qui se rédirige directement vers la nappe par la surface. Ces transferts suivent des cadres réglementaires dont le paramètre essentiel est la conductivité hydraulique. Ce paramètre hydrodynamique est déterminé au champ par diverses techniques d'infiltration utilisant un trou de tarière ou un forage qui permet d'atteindre le niveau de mesure dans la couche dont on veut connaître les caractéristiques hydrauliques.

Ces techniques de mesure qui correspondent à l'infiltration d'eau dans un volume de sol réduit, saturé de façon incomplète, entouré de sol non saturé à teneur en eau variable, sont utilisées pour déterminer la conductivité hydraulique in situ. Il existe une large gamme de méthodes qui diffèrent à divers degrés, selon : la manière de les mettre en œuvre, les matériels utilisés, et la façon de les traiter mathématiquement. Les deux méthodes principales utilisées dans cette thèse

sont la méthode de Porchet et la méthode de Guelph. Dans ce projet on a utilisé la méthode Guelph (Annexe II.5.).

La mesure de la conductivité hydraulique de chaque site a été réalisé dans des trous du 15-20 cm de profondeur. A Hauterive, 4 essais ont été effectués (Figure 89) et au Désert 3 essais (Figure 90).

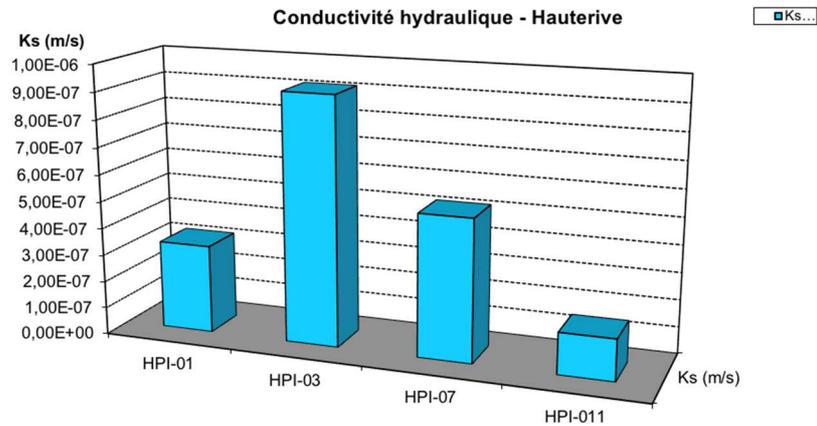


Figure 89 : Résultats de la conductivité hydraulique au Moulin de Hauterive

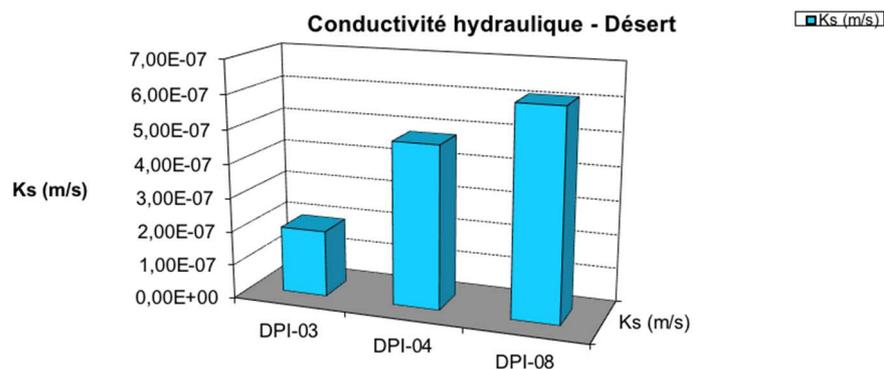


Figure 90 : Résultats de la conductivité hydraulique au Moulin du Désert

La moyenne de la conductivité hydraulique au moulin de Hauterive est égale à $4,5 \times 10^{-7}$ m/s et les valeurs varient entre 1 et 9×10^{-7} m/s. Au moulin du Désert la moyenne pour les KS mesurées est égale à 4×10^{-7} m/s. Ces Ks sont très faibles au point de vue hydrogéologique. Ce qui favorise une stagnation de l'eau à la surface du sol dans les cas des pluies intenses.

Cette conductivité hydraulique est bien corrélée avec la texture des échantillons du sol des carottes récupérés dans les deux sites. Partout les 50 premiers centimètres des carottes, comprennent des teneurs élevées d'argile qui réduisent la conductivité hydraulique du sol. Cette conductivité hydraulique faible pourrait prouver l'hypothèse de l'alimentation de la nappe par une nappe plus profonde sous la couche alluviale car avec un Ks de l'ordre de grandeur de 10^{-7} la réaction rapide des piézomètres après chaque pluie ne peut pas se produire par l'infiltration directe et rapide par la surface.

1.2.2 L'humidité du sol

Pour mesurer la teneur en eau en place et sa variation temporelle et spatiale à différentes profondeurs le long d'un profil vertical, on a utilisé 1 appareil FDR (Frequency Domain Reflectometry) de la société Sols Mesures, du type PR2. Cette sonde est peu sensible à la salinité et à la température de l'eau. On peut l'utiliser dans tous les sols, argiles et sols salins compris. Elle est étanche et robuste. Chaque sonde est équipée de 6 capteurs, répartis sur 100 cm de profondeur. Le PR2/6 mesure la teneur en eau sous la surface du sol le long de la canne aux positions 10, 20, 30, 40, 60 et 100 cm.

Les conditions et le matériel de mesures sont présentés dans l'annexe II.5.

Les deux sites ont été équipés par des cannes en verre afin de mesurer la teneur en eau volumique du sol sur une profondeur d'un mètre. L'objectif est de caractériser le fonctionnement hydrologique de la zone non saturée sous l'influence des précipitations, de l'évapotranspiration et du niveau de nappe qui varient très rapidement dans le temps. Les cannes en verre ont été mises en place à la profondeur d'un mètre.

Les résultats de mesure de la teneur en eau pour un moment donné ont été présentés dans la

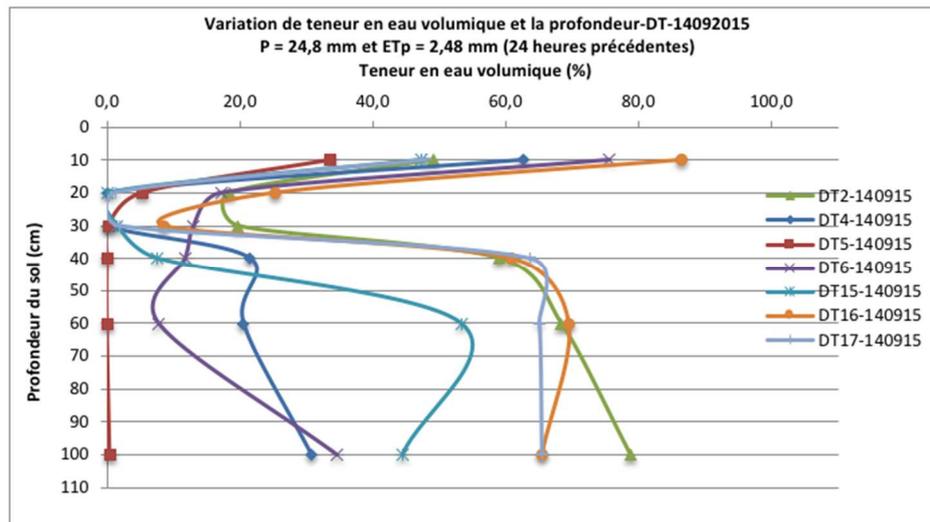


Figure 91

Figure 92. Pour mieux comprendre l'état du sol dans une zone humide, on a présenté sur la Figure 93, les mêmes mesures faites dans un sol témoin (espaces verts de la cour de l'École Supérieure des Géomètres et Topographes au Mans).

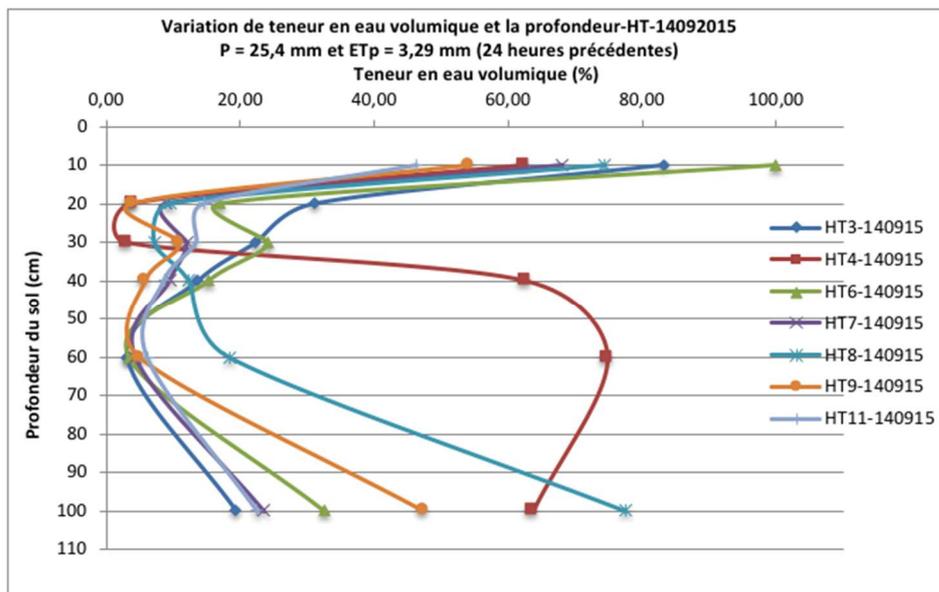


Figure 91 : Variation de la teneur en eau du sol sur un mètre de profondeur sur 6 points (10, 20, 30, 40, 60 et 100 cm) – Hauterive

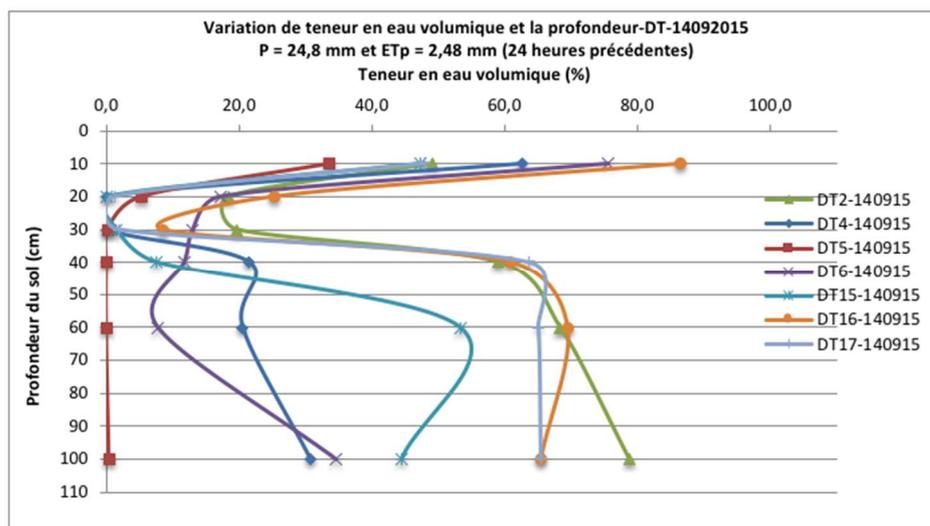


Figure 92 : Variation de la teneur en eau du sol sur un mètre de profondeur sur 6 points (10, 20, 30, 40, 60 et 100 cm) – Désert

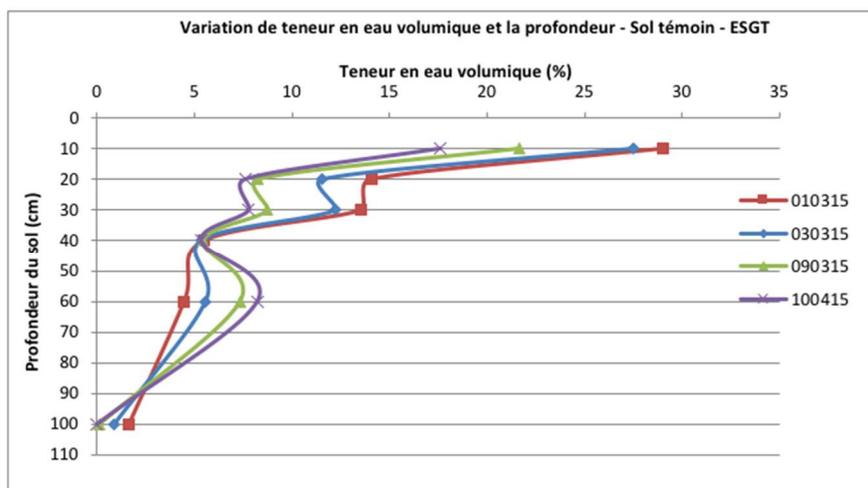


Figure 93 : Variation de la teneur en eau du sol sur un mètre de profondeur sur 6 points (10, 20, 30, 40, 60 et 100 cm) – Sol témoin – espace vert de l'ESGT

Pour les deux sites, la teneur en eau diminue rapidement de la surface jusqu'à 20 cm de profondeur. Ensuite la teneur en eau augmente progressivement jusqu'au 100 cm où le sol se sature par la nappe ou bien la frange capillaire. En revanche on voit bien que pour le sol témoin, (hors de la zone humide), la teneur en eau diminue toujours vers la profondeur et elle arrive à sa valeur la moins faible au 100 cm.

1.2.3 La chimie de l'eau

Les analyses ont été faites par le laboratoire départemental d'Alençon. Deux campagnes de prélèvements ont été effectuées en juillet et en novembre 2015. Les données ont été traitées dans la première partie de ce rapport et les commentaires des résultants sont en annexe II.5. Ainsi ne sont rappelés ici que les éléments principaux :

La qualité de l'eau souterraine dans les deux sites est comparée à celle de l'eau de référence représentative du bassin versant (1ère partie). Les différences sont notables même si dans les deux sites l'eau est très calco-carbonatées.

- Au Désert (Figure 25, 1ère partie), les eaux électriquement équilibrées, ont des profils de concentrations très hétérogènes. L'hétérogénéité y est supérieure à celle qui caractérise les eaux de l'ensemble du bassin versant.
- A Hauterive (Figure 26, 1ère partie), les concentrations sont plus homogènes avec une exception pour l'eau prélevée dans le piézomètre HP4 qui présente un pic de sodium, (apport de l'eau de la Vézone dont les caractéristiques ne sont pas connues ?). Les eaux sont électriquement équilibrées, sauf HP3 qui comporte un excès de cations qui peut être dû à un déficit de phosphate ou aux hydrogénocarbonates qui peuvent dégager du CO₂ après les prélèvements d'eau.

Sur les deux sites, les concentrations en nitrates sont inférieures à 10 mg/L, ce qui est faible.

Le couplage des données de teneur en eau volumique et piézométrique démontre l'existence d'un contrôle par le sol de l'hydrologie de la zone humide. En effet, les horizons d'argiles limoneuses et

d'argiles permettent le maintien de conditions d'humidité importantes durant la majeure partie de l'année dans la tranche supérieure du sol (≈ 1 m).

1.3 Caractéristiques des mesures et hydrologie de la période d'observation

Les mesures de terrain effectuées en continu aux différentes stations, ont été collectées et traitées pour une période de 17 mois. Il s'agit d'évaluer la qualité des résultats en regard du matériel de mesure, de vérifier leur cohérence avec les enregistrements effectués aux stations du réseau national installées à proximité (station climatologique d'Alençon de la Météorologie Nationale et station hydrométrique de Moulin le Carbonnel de la DREAL Pays de la Loire). Cette comparaison permet aussi de définir le caractère de la période de mesure qui agit sur l'abondance de l'eau en circulation dans la Sarthe et dans la nappe alluviale entre janvier 2015 et mai 2016.

1.3.1 Matériel de mesures et qualité des données

1.3.1.1 Données climatiques

Les deux stations météorologiques installées sur chacun des sites sont du type WATCHDOG 2900ET (Figure 94, Tableau 27 et Annexe II.6.) et peuvent stocker 366 jours de données.



Figure 94 : Station météorologique WatchDog 2900ET mise en place en chaque site

Tableau 27 : Spécifications techniques de la station météorologique

Modèle	WATCHDOG 2900ET
Distributeur	SDEC France
T°C air	-32 à +83 °C, précision $\pm 0,6$ °C
Humidité relative	10 à 100 %, précision ± 3 %
Pluviométrie	0,25 mm, précision ± 2 % (pluviographe à augets basculeurs)

Vitesse du vent	0,3 à 241 km/h, précision ±3 km (±5 %)
Direction du vent	0 à 360°, résolution 1°, précision ±4°
Rayonnement global	0 à 1250 W/m2, précision ±5 %
Evapotranspiration	mm/jour
Alimentation	4 piles alcalines type AA (LR06)

Les températures enregistrées aux deux stations montrent de petites différences avec la station d'Alençon. Plus visibles à l'échelle journalière (Figure 95) que dans les moyennes mensuelles ; elles peuvent être en lien avec les sites de nos stations implantées en milieu rural dans un espace ouvert, ou bien à l'instrumentation (sonde thermique).

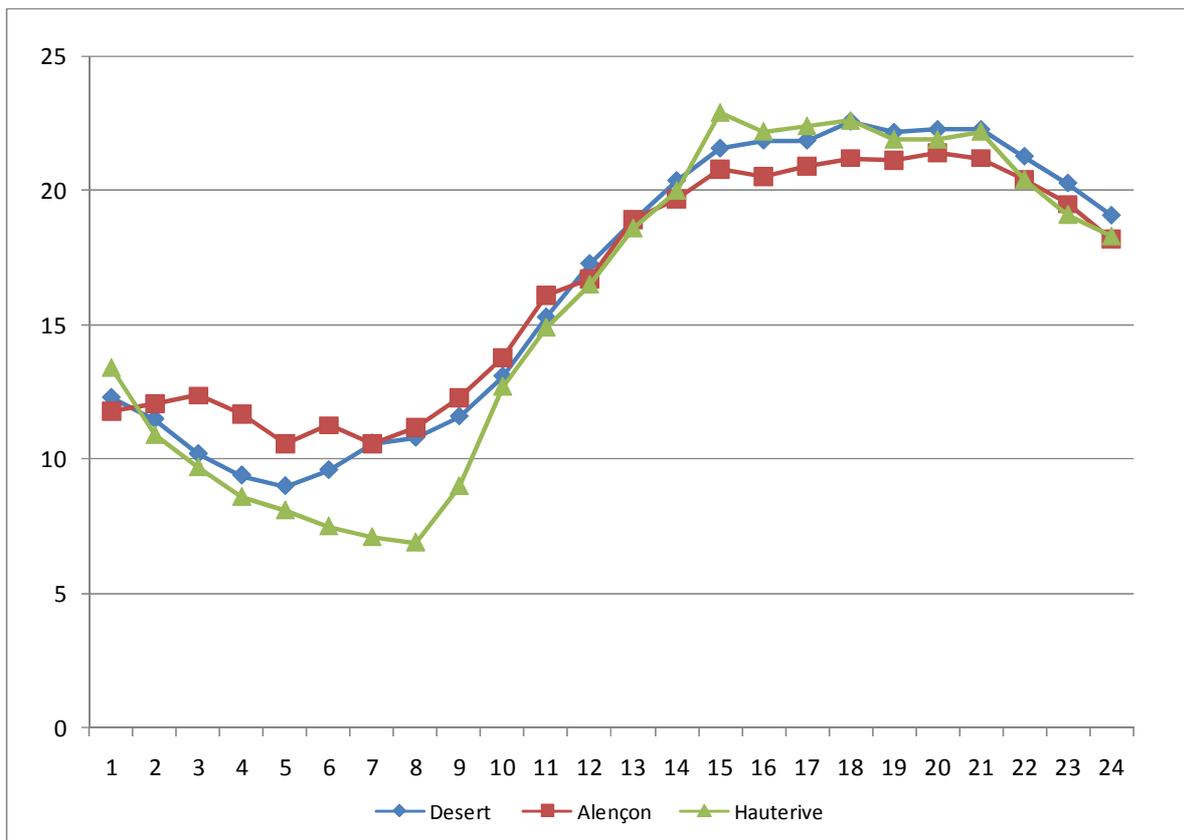


Figure 95 : Températures horaires le 20 juin 2015 (en abscisse les heures, en ordonnée la température moyenne horaire)

L'évapotranspiration potentielle (ETP) est calculée selon la formule générale de PENMAN-MONTEITH (descriptif de la méthode en Annexe II.6) qui donne une Evapo-transpiration de référence (ET₀) :

$$ET_0 = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) \cdot d + \gamma \frac{37}{t + 273} v (e_w - e)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{208} v \right)}$$

ET₀ évapotranspiration de référence (mm/h),

R_n rayonnement net (W.m-2),

G flux de chaleur du sol ($W.m^{-2}$),
d : longueur du pas de temps en k secondes ($d=3.6 \cdot 10^{-3}ks$)
t température moyenne horaire de l'air ($^{\circ}C$),
 Δ pente de la courbe de la tension de vapeur saturante ($kPa.^{\circ}C^{-1}$),
 γ Constante psychrométrique ($kPa.^{\circ}C^{-1}$),
e tension de vapeur à la température t (kPa),
ew tension de vapeur saturante (kPa),
v vitesse moyenne du vent à 2 m ($m.s^{-1}$).

Les précipitations sont mesurées par des pluviomètres à augets basculeurs. Le comptage d'impulsions est fait par un système de capteur électronique. Dans les deux sites d'études, les valeurs enregistrées sont proches l'une de l'autre, mais légèrement inférieures à celles d'Alençon. Celles d'août 2015 et de la première quinzaine de septembre 2015 ne sont pas prises en compte en raison d'une panne des deux enregistreurs. Elles sont remplacées par celles de la station d'Alençon (Tableau 28, § suivant).

La pression atmosphérique est enregistrée par le Baro-Diver est situé au niveau de chaque station météorologique. La pression atmosphérique varie en fonction du temps et sa valeur est utilisée pour compenser les mesures de pressions d'eau enregistrées par les Mini-Diver. Un seul Baro-Diver est nécessaire pour une zone de 15 km de rayon, et donc par site (Annexe II.6.)

1.3.1.2 Les niveaux d'eau

Les niveaux d'eau sont mesurés par un Mini Diver. Ces sondes piézométriques acquièrent des données à un pas de 1 heure (Annexe II.7.). Elles sont placées dans des tubes crépinés et placées dans la zone saturée. Elles enregistrent les variations du toit de la nappe phréatique au cours du temps. La précision de la mesure de ces sondes est de ± 1 cm pour une résolution de mesure de ± 5 mm.

Pour calculer le niveau d'eau par rapport à un niveau de référence verticale, on utilise les mesures réalisées par le Diver et le Baro-Diver.

Une fois l'installation du dispositif terminée, les stations piézométriques et limnimétriques (même dispositif de mesure, traitement des données en cours) sont levées au GPS Trimble R8 par la méthode Network Real Time Kinematic (NRTK) permettant d'obtenir leurs coordonnées en temps réel rattachées dans le système RGF93, projection Lambert 93, altitude IGN69. Par cette méthode, les coordonnées planimétriques sont connues avec une précision de 2 à 5 cm en absolue, cette précision est jugée correcte pour notre étude. La composante verticale en revanche est précise à plus de 5 cm, ce qui est trop imprécis pour l'analyse que nous voulons faire. Nous avons donc opté pour un nivellement direct par la méthode Cholesky afin de rattacher une seule station piézométrique par site en IGN69 grâce aux repères de nivellement situés à proximité immédiate des sites. Nous avons ensuite rattaché les autres stations grâce à un nivellement indirect par levé topographique, en utilisant la méthode du double retournement, afin d'obtenir une précision altimétrique relative des points du réseau (ZTN) de 1 cm.

L'enregistrement des niveaux d'eau aux différents piézomètres donne des variations globalement cohérentes les unes par rapport aux autres (§ suivant). Mais l'analyse des enregistrements pris un

à un révèle quelques anomalies. Elles sont dues à un mauvais fonctionnement de l'enregistreur pendant quelques jours. Au Moulin du Désert, elles sont également peuvent être également dues à des perturbations liées aux prélèvements pour l'irrigation (piézomètres DP2, 3, 4, 9, 10, 11, 16, 17 entre le 15 et le 25 mai) ou bien à des mouvements de vannes (piézomètre DP7 entre le 5 et le 25 juillet) effectués au barrage. Les données enregistrées au piézomètre DP 9 sont anormalement basses en saison estivale (dysfonctionnement de l'appareil de mesure ou influence anthropique ?).

Toutes les données mesurées sur le terrain au pas de temps horaire ont permis de calculer des valeurs journalières puis mensuelles. Les valeurs incohérentes ont été corrigées ou ne sont pas prises en compte (Annexe II.8 et Annexe II.9).

1.4 Caractéristiques de la période de mesure

Les données du Tableau 28 et les figures suivantes montrent que les 17 mois de mesures présentent des écarts notables par rapport aux données d'Alençon ; sur la Figure 96 et Figure 97 ont été ajoutées les moyennes mensuelles des précipitations et des températures pour la période 1998-2013 (station d'Alençon).

Tableau 28 : Données climatiques mensuelles de la période de mesure en regard des données de la station d'Alençon.

Paramètre	Température (°C)			Précipitations (mm)			Evapotranspiration (mm)		
	Désert	Hauterive	Alençon	Désert	Hauterive	Alençon	Désert	Hauterive	Alençon
Jan. 2014			6,5			122,0			15,5
Fév. 2014			6,6			119,9			27,3
Mar. 2014			8,1			33,6			54,0
Avr. 2014			10,7			73,2			65,8
Mai. 2014			12,6			103,7			86,6
Jun. 2014			16,8			42,1			122,5
Jui. 2014			18,8			80,3			119,0
Août. 2014			16,1			137,2			89,8
Sep. 2014			16,4			9,0			78,4
Oct. 2014			12,6			68,1			39,4
Nov. 2014			9,4			67,1			20,7
Déc. 2014			5,2			67,1			21,0
Jan. 2015	4,4	4,2	4,5	69,9	61,0	65,7	20,5	25,3	19,6
Fév. 2015	3,5	3,5	3,6	45,4	42,8	51,6	34,0	29,6	25,1
Mar. 2015	6,7	6,9	7,1	33,7	26,1	28,9	61,0	53,9	48,5
Avr. 2015	10,8	10,9	11,2	25,5	27,3	42,6	99,2	100,4	85,0
Mai. 2015	13,0	12,9	13,0	76,2	76,1	63,7	101,2	101,7	91,3
Jun. 2015	16,9	17,2	16,9	22,7	20,9	30,4	141,6	136,4	132,8
Jui. 2015	18,6	19,0	18,9	44,2	30,7	37,6	118,9	106,1	142,7
Août. 2015	18,4	17,8	18,9	106,4	106,4	106,4	119,2	119,2	119,2
Sep. 2015	13,0	13,1	13,6	57,0	58,0	60,2	74,3	73,4	74,9
Oct. 2015	10,2	10,7	10,9	41,1	34,3	30,9	38,9	33,2	40,5
Nov. 2015	10,3	10,5	10,6	86,3	81,9	71,4	24,2	21,0	27,3
Déc. 2015	8,3	8,8	8,7	36,9	28,2	32,3	16,7	16,5	19
Jan. 2016	5,1	5,2	5,3	123,5	107	89,3	17,9	15,2	
Fév. 2016	5,6	5,6	5,6	83,6	73,5	83,9	34,9	29	
Mar. 2016	5,8	6	6,2	101,8	99,8	99,8	57,7	49,4	
Avr. 2016	8	8,1	8,4	55,3	55,1	46,8	78,8	77,9	
Mai. 2016	13,1	13,1	13,3	69,9	83	83,6	97,9	92	

Par rapport aux hauteurs moyennes mensuelles mesurées à Alençon (1998-2013), les précipitations mesurées sur nos sites ont été très élevées en août 2015 (orages) ainsi qu'en janvier et mars 2016 (+ 50mm environ). A l'inverse, elles ont été faibles en octobre et décembre 2015 ainsi qu'en mars 2016.

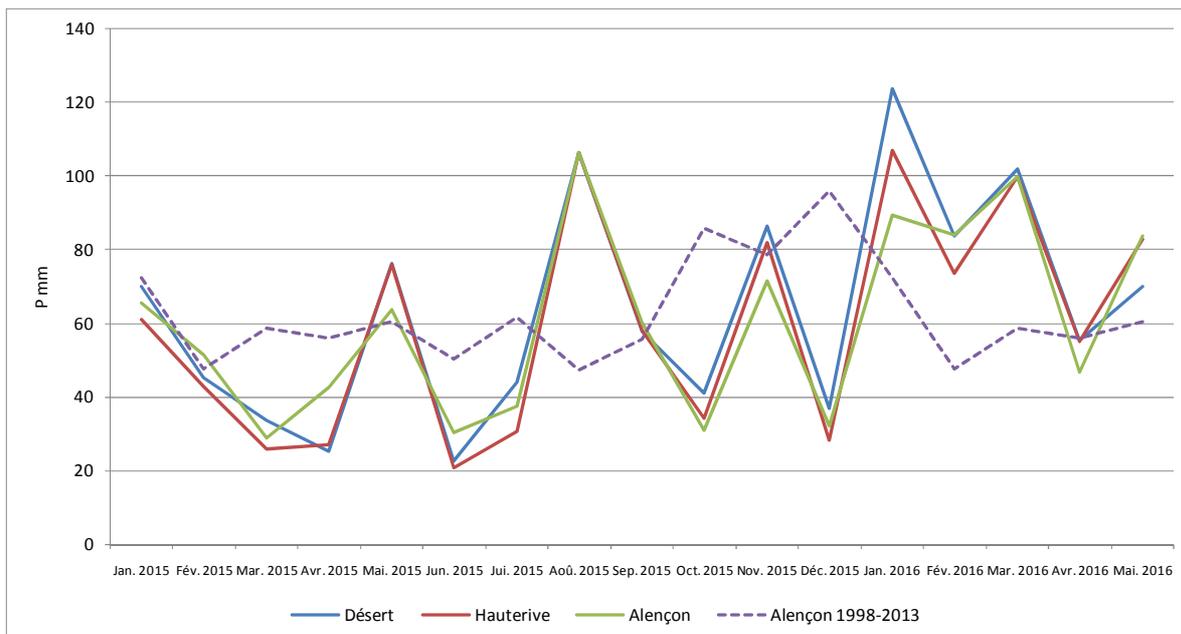


Figure 96 : Précipitations mensuelles

Les températures s'écartent des valeurs moyennes mesurées à Alençon, depuis juillet 2015 ; elles ont été anormalement élevées en novembre et décembre 2015 (Figure 97).

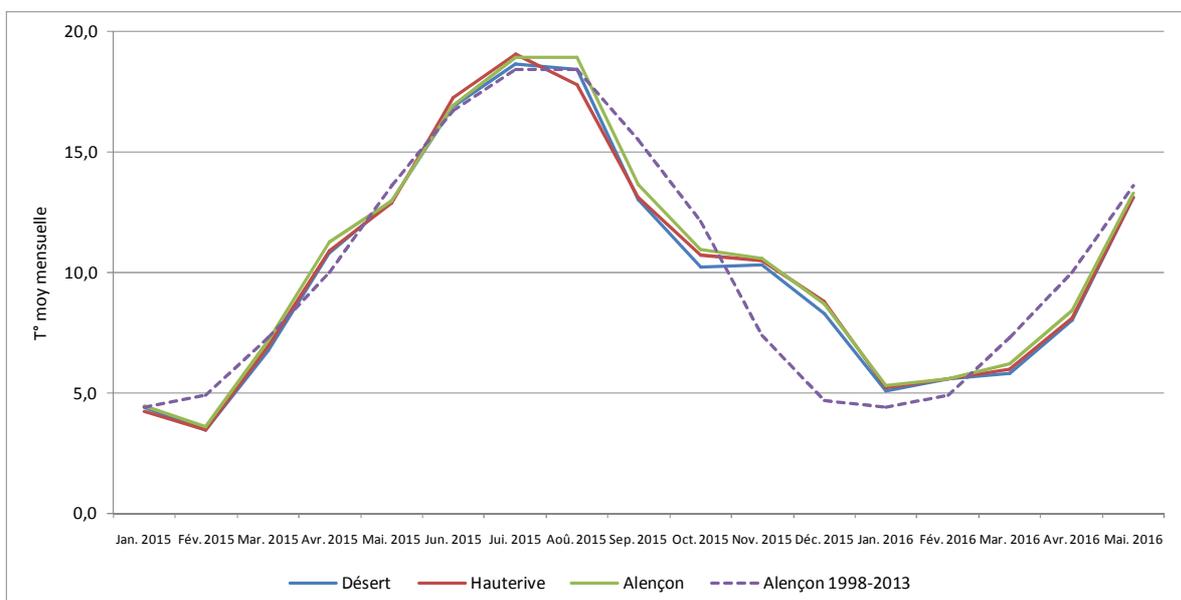


Figure 97 : Températures moyennes mensuelles

Les débits enregistrés (Tableau 29 et Figure 98) à la station hydrométrique de Saint-Cénéri-le-Gérei sont généralement inférieurs à ceux de la période 1979-2015 avec des écarts moins grands en été qu'en hiver. Ils sont supérieurs à ceux de cette période à partir d'avril 2016.

Tableau 29 : Débits mensuels à la station de Saint Ceneri le Geréi

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Q 1979-2015	19,95	25,85	10,28	4,86	6,495	2,875	2	3,545	1,885	2,505	4,655	8,245
Année 2015	13	14	8,16	3,82	4,88	1,74	1,08	1,34	1,43	1,22	2,84	2,69
Année 2016	12,65	18,22	13,69	10,61	6,05	7,35						

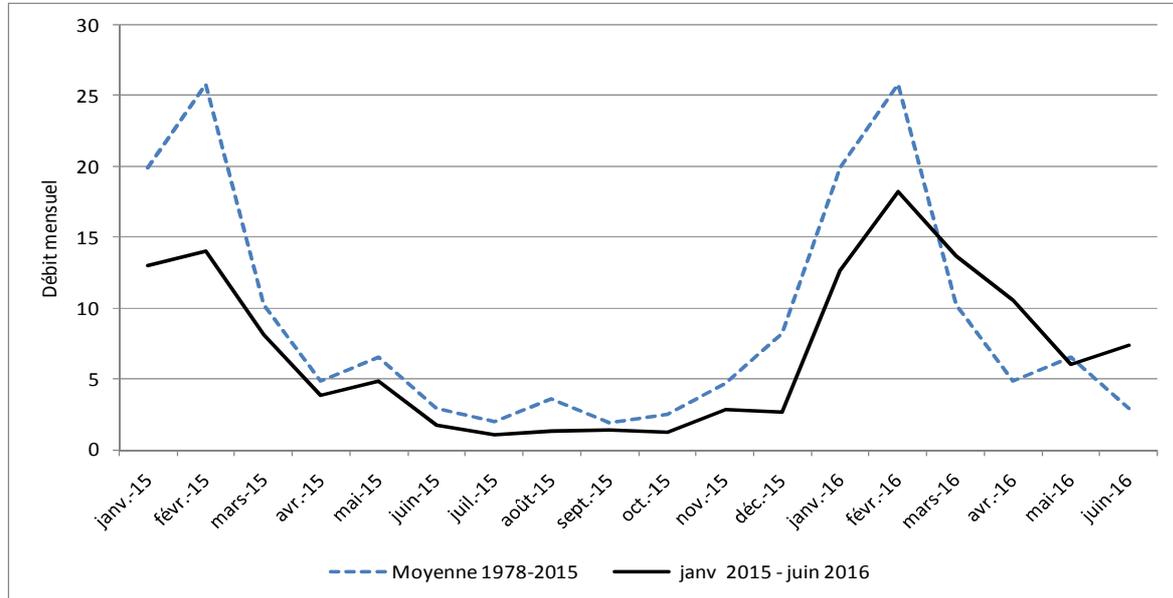


Figure 98 : Débits moyens mensuels à Saint-Céneri-le-Géréi

Plus en détail, l'hydrogramme journalier correspondant à la période de mesures (Figure 99) montre que les débits de l'hiver 2015-2016 ont été plus élevés que ceux de l'année précédente. Compte tenu des précipitations du printemps 2016, ils sont restés soutenus jusqu'en mai.

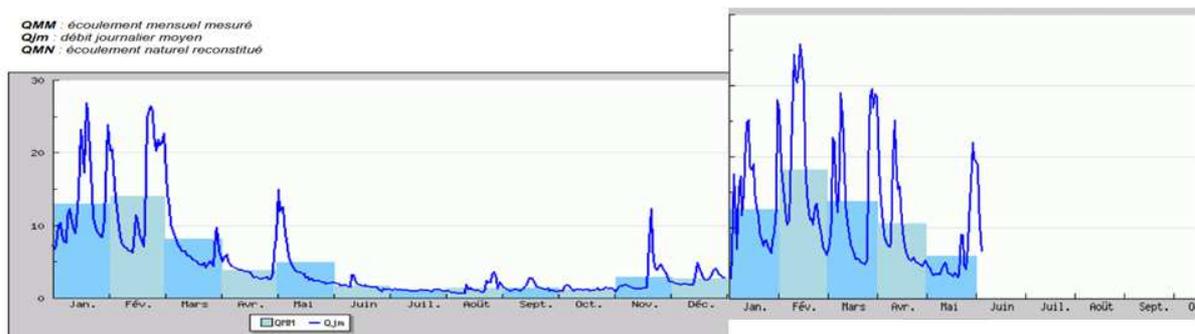


Figure 99 : Hydrogramme journalier de la station de Saint Ceneri le Gerei. Année 2015 et 2016 (Banquehydro)

Par rapport aux moyennes des précipitations, des températures et des niveaux d'eau, la période de mesures est globalement moins humide et les contrastes saisonniers moins prononcés. Au cours de la saison estivale les précipitations orageuses (fin d'août 2015) ont humecté les sols ce

qui a empêché que s'instaure une situation d'étiage prononcé. Les précipitations inférieures à la moyenne en octobre et décembre 2015 n'ont entraîné qu'une remontée lente de ces niveaux et du débit de la Sarthe. L'ensemble des réservoirs a dû être rempli entre janvier et mars 2016 permettant que le lit majeur soit partiellement submergé par l'eau des précipitations, de la nappe et de la Sarthe.

Conclusion :

Nos sites de mesures correspondent à des secteurs de vallée plats, faiblement inclinés, large pour le site de Hauterive, plus étroit pour celui de Désert. Dans le détail, les fonds sont irréguliers en surface (microtopographies) et sous la surface (passées sableuses et graveleuses sous au moins 50 cm de fines peu perméables). Les conditions climatiques de la période de mesure n'ont pas permis qu'apparaissent des situations hydrologiques extrêmes.

Le dispositif de mesures permettra ainsi d'étudier les processus qui gouvernent les niveaux de l'eau et les échanges entre la surface et la nappe souterraine correspondant à des situations hydro-climatologiques "moyennes". La caractéristique de chacun des deux sites servira à identifier des variantes du fonctionnement des échanges nappe-rivière inscrites dans la fluctuation des niveaux d'eau à la fois au cours de la période de mesures mais aussi à l'intérieur des sites selon les réactions du niveau de l'eau de la nappe, d'un piézomètre à l'autre.

2 Dynamique des niveaux d'eau (nappe et Sarthe) de janvier 2015 à avril 2016

L'objet de ce paragraphe est l'étude de la variation des niveaux d'eau au cours de la période de mesures afin de détecter leurs réactions aux conditions climatiques, précipitations et évapotranspiration variables et la variation des niveaux d'eau d'un point de mesure à l'autre pour chacun des sites. Les données concernant les niveaux d'eau ont été structurées dans une base de données (Annexe II.11.).

2.1 Caractéristiques principales

La Figure 100 et la Figure 101 reproduisent pour chacun des sites, la variation journalière de tous les niveaux d'eau pendant la période de mesure ainsi que les précipitations. On note une grande réactivité de la nappe aux apports pluviométriques malgré la faible perméabilité des matériaux de surface.

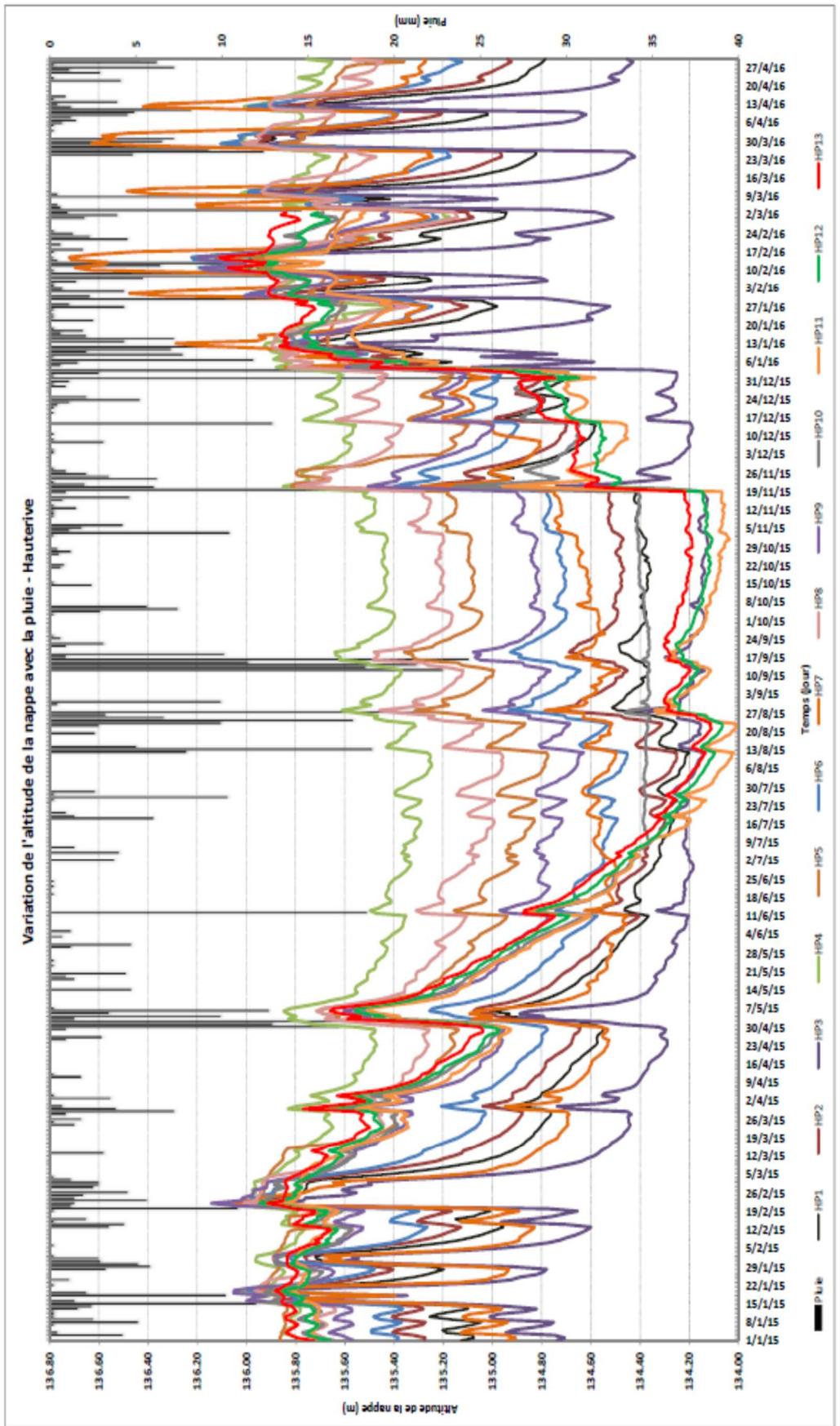


Figure 100 : Niveaux de nappe enregistrés à Hauterive (moyennes journalières du 1/1/2015 au 30/04/2016)

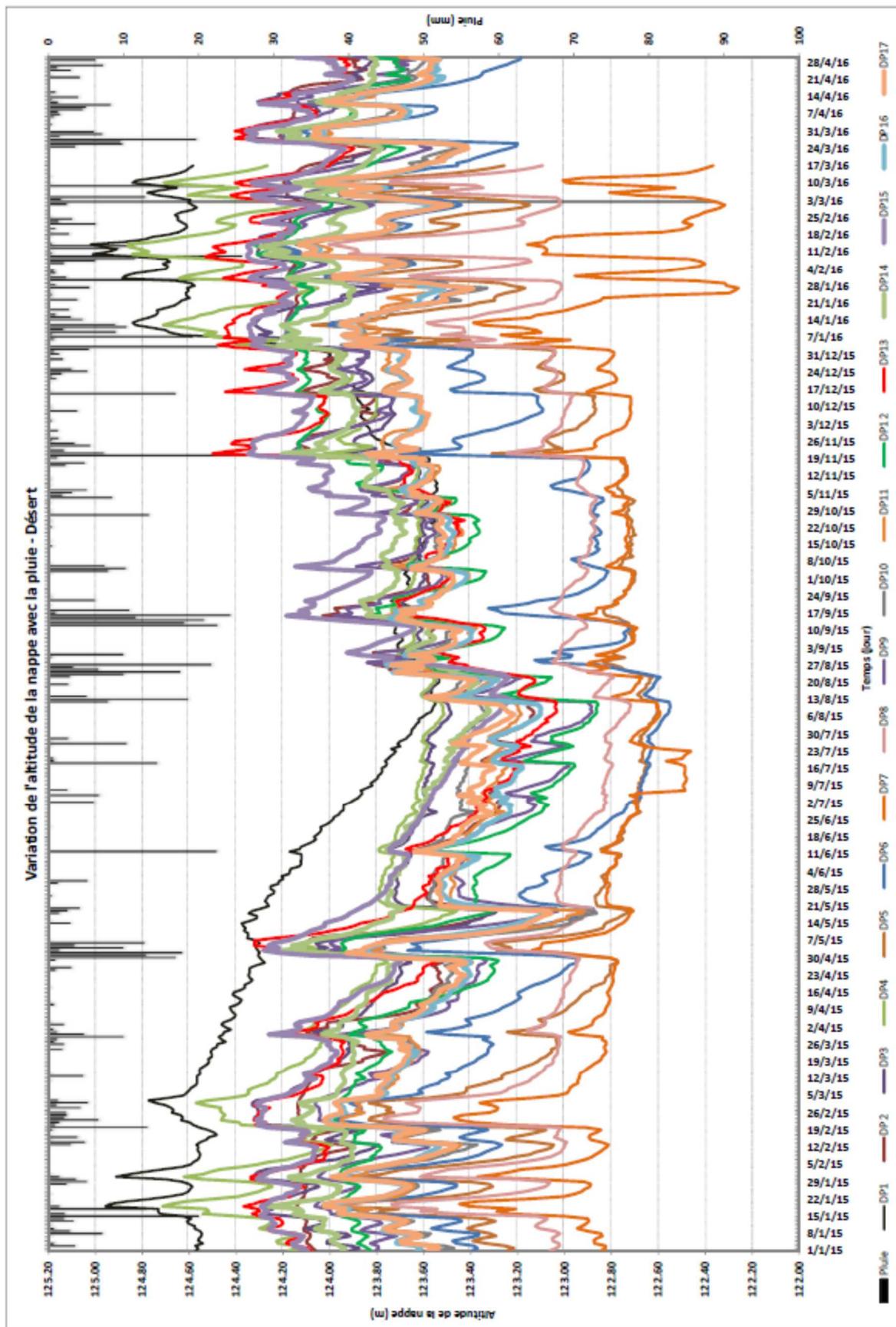


Figure 101 : Niveaux de nappe enregistrés à Moulin de Désert (moyennes journalières du 1/1/2015 au 30/04/2016)

2.2 Variations des niveaux moyens d'eau

Toutes les données collectées ont permis de calculer des valeurs moyennes mensuelles des apports d'eau (P – ETP) et des niveaux piézométriques (moyenne des enregistrements à tous les piézomètres) et limnimétriques (Tableau 30, Figure 102 et Figure 103, Annexes II.8 et II.9).

Tableau 30 : Niveaux piézométriques et limnimétriques moyens en mètres

Site	Niveau de la nappe			Niveau de la Sarthe amont barrage			Niveau de la Sarthe aval barrage		
	hiver	été	écart	hiver	été	écart	hiver	été	Écart
Hauterive	135.6	134.55	1.05	135.95	135.75	0.20	135.43	134.4	1.03
Désert	123.85	123.2	0.65	123.6	123.4	0.20	122.9	121.55	1.35

L'évapotranspiration (ET) des nappes phréatiques est une variable importante dans la modélisation de l'interaction des eaux de surfaces et des eaux souterraines. Une quantité alarmante des eaux souterraines est consommée par l'évapotranspiration par les plantes dans les zones phréatophytes au long des vallées fluviales en raison de nappes phréatiques peu profondes. Les données météorologiques, limnimétriques et piézométriques des deux sites montrent que la nappe suivie dans la zone humide réagit de la manière attendue à l'évapotranspiration entre deux événements pluvieux assez éloignés dans le temps, par un lent abaissement du niveau d'eau dans les piézomètres. De plus, la nappe réagit de manière cohérente avec la rivière à la pluie efficace, avec une élévation du niveau piézométrique par grosse pluie.

2.2.1 Au Moulin de Hauterive

A l'amont du barrage, le niveau de la Sarthe qui varie peu au cours de l'année (+/-0.20m), réagit à peine à la variation des apports climatiques (P – ETP) du fait du maintien artificiel d'un niveau élevé d'eau par le barrage. Il est ainsi toujours supérieur à celui de la nappe de 0 à 0.3m en hiver et de 1.30m en été.

A l'aval du barrage, tous les niveaux d'eau (nappe et rivière) enregistrent des variations saisonnières liées à celles des apports climatiques (P-ETP). On note qu'à l'inverse de l'amont, la nappe est toujours un peu plus haute que la rivière (écart de 0.20m en hiver et de 0.10m en été).

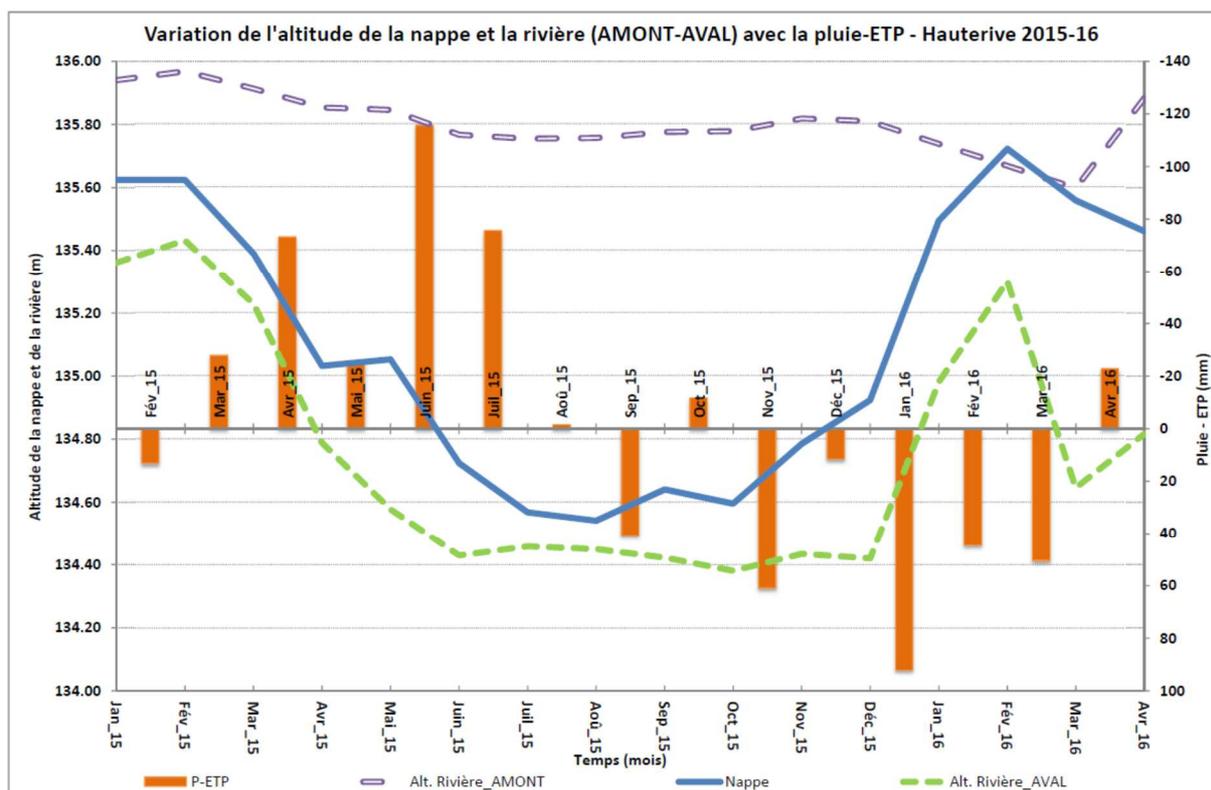


Figure 102 : Apports climatiques et niveaux d'eau au Moulin de Hauterive (moyennes mensuelles et moyennes de tous les enregistrements)

2.2.2 Au moulin du Désert

A l'amont du barrage, les niveaux d'eau sont modérément contrastés. Celui de la Sarthe varie peu. Tout comme à Hauterive, il est artificiellement contrôlé par le barrage. Il influence probablement le niveau de la nappe dont les écarts entre l'hiver et l'été sont peu marqués. Les écarts de 0.20 m environ, positifs en hiver et négatifs en été, sont liés aux apports climatiques d'eau qui restent visibles malgré l'influence du barrage.

A l'aval du barrage, le niveau de la Sarthe est déprimé par rapport à celui de la nappe. Son altitude s'abaisse de 1.60 m en été.

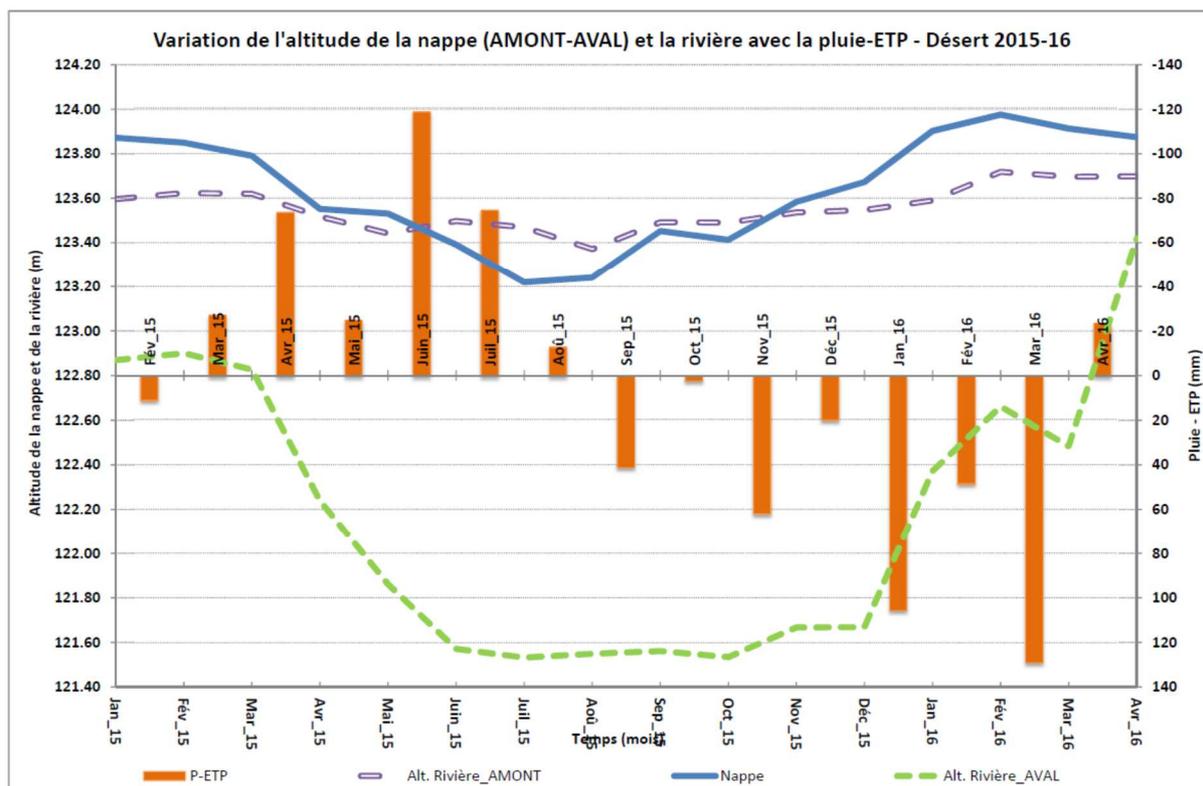


Figure 103 : Apports climatiques et niveaux d'eau au Moulin du Désert (moyennes mensuelles et moyennes de tous les enregistrements)

On note ainsi que le relèvement du niveau de la Sarthe dû aux barrages, a des incidences variées sur la nappe alluviale. A Hauterive, la nappe réagit aux variations saisonnières des apports d'eau (P-ETP) ; elle est peu influencée par le barrage. A l'inverse, au Moulin du Désert, le niveau de la nappe est quasi insensible à ces variations saisonnières et semble soutenue par le niveau de la Sarthe relevé et contrôlé par le barrage.

Les différences de comportement des niveaux souterrains d'eau sont par ailleurs en lien avec les configurations spécifiques à chacun des sites : rôle de la pente longitudinale du fond de vallée plus forte au Moulin du Désert et de la largeur de ce fond (Cf. Cartes des caractéristiques morphologiques des sites, Figure 56 et Figure 77), rôle du substratum encaissant et de la perméabilité des alluvions : à Hauterive prédominance de matériaux fins peu perméables (marnes et marno-calcaires et alluvions de texture fine), à Désert, alluvions et latéralement colluvions un peu plus grossières surmontant un fond rocheux constitué de granite probablement fissuré.

Mais les situations moyennes masquent d'autres contrastes qui apparaissent à l'échelle de la journée et permettent de détecter des fonctionnements spécifiques à l'intérieur de chacun des sites.

2.3 Étude de quelques situations journalières

Une analyse à l'échelle de la journée montre quels sont les temps de réaction de la nappe aux précipitations et comment se manifeste dans le détail, l'influence des barrages. Les périodes prises en considération sont caractérisées par des épisodes pluvieux abondants, précédés et suivis par des périodes sans pluie : janvier 2015, juin et août 2015.

2.3.1 Site de Hauterive

2.3.1.1 Variation des niveaux d'eau pour 3 périodes caractéristiques

En janvier 2015, (Figure 104) les réactions de la nappe aux précipitations interviennent en 24 à 36 h.

A proximité de la Sarthe, les niveaux de l'eau souterraine sont conduits par ceux de la rivière :

- HP3 enregistre des variations parallèles à celles de la Sarthe en aval du barrage (HL3)
- HP4 et HP 8 reproduisent celles de la Sarthe à l'amont du barrage (HL1)
- Lorsqu'on s'éloigne de la Sarthe, d'autres réactions sont détectées
- HP 12 ne répond pas aux précipitations (milieu saturé ? hors champ de l'influence fluviale)
- HP 7 réagit comme HP3 probablement en lien avec la caractéristique des sédiments sous la surface de même type que ceux de HP3.

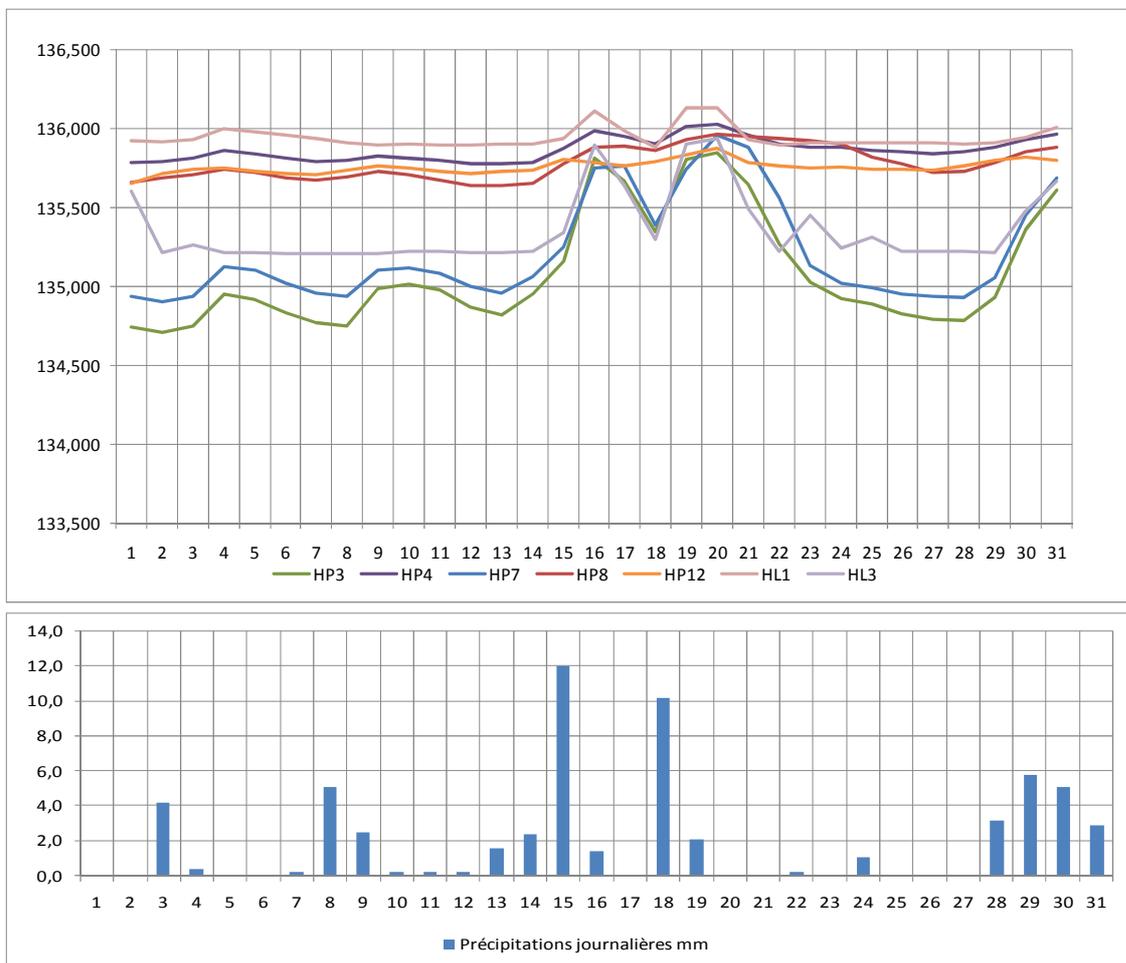


Figure 104 : Précipitations et niveaux d'eau en janvier 2015 (HP = piézomètre, HL = limnimètre)

En juin 2015 (Figure 105) tous les points réagissent en 2 jours aux précipitations du 12 juin. Les niveaux sont parallèles sauf en HP12 où l'abaissement du niveau de la nappe est plus rapide qu'ailleurs (sédiments contenant au moins 40% de sable).

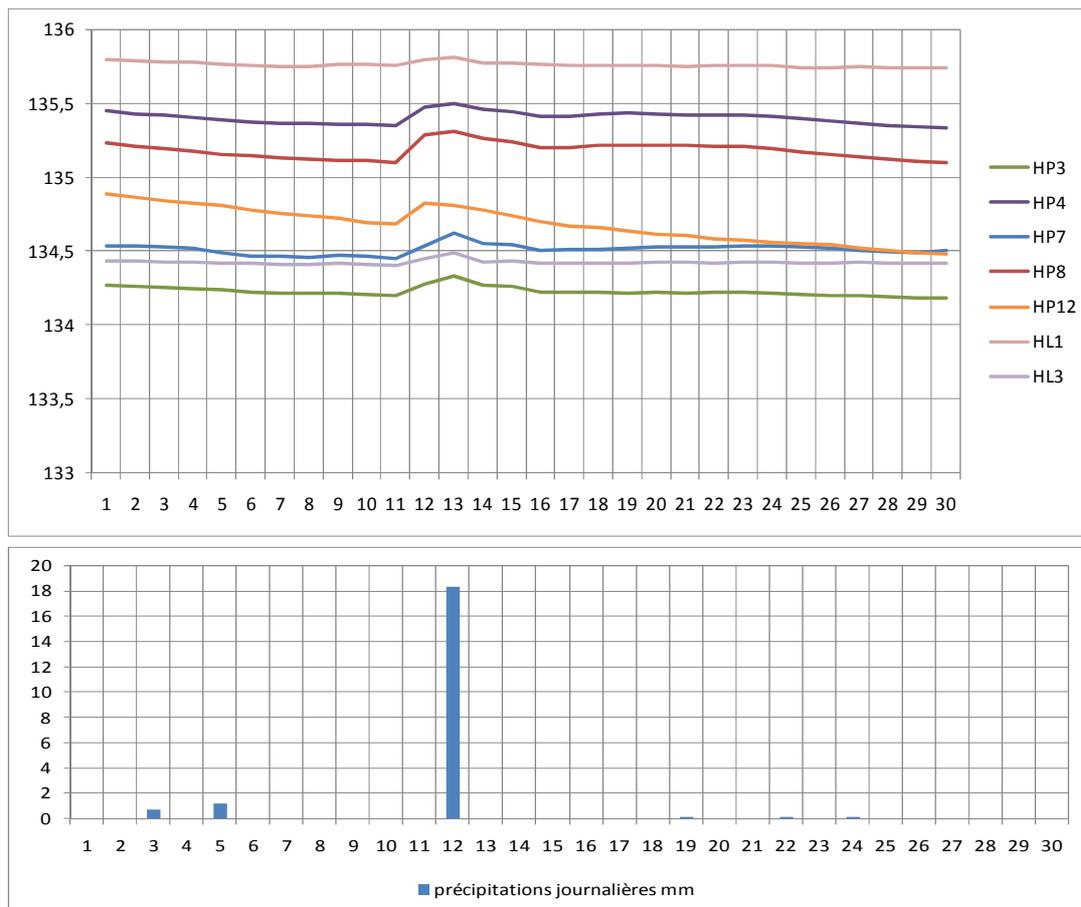


Figure 105 : Précipitations et niveaux d'eau en juin 2015 (HP = piézomètre, HL = limnimètre)

En août 2015 (Figure 106) tous les niveaux d'eau sont quasi-horizontaux à des altitudes différentes, les plus bas sont loin de la Sarthe ou en aval du barrage, les plus élevés sont en amont du barrage.

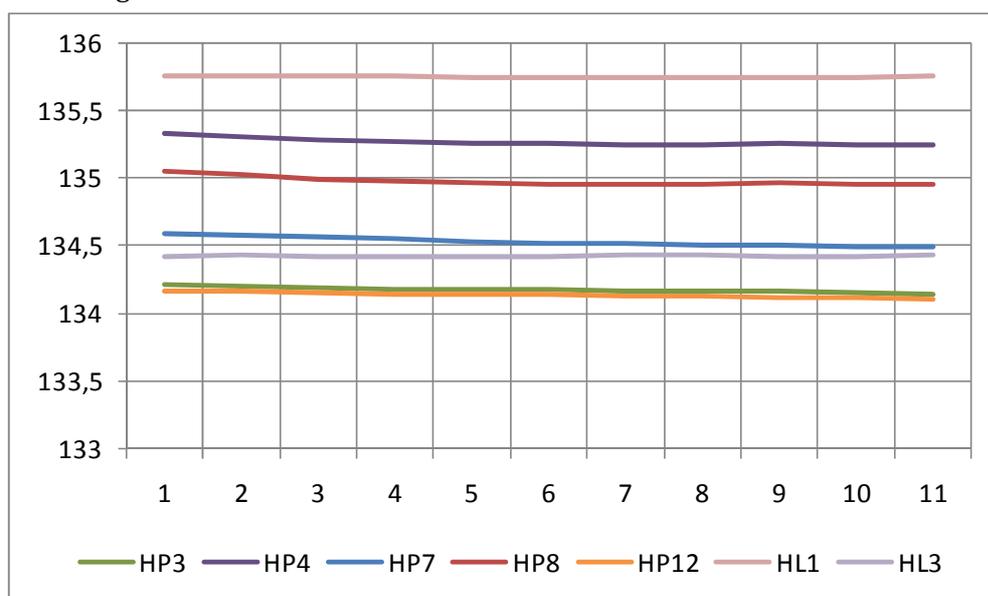


Figure 106 : Précipitations et niveaux d'eau du 1er au 11 août 2015 (HP = piézomètre, HL = limnimètre) (période sans précipitations)

Cette situation (intervenue avant les orages d'août 2015) est liée aux prélèvements évapotranspiratoires auxquels l'abaissement des niveaux d'eau en dehors des périodes de précipitations est bien corrélée (Figure 107).

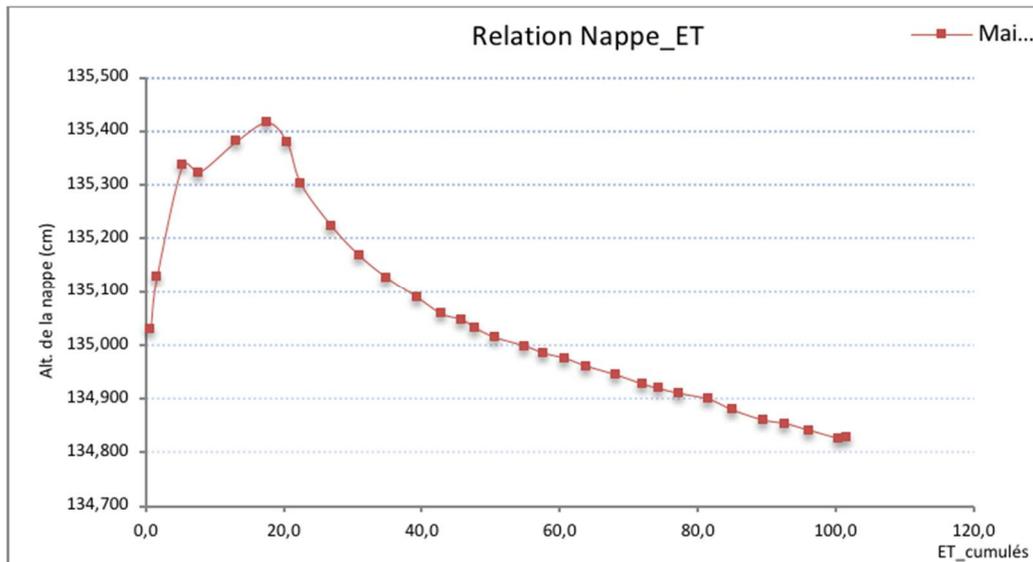


Figure 107 : Exemple de corrélation niveau moyen de la nappe souterraine et de l'évapotranspiration cumulée

2.3.1.2 Variation du niveau de l'eau d'un point de mesure à l'autre

La Figure 108 montre pour les trois périodes précédentes, la configuration des niveaux d'eau mesurés à tous les points, par rapport à l'altitude de la surface du sol (altitude terrain) ;

- le 20 janvier tout le fond de vallée est submergé par l'eau et le niveau est quasi horizontal.
- le 13 juin et le 11 août, les niveaux d'eau sont variés :
 - en HP 4 et HP8 le niveau piézométrique est soutenu par la Sarthe dont l'altitude est de 20 cm supérieure à celui de la nappe à l'amont du barrage
 - ailleurs le niveau de la nappe est basse et proche de celui de la Sarthe ou légèrement inférieur.
 - aux points HP 11, 12 et 13 éloignés de la Sarthe le niveau de la nappe est le plus bas du fait de conditions locales hors influence du barrage et de la rivière.

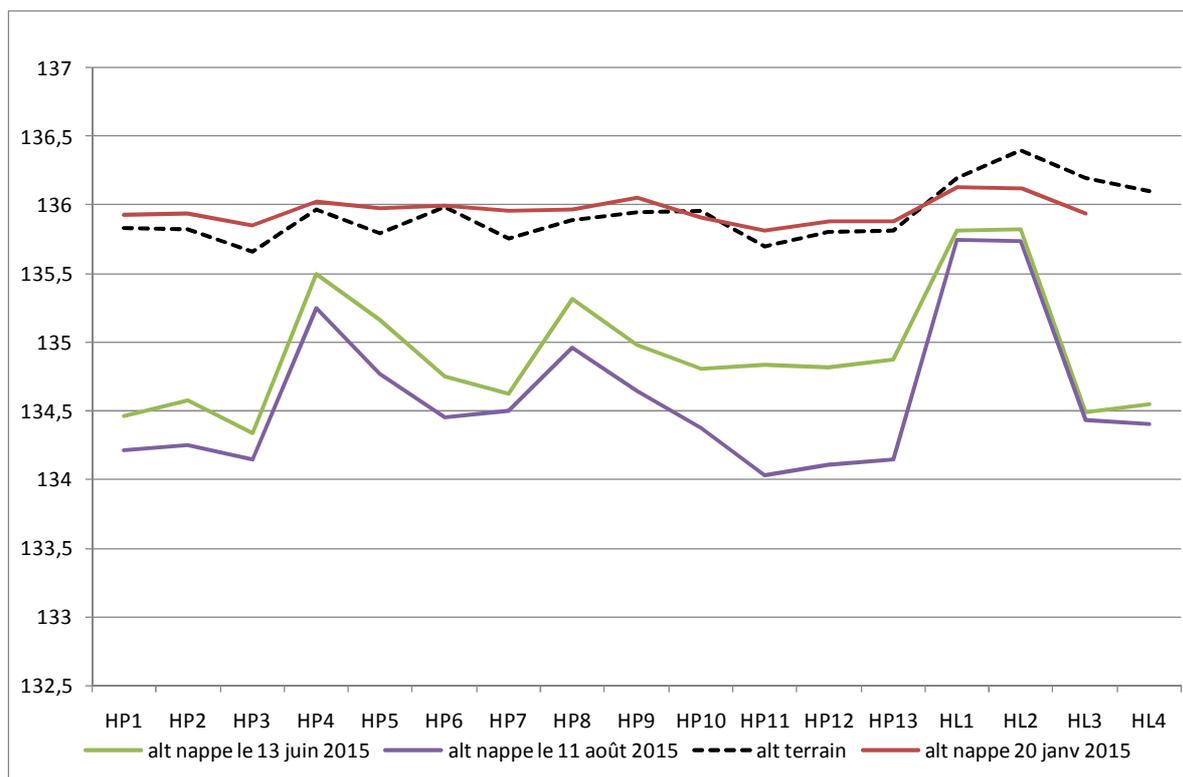


Figure 108 : Variations des niveaux d'eau à tous les points de mesures en janvier, juin et août 2015

Ainsi, à Hauterive, les niveaux d'eau enregistrent les effets combinés de plusieurs facteurs :

- le barrage agit sur le niveau de la nappe à proximité immédiate de la Sarthe. Lorsqu'on s'éloigne de la rivière, son influence s'atténue rapidement ;
- On détecte alors le rôle des sédiments. Les passées graveleuses et sableuses peuvent entraîner des variations du niveau souterrain de l'eau plus amples que celles liées au barrage ;
- Les microtopographies n'agissent que là où les impacts des deux facteurs précédents sont atténués ;
- Enfin l'influence du canal de décharge du moulin sur les niveaux d'eau n'a pas pu être déterminée.

2.3.2 Site du Moulin du Désert

2.3.2.1 Variation des niveaux d'eau pour 3 périodes caractéristiques :

En Janvier 2015, compte tenu de la diversité des situations, les points de mesures ont été regroupés en 4 groupes selon les styles de variation des niveaux d'eau, très. Les niveaux de la Sarthe figurent sur tous les graphiques (DL2 aval barrage et DL 3 amont barrages).

- **Groupe 1** : les piézomètres sont situés dans la partie aval du site, en rive droite et sur l'ilot encadré par le lit de la Sarthe et le canal de décharge (Figure 109). Les variations reproduisent celles de la Sarthe. Les variations de DP3 sont amorties (peut-être du fait d'apports d'eau provenant du versant ?

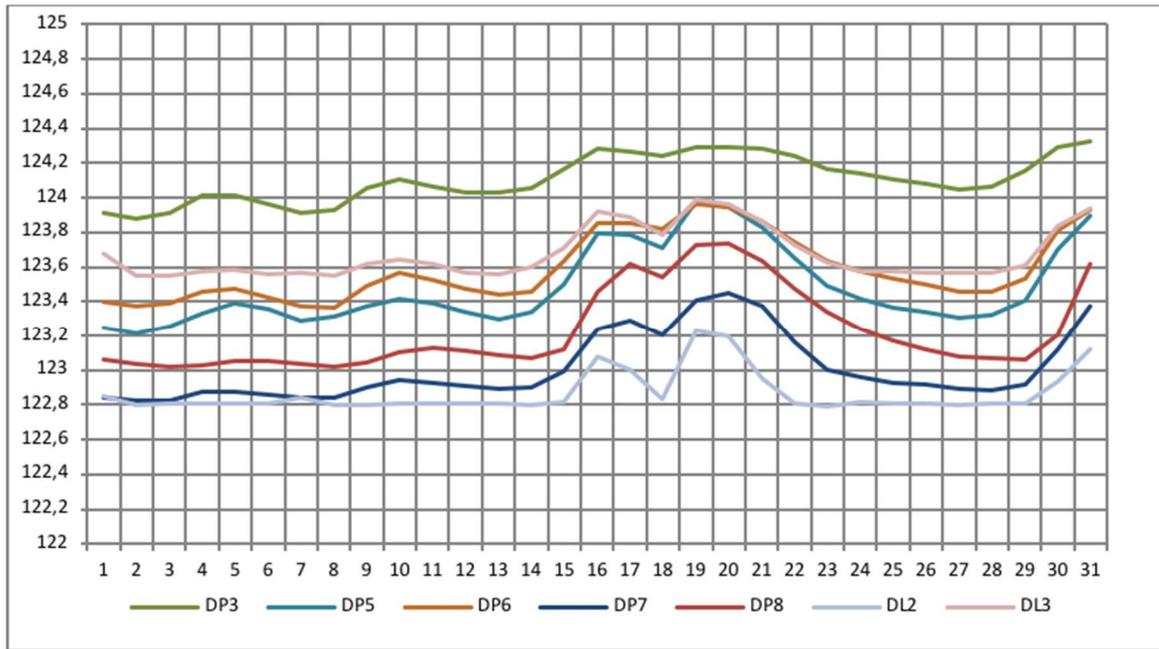


Figure 109 : Niveaux d'eau (en m) du 1er au 31 janvier 2015 au Moulin du Désert. Groupe 1

- **Groupe 2** : il comprend les piézomètres installés en rive gauche de la Sarthe qui réagissent tous comme DL3 et indépendamment des distances de la Sarthe (Figure 110).

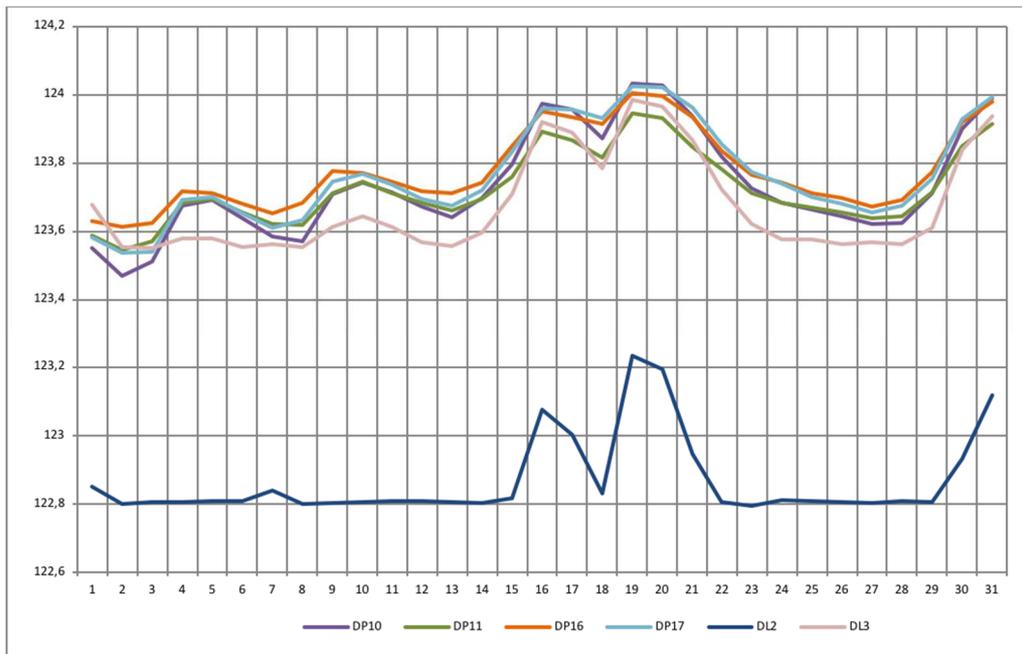


Figure 110 : Niveaux d'eau du 1er au 31 janvier 2015 au Moulin du Désert. Groupe 2

- **Groupe 3** : il comprend les piézomètres qui réagissent peu aux niveaux de la Sarthe (auxquels DP 3 pouvait être ajouté). Tous sont situés en rive gauche soit en limite de lit majeur (DP 13 et 15) soit sous l'influence de drains qui évacuent l'eau du versant.

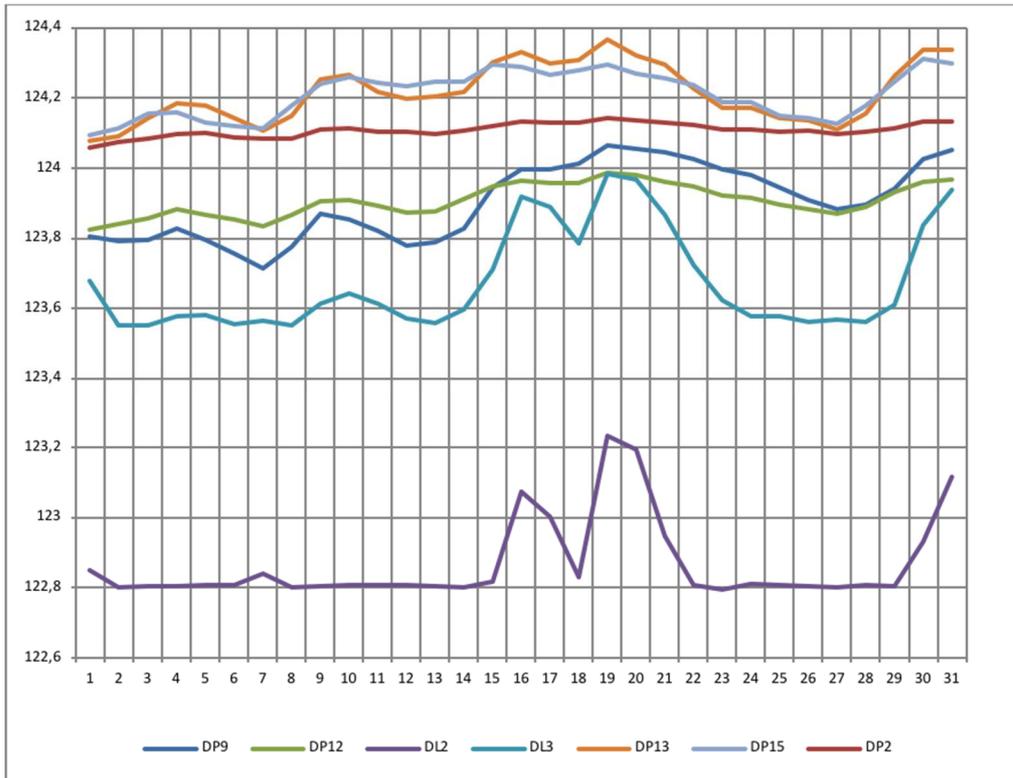


Figure 111 : Niveaux d'eau du 1er au 31 janvier 2015 au Moulin du Désert. Groupe 3

- **Groupe 4** : il comprend les piézomètres situés en marge du lit majeur et dont les niveaux d'eau influencés par les apports de versant, sont supérieurs à ceux de la Sarthe et à ceux mesurés aux autres points.

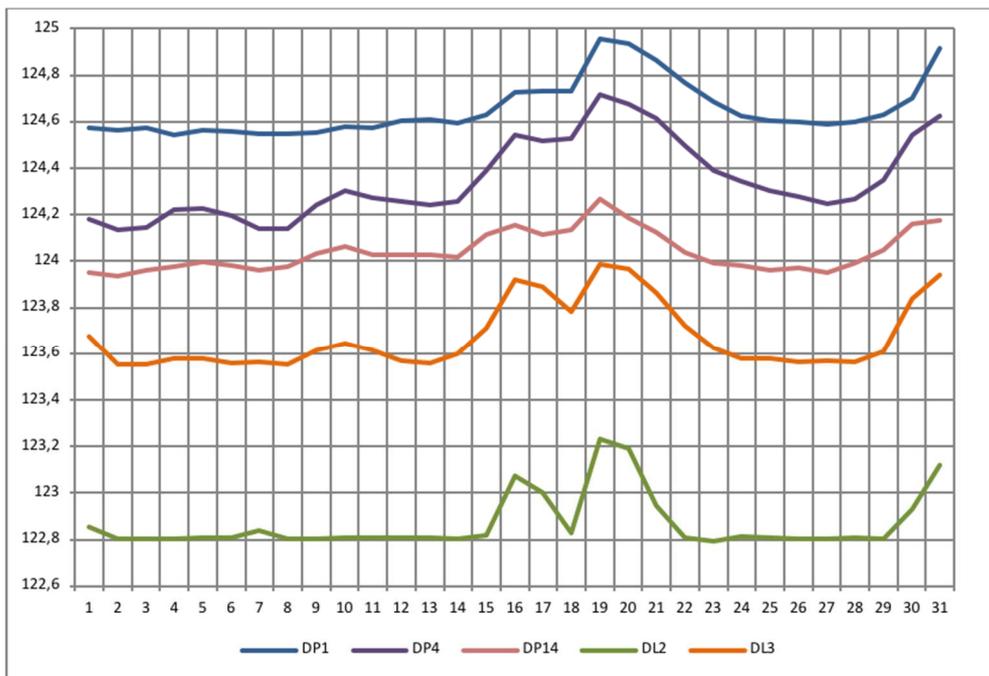


Figure 112 : Niveaux d'eau du 1er au 31 janvier 2015 au Moulin du Désert. Groupe 4

En Juin 2015, tous les niveaux d'eau réagissent globalement de la même manière. Dans le détail les comportements spécifiques font apparaître d'autres influences. DP12 est influencé par le drainage du versant et réagit "fortement" à l'épisode pluviométrique du 12 juin. DP 6, 8, 7, 5 ont des niveaux bas, déjà notés en janvier, influencés par celui de la Sarthe en aval du barrage (DL2). Comme en janvier, DP1 présente le niveau de nappe le plus élevé (afflux de l'eau d'une petite nappe de versant ?).

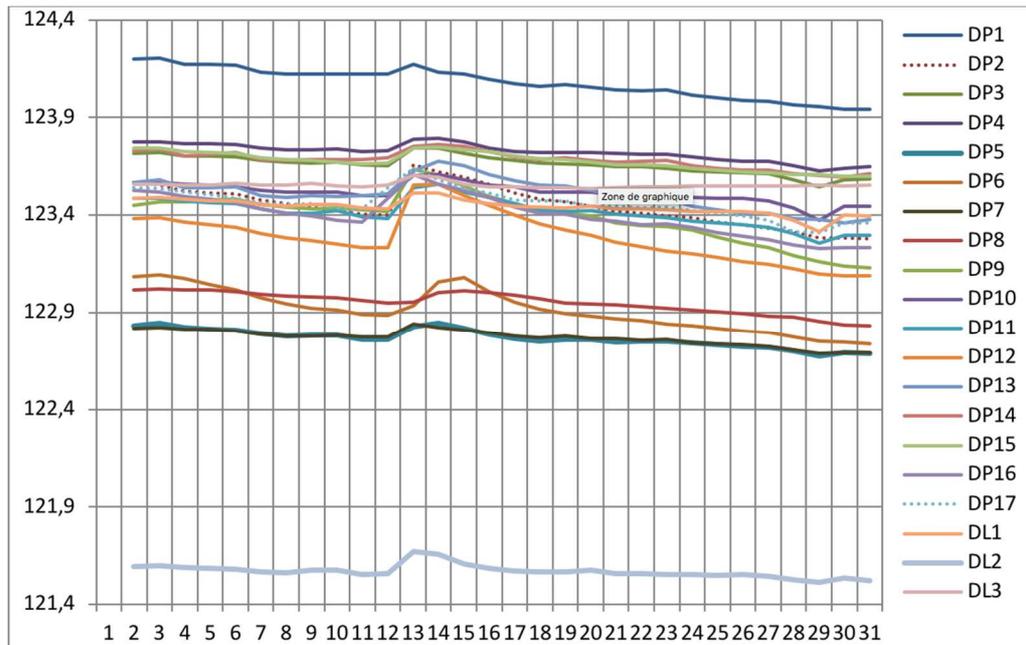


Figure 113 : Niveaux d'eau du 1er au 30 juin 2015 au Moulin du Désert

En Août 2015, les niveaux d'eau sont sub-parallèles les altitudes sont inférieures à celles de juin mais les points occupent la même place.

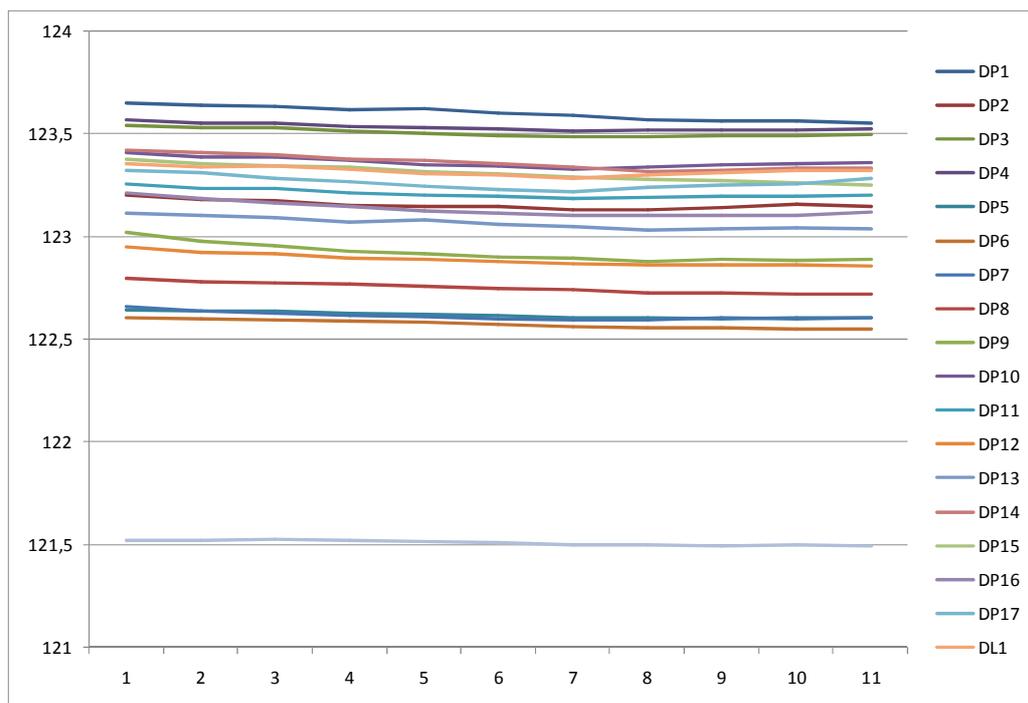


Figure 114 : Niveaux d'eau du 1er au 11 août 2015 au Moulin du Désert

Comme à Hauterive, en dehors des périodes de pluie, les niveaux d'eau réagissent à l'évapotranspiration (Figure 115).

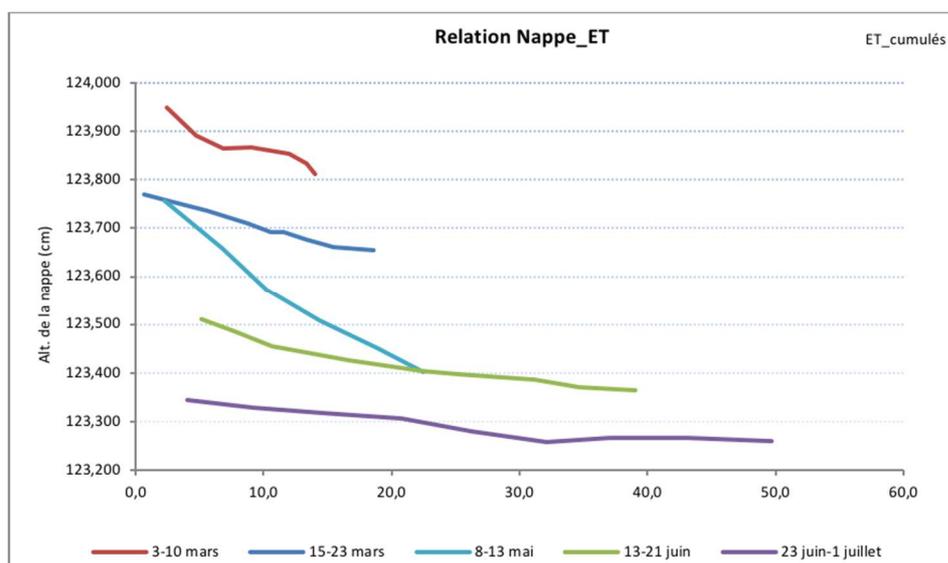


Figure 115 : Exemples de corrélation entre le niveau d'eau et l'ETP cumulée (Site du Moulin du Désert)

2.3.2.2 Variation du niveau de l'eau d'un point de mesure à l'autre

La Figure 115 suivante représente l'altitude du sol et celle de la nappe aux trois périodes précédentes dans l'ordre des N° de points.

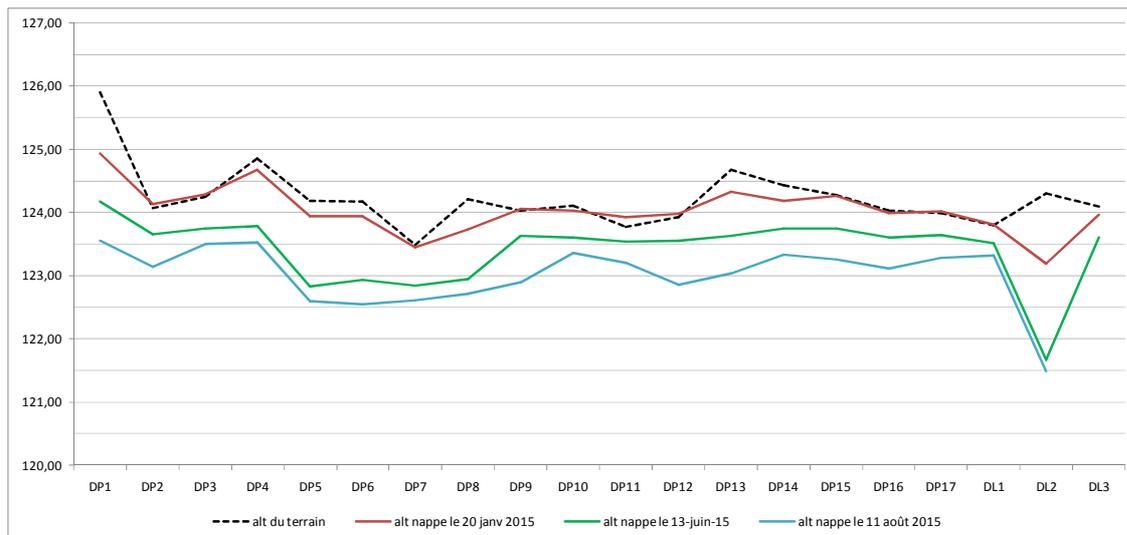


Figure 116 : Corrélation entre le niveau d'eau et l'ETP cumulée (Site du Moulin du Désert)

Les niveaux d'eau sont grossièrement parallèles. Les points 1, 4, 13, 14, et 15 présentent toujours les altitudes de nappe les plus élevées. Tous ces points sont en marge du lit majeur et sont influencés par les apports de versant. Les points 9, 10, 11, 12, 16, 17, tous situés en rive gauche de la Sarthe présentent des niveaux de nappe quasi horizontaux. Enfin les points 2, 3, 5, 6, 7, et 8 sont en rive droite et en aval du site.

Par rapport à la Sarthe en aval du barrage, les niveaux de nappe sont systématiquement plus élevés avec un écart de 1m correspondant à la hauteur du barrage et au dénivelé naturel.

Dans ce site du Moulin du Désert, le niveau de la nappe souterraine enregistre trois catégories d'influences :

- celle de la Sarthe relevée par le barrage. Les répercussions sont les plus évidentes en rive gauche où la pente est douce ;
- celle de la Sarthe en aval du barrage dont le niveau influence la nappe en rive droite dans la moitié aval du site ;
- celle des versants qui injectent dans la nappe des eaux de ruissellement direct ou de drainage, artificiel en rive gauche et naturel (source) en rive droite.

Finalement, l'étude de la dynamique des niveaux d'eau au cours de la période d'observation montre que le système nappe/Sarthe/barrage fonctionne selon des modes variés. D'un site à l'autre et à l'intérieur de chacun des sites les niveaux réagissent diversement aux apports des précipitations efficaces (P-ETP) et aux influences des barrages.

La nappe souterraine et la Sarthe semblent constituer ainsi des masses d'eau tantôt différenciées, tantôt associées.

Ainsi n'existe-t-il pas de mode unique de fonctionnement. Comme cela avait déjà été noté dans l'étude de la végétation du fond de vallée (1^{ère} partie), la commande saisonnière joue un rôle majeur dans la variation des niveaux d'eau.

3 Topographie du toit de la nappe et échanges nappe - rivière

Comme les niveaux de la nappe souterraine sont diversement influencés par les apports d'eau climatiques aléatoires qui s'additionnent à l'eau souterraine comme cela a été montré dans le paragraphe précédent, nous cherchons ici à :

- définir un niveau de base de la nappe en dehors des influences directes de ces apports ;
- mettre en évidence la topographie du toit de la nappe à partir de l'altitude des niveaux d'eau en hiver et en été ;
- expliquer ses caractéristiques à partir des échanges nappe-rivière influencés dans des proportions variées par les barrages.

Des coupes transversales et longitudinales à travers le fond de vallée ont été tracées en superposant les altitudes du terrain naturel, du toit de la nappe en hiver (BASE hiver) et en été (BASE été), des niveaux de la Sarthe à l'amont et à l'aval des barrages et enfin du toit de la nappe en février 2015 et en août 2015.

Sur ces coupes, les niveaux sont représentés schématiquement par des segments de droites qui servent à visualiser les situations. S'ils ne représentent pas la réalité (que seules des mesures plus serrées auraient pu identifier), ces coupes permettent malgré tout de mieux définir le caractère associé ou dissocié des deux masses d'eau, Sarthe et nappe.

3.1 Détermination des niveaux de base piézométriques

Cette détermination est faite à partir de l'application de la méthode du découpage des hydrogrammes utilisée en hydrologie pour séparer les eaux de ruissellement de celles des nappes souterraines. (Cosandey et Robinson 2000, Vernoux et al 2011). Ce niveau est atteint lorsque les apports directs d'eau liés aux précipitations sont évacués et que les niveaux redescendent aux altitudes les plus basses. Ils sont gonflés en hiver lorsque les nappes sont chargées et s'affaissent en été lorsque les nappes ont livré leur stock d'eau (absorption par l'ET et drainage par les cours d'eau). Dans la vallée de la Sarthe amont cette vidange n'est qu'exceptionnellement complète (Cf. 1^{ère} partie).

La Figure 117 donne un exemple de découpage d'hydrogramme isolant eaux de ruissellement (variations rapides des niveaux d'eau) et eaux de nappe (variations lentes).

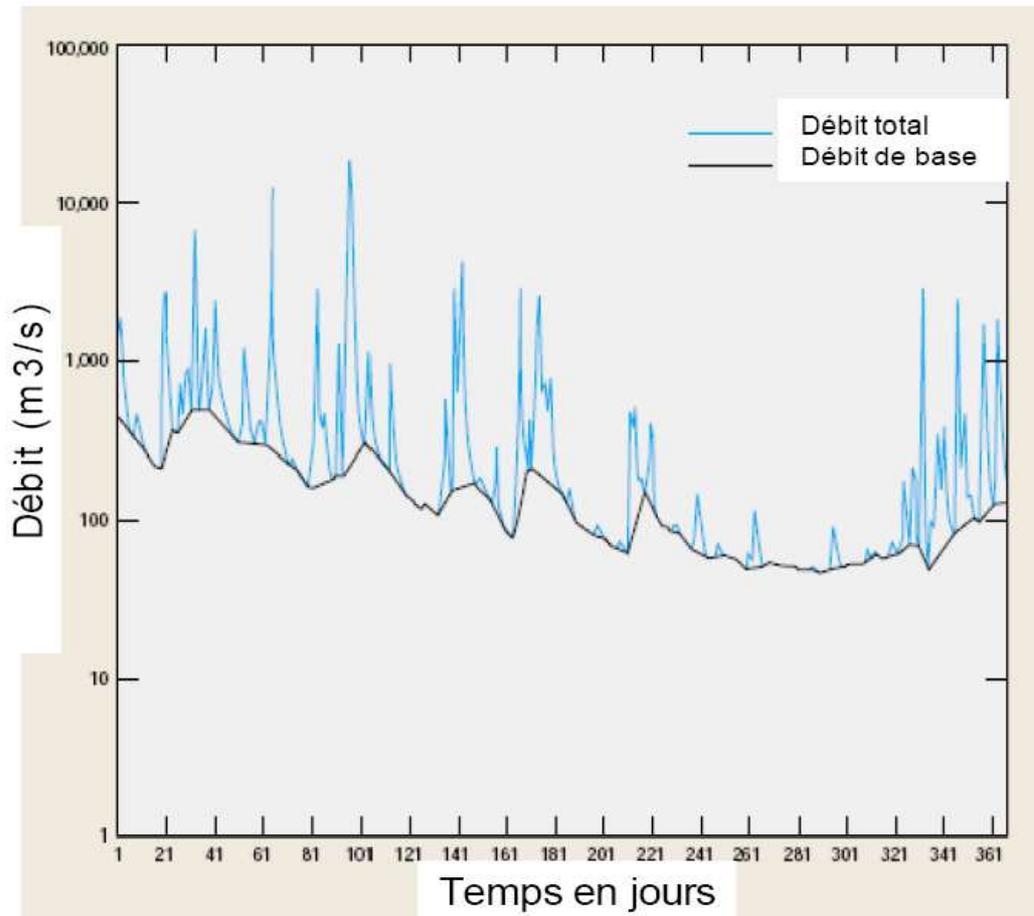


Figure 117 : Découpage de l'hydrogramme et niveau de base de l'écoulement (Vernoux et al. 2011)

Ces niveaux de base qui ondulent selon les saisons ont été repérés sur chacun des enregistrements effectués aux différents points de mesures. Leurs altitudes sont mentionnées dans le Tableau 31 qui comprend également l'altitude du terrain en chacun des points de mesures. Elles servent de repères pour mettre en évidence la topographie du toit de la nappe en été et en hiver.

Tableau 31 : Niveaux de base de la nappe alluviale dans les sites de mesures (altitudes en mètres)

N° points	Niveau de base hivernal	Niveau de base estival	Altitude du terrain
HP 1	135,1	134,18	135,83
HP2	135,25	134,23	135,82
HP3	134,75	134,11	135,65
HP4	135,74	135,21	135,96
HP5	135,82	134,78	135,79
HP6	135,4	134,44	135,98
HP7	135	134,43	135,75
HP8	135,62	134,92	135,88
HP9	135,5	134,61	135,94
HP10	135,65	134,64	135,95
HP11	135,6	134,64	135,7
HP12	135,6	133,99	135,80
HP13	135,6	134,09	135,81
DP1	124,51	123,51	125,89
DP2	124,05	123,1	124,06
DP3	123,81	123,48	124,24
DP4	124,1	123,44	124,85
DP5	123,19	122,58	124,18
DP6	123,34	122,53	124,16
DP7	122,8	122,55	123,48
DP8	123	122,69	124,21
DP9	123,67	122,88	124,03
DP10	123,4	123,31	124,10
DP11	123,5	123,17	123,77
DP12	123,81	122,82	123,92
DP13	124,08	123,01	124,67
DP14	123,89	123,30	124,43
DP15	124,09	123,21	124,27
DP16	123,58	123,11	124,03
DP17	123,48	123,20	123,98

Les Figure 118 et Figure 119 montrent comment et dans quelle proportions les niveaux piézométriques varient et à quelle profondeur ils se situent.

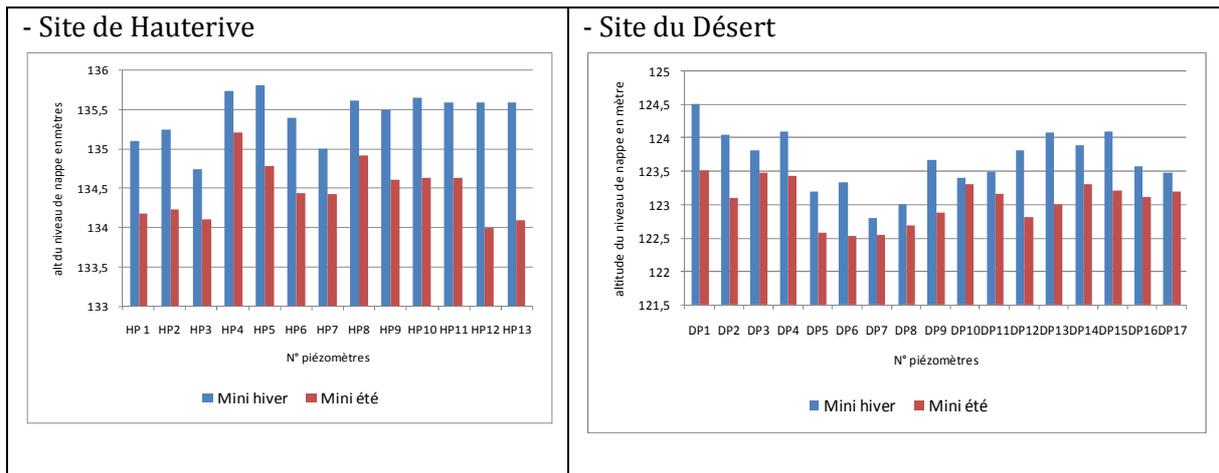


Figure 118 : Niveaux de nappe en saison hivernale et en saison estivale :

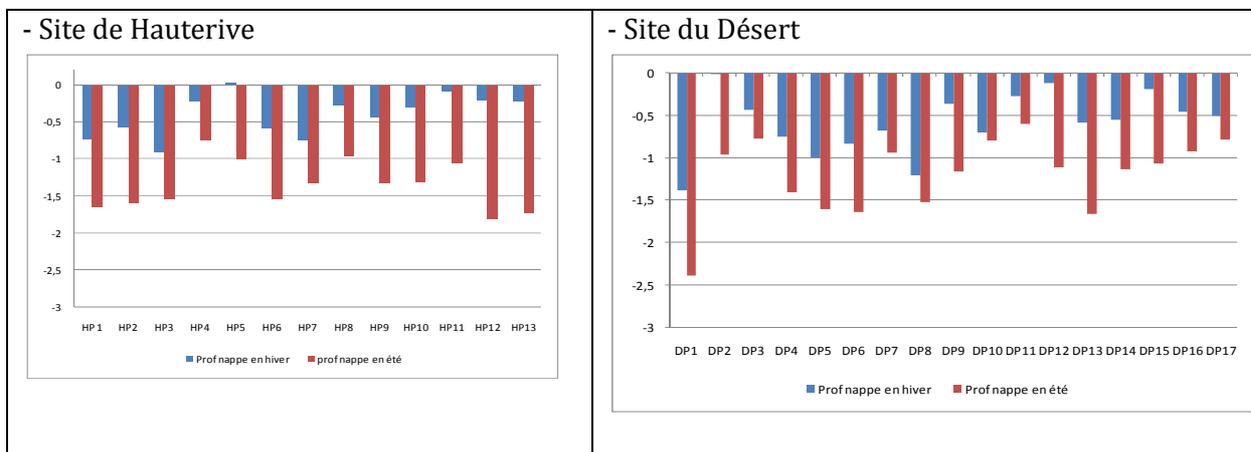


Figure 119 : Profondeur de la nappe en hiver et en été

Dans les deux sites, la nappe souterraine varie dans les mêmes proportions selon les conditions générales du climat et la saison. On note que :

- les niveaux de l'hiver sont globalement plus hauts à Hauterive qu'au Désert, ce qui détermine des conditions propices à une hydromorphie des sols, plus affirmée. Cette caractéristique déjà identifiée précédemment peut être liée à la pente du fond de vallée et aux matériaux du remplissage alluvial (plus grossiers au Moulin du Désert qu'à Hauterive) ;
- les niveaux de l'été sont proches dans les deux sites et se trouvent à environ 1,50 m sous la surface du sol. Ils sont déterminés par un déficit hydrique de même ordre de grandeur dans les deux sites.

Par ailleurs, notre analyse montre que dans chacun des sites, deux piézomètres sont implantés en marge du fond alluvial :

- au Moulin de Hauterive, il s'agit des piézomètres HP 12 et HP 13 qui présentent des contrastes saisonniers anormalement grands par rapport aux autres piézomètres. Ils sont implantés à l'écart des influences de la Sarthe et du barrage et ne réagissent qu'à l'impact de l'évapotranspiration et des précipitations.

- au Moulin du Désert, il s'agit des piézomètres DP1 et dans une moindre mesure DP 13, implantés un peu au-dessus du lit majeur dans la concavité du pied du versant de la vallée.

Des coupes topographiques (réalisées à partir des relevés Lidar) et piézométriques permettront de confirmer ces spécificités.

3.2 États du toit de la nappe à Hauterive

Le toit de la nappe représenté sur la Figure 120 comprend quelle que soit la saison, une forme similaire. On note :

- transversalement, une pente marquée, globalement perpendiculaire à la Sarthe, un bombement central et un creux autour du bras de contournement.
- longitudinalement, des contrastes moins affirmés avec cependant un abaissement régulier du niveau de la nappe, du bombement central vers l'aval.

Ces déformations sont diversement contrastées entre :

- l'été : le niveau de la nappe est soutenu par la Sarthe elle-même relevée par le barrage de Hauterive. Ailleurs les contrastes sont modérés, le bras de contournement a un impact en amont à proximité de la diffluence et en aval vers la confluence. Entre, le niveau est quasi horizontal
- l'hiver : le niveau de la nappe est relevé et les contrastes d'un piézomètre à l'autre sont atténués. Mais le bras de contournement bien incisé dans le lit majeur participe activement au drainage de la nappe.

Ces caractéristiques réagissent par ailleurs aux différentes conditions du milieu. La circulation superficielle de l'eau dans le lit majeur influencée par les microtopographies d'origine naturelle ou façonnée par les aménagements successifs ; elles provoquent ou entretiennent la stagnation ou la vidange accélérée ou retardée de l'eau (débordement de la Sarthe, apports pluviométriques), et influencent la variation du niveau piézométrique, en lien également avec la composition et la stratification des alluvions :

- anciens lits ou anciens bras de la Sarthe naturellement abandonnés lorsque s'instaure progressivement le climat tempéré actuel (environ - 10 000 ans) ou rectifiés au moment de la construction du barrage. Certains tronçons ont été exploités pour le passage du bras de décharge du barrage (aux abords du limnimètre 4),
- régalaie des berges en lien avec les curages du lit dont les matériaux ont pu surélever des bourrelets naturels de rive. Cela accroît la hauteur des berges ainsi que le débit à pleins bords et isolent du lit actuel, les anciens lits empruntés lors des crues,
- ancien chemin qui coupe perpendiculairement le lit majeur et des remblais divers...
- Ces microtopographies agissent également sur la diversité des cortèges floristiques qui seront étudiées dans le paragraphe suivant.

Les caractéristiques des alluvions qui comblent le lit majeur déjà évoquées plus haut. L'interprétation des résultats des analyses de sédiments montre, plus que les comportements originaux de la piézométrie, les chemins préférentiels de l'eau :

- fluctuations du niveau piézométrique plus affirmées au droit d'anciens chenaux comblés de graviers masqués vers la surface par au moins 1.50m de sédiments fins et qui guident la circulation actuelle de l'eau souterraine (cas des piézomètres HP 5, 7, 3 et 9) ;
- ailleurs du fait de matériaux plus fins, les circulations horizontales et verticales de l'eau sont ralenties.

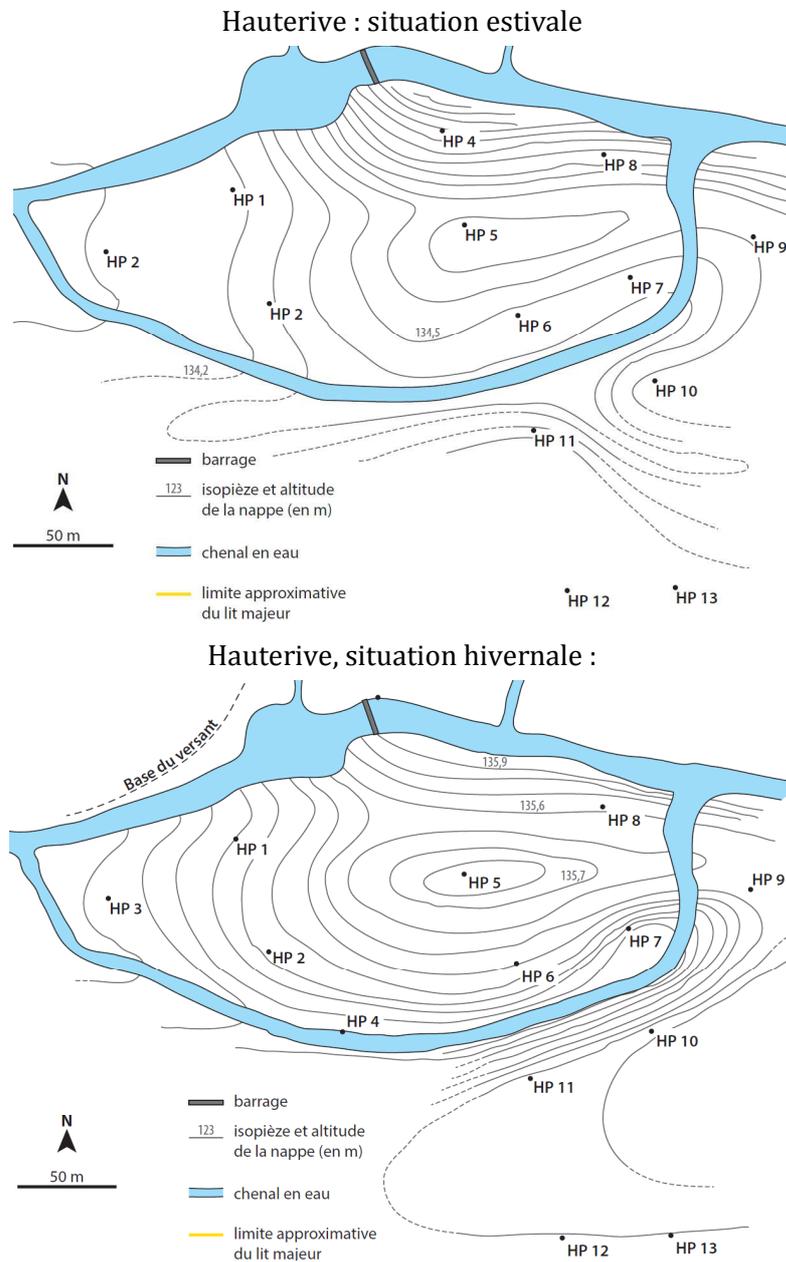


Figure 120 : Topographie du toit de la nappe à Hauterive

Les coupes transversales et longitudinales dont les tracés sont sur la Figure 121, établissent les liens entre les niveaux piézométriques et la Sarthe.



Figure 121 : Position des coupes transversales et longitudinales au Moulin de Hauterive

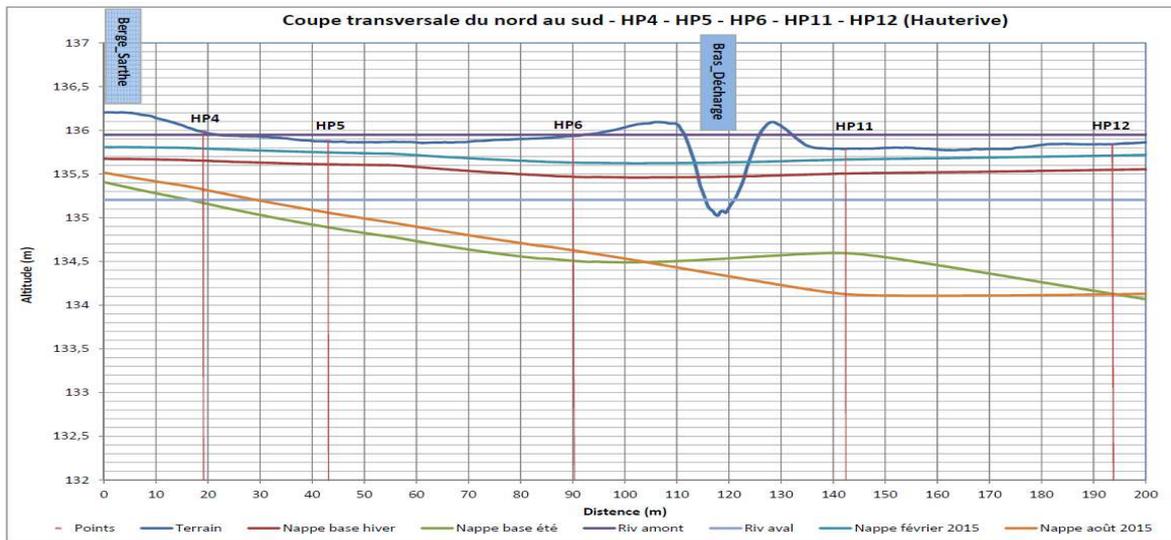


Figure 122 : Coupe transversale du nord au sud (du HP4 au HP12)

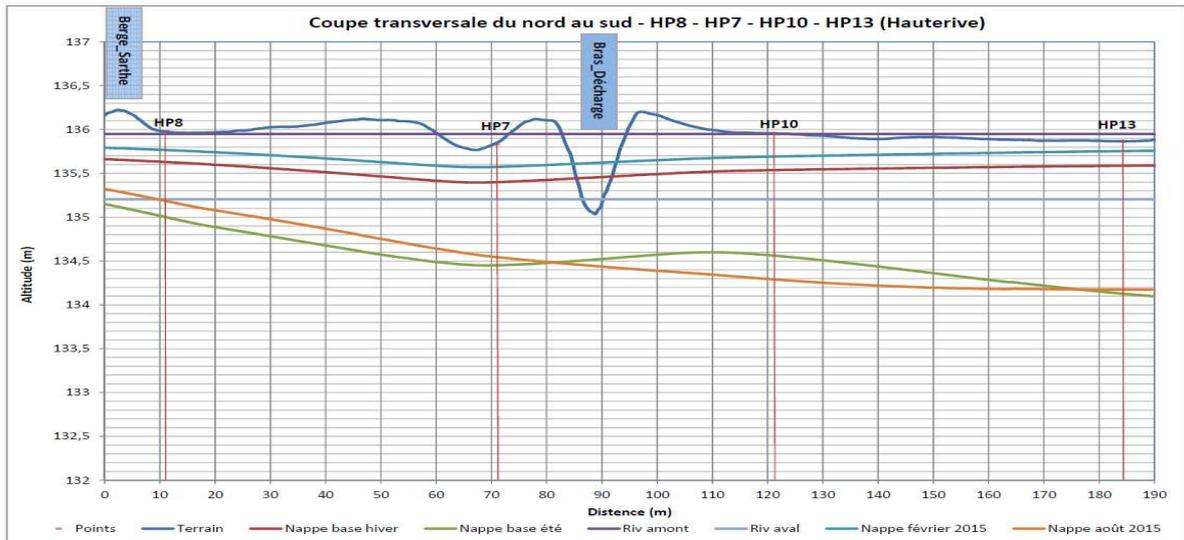


Figure 123 : Coupe transversale du nord au sud (du HP8 au HP13)

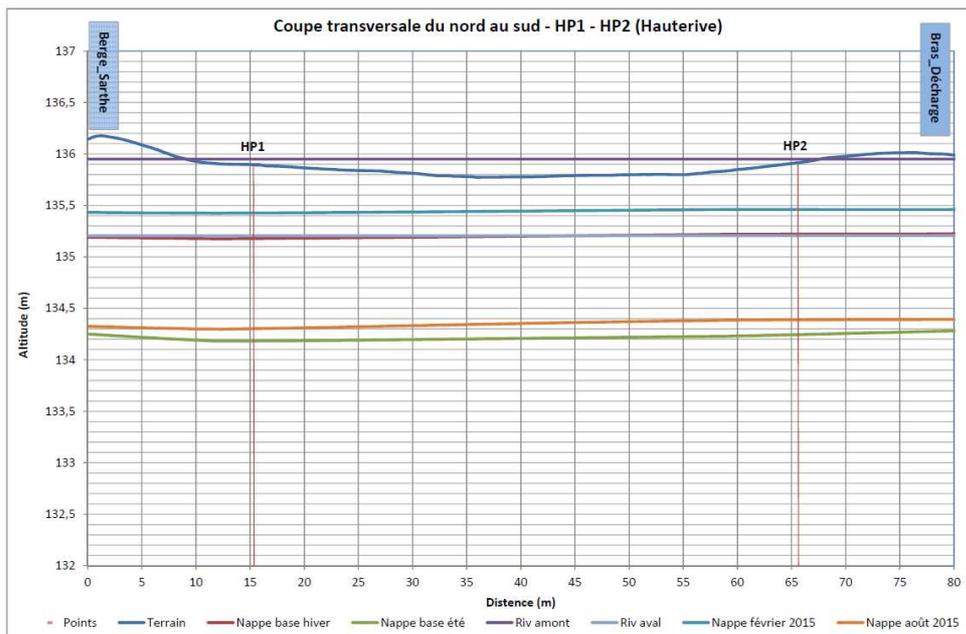


Figure 124 : Coupe transversale du nord au sud (du HP1 au HP2)

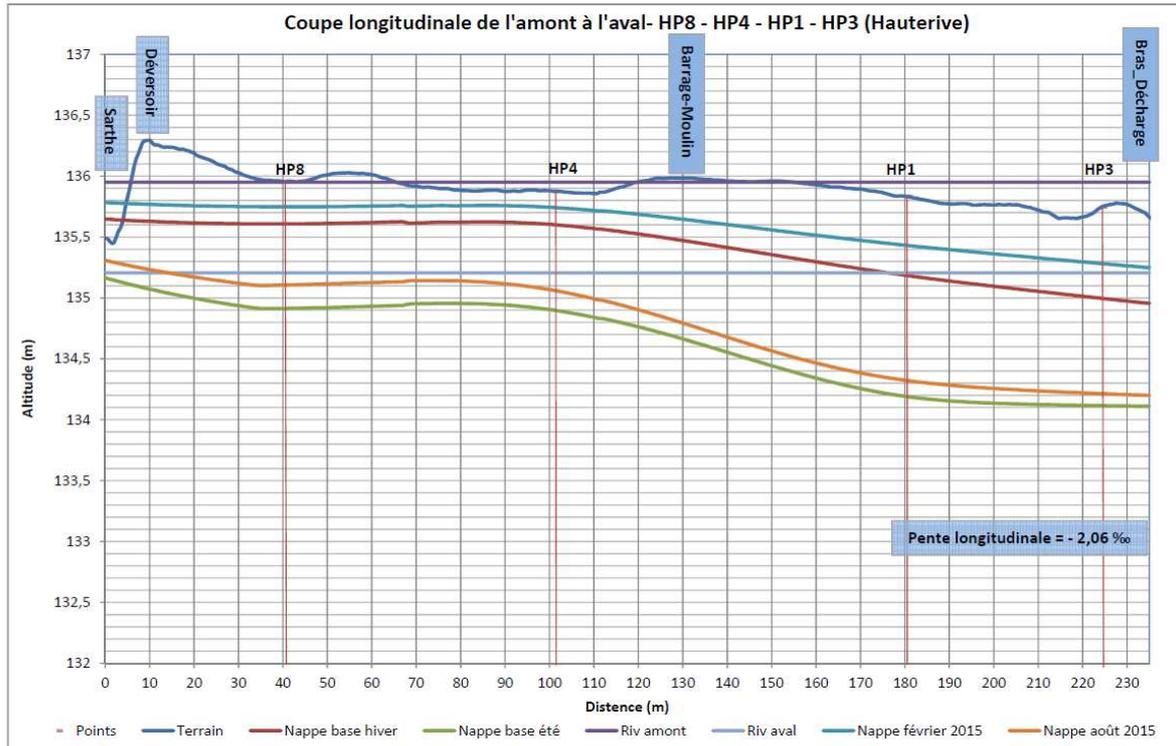


Figure 125 : Coupe longitudinale de l'amont à l'aval (est à l'Ouest) (HP8 au HP3)

Ces différentes coupes montrent que les masses d'eau Sarthe et nappe sont dissociées en été et partiellement associées en hiver :

- Le débordement de la Sarthe ou du bras de décharge peut submerger tous les piézomètres en hiver ;
- Le niveau de la rivière à l'amont du barrage est supérieur à celui de la nappe « BASE hiver » (le plus haut niveau de la nappe) ;
- Les niveaux « BASE hiver » et « BASE été » correspondent relativement aux niveaux février 2015 et août 2015.

Le niveau de la nappe dans les coupes transversale démontre que le bras de décharge joue légèrement le rôle d'un drain pour la nappe. La coupe longitudinale (Figure 125) démontre une direction de l'écoulement de la nappe de l'est vers l'Ouest.

3.3 États du toit de la nappe au Moulin de Désert

Comme à Hauterive, le toit de la nappe se modifie peu d'une saison à l'autre, mais au moulin de Désert, il est beaucoup plus irrégulier (Figure 126).

Transversalement, ce toit est fortement dissymétrique en lien avec la forme des versants de la vallée. On peut ainsi différencier 3 secteurs correspondant chacun à un tiers du fond de vallée :

- le 1/3 amont : en rive droite, la Sarthe longe la base du versant raide taillé dans le granite. En rive gauche, le lit majeur est large et les isopièzes montrent en saison hivernale, une lente remontée du niveau de l'eau souterraine, depuis la Sarthe (à 123,4m), jusqu'en limite de lit majeur (124,1m). En saison estivale, le niveau de l'eau comprend des irrégularités qui restent

à expliquer (creux autour de DH 9 non représenté sur la figure, bombement relatif en DH 10...). Au-delà, le niveau de l'eau est incliné vers la Sarthe. Les isopièzes dessinent un creux évasé, autour du point DP12, et ouvert sur la Sarthe (DP12 est en limite de parcelle peut être anciennement drainée ?).

- le 1/3 central comprend en rive droite une forte inclinaison du toit de la nappe comprimée entre la base du versant dont la Sarthe s'écarte un peu, et le lit mineur. La topographie du toit de la nappe ne se modifie pas entre l'hiver (altitude s'abaissant de 124,51 à 123,4 m soit de 1.11m) et l'été (altitude s'abaissant de 123.51 à 122.8 m soit de 0.71m). En rive gauche, le niveau de nappe remonte rapidement en hiver jusqu'au piézomètre DP 12 selon une pente régulière. En été, cette allure se modifie vers la Sarthe.
- le 1/3 aval présente une configuration complexe. On note en rive droite, un couloir déprimé inscrit dans le toit de la nappe (122.53m), ancien passage de la rivière avant rectification au moment de la construction du barrage ? La Sarthe occupe un "replat" à une altitude supérieure à celle de l'ancien passage (122.8m). En rive gauche, le niveau de la nappe remonte ensuite jusqu'au pied du versant qui redevient abrupt dans ce secteur. Cette configuration se maintient en été.

Longitudinalement, la nappe présente un toit gondolé :

- en rive gauche : on met en évidence, une altitude qui s'abaisse de 123.67 à l'amont à 123.58 à l'aval en hiver et de 123.31 (au point DP10, point DP9 non pris en compte) à 123.11 en été (sauf au point DP12 qui enregistre une légère surélévation de la nappe (123.81 m) en hiver (123.81m) et un affaissement (122.82m) en été).
- en rive droite, la nappe s'abaisse de 124,05 m (DP2) à 123.34m (DP6 influencé par ailleurs par l'ancien passage de la Sarthe) en hiver, et de 123.1m à 122.53m en été (aux mêmes points). Sur l'îlot, aux points DP7 et DP8, le niveau de la nappe varie relativement peu.

Comme à Hauterive, la configuration des niveaux d'eau enregistre plusieurs influences qui déterminent ces variations :

- influences du substratum granitique irrégulièrement incisé par la Sarthe (plancher imperméable sous les alluvions ? seuil naturel à l'entrée du site ?...);
- influence des conditions géomorphologiques : tracé de la Sarthe (anciens passages près de DP5 et DP6 et entre DP15 et 16, boucle recoupée près de DP9), texture et stratification des alluvions ;
- influences anthropiques : drainage des terrains agricoles situés en rive gauche de la rivière (drains perpendiculaires à la Sarthe entre DP12 et DP10 et entre DP17 et DP16, drain parallèle à la Sarthe jalonné par une rangée d'arbres, qui draine la base du versant en limite du lit majeur), modification probable du tracé de la Sarthe aux abords du barrage du Désert et relèvement du niveau d'eau de la rivière.

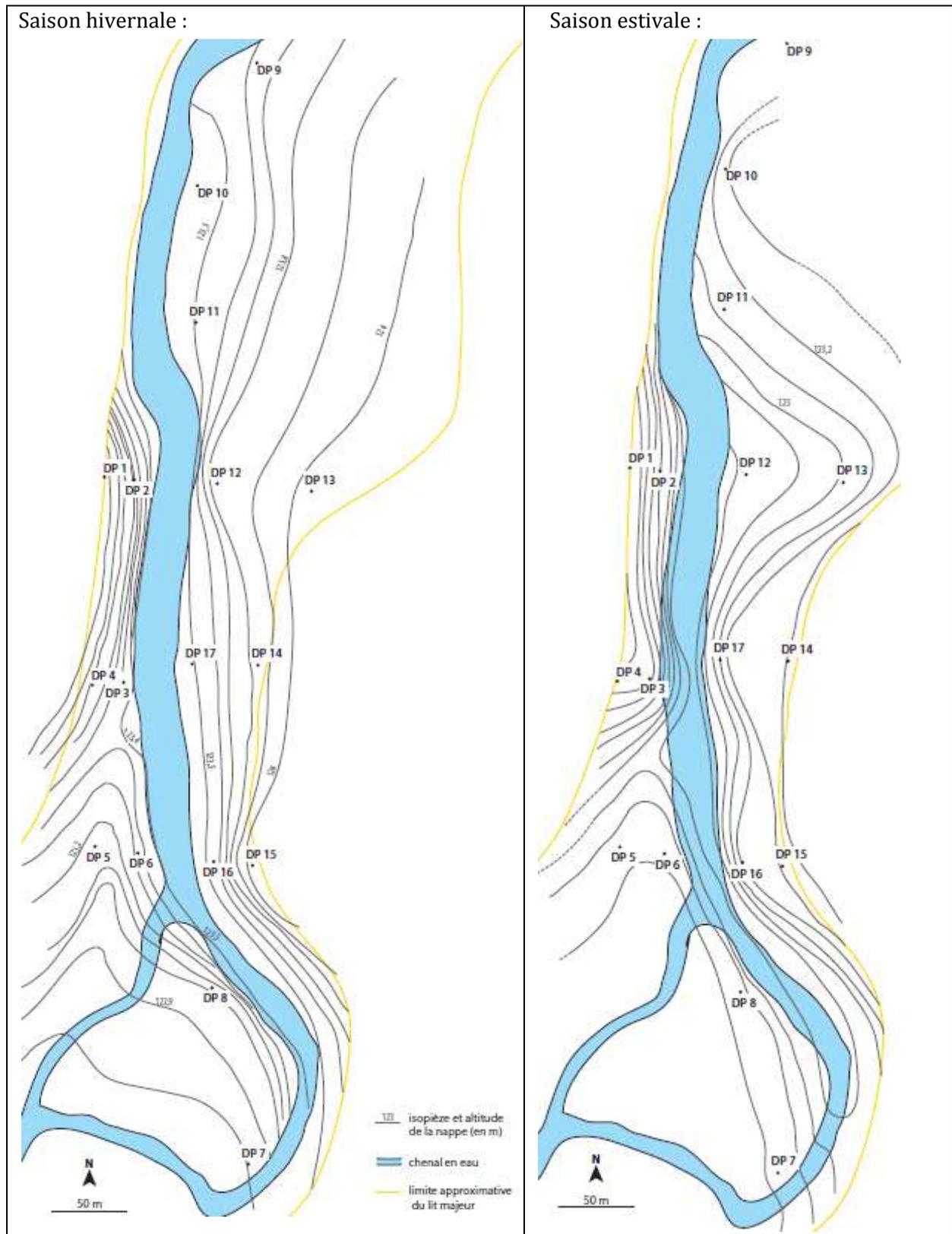


Figure 126 : Altitudes du toit de la nappe au Moulin du Désert

Comme au Moulin de Hauterive, les coupes transversales (de la rive droite à la rive gauche) et longitudinales représentent tous les niveaux d'eau (Figure 127 à Figure 132)



Figure 127 : Position des coupes transversales et longitudinales au Moulin du Désert

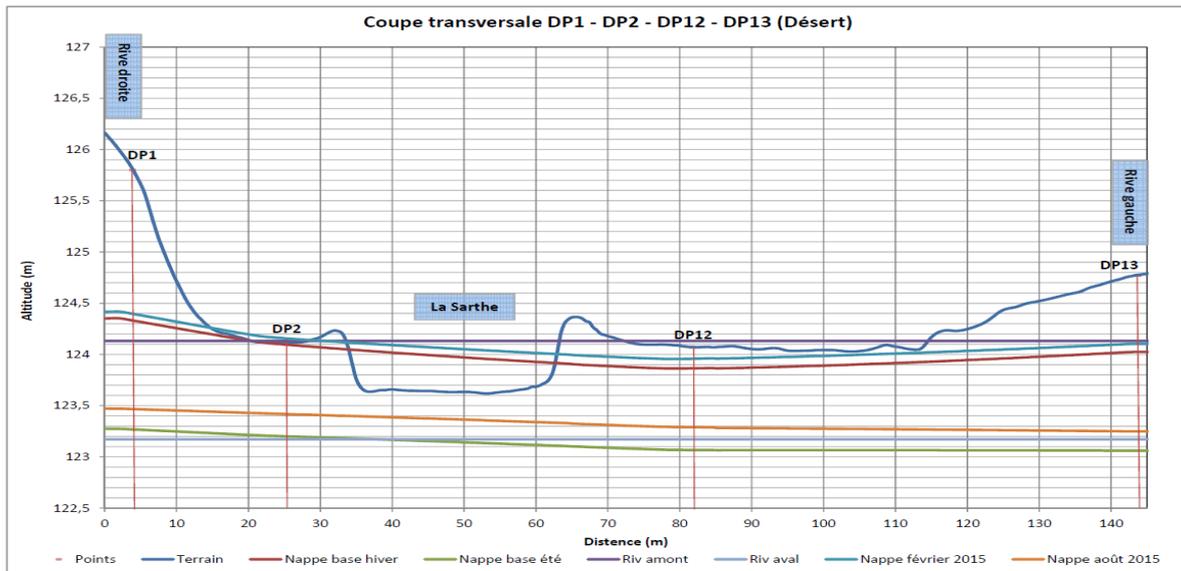


Figure 128 : Coupe transversale de DP 1 à DP 13

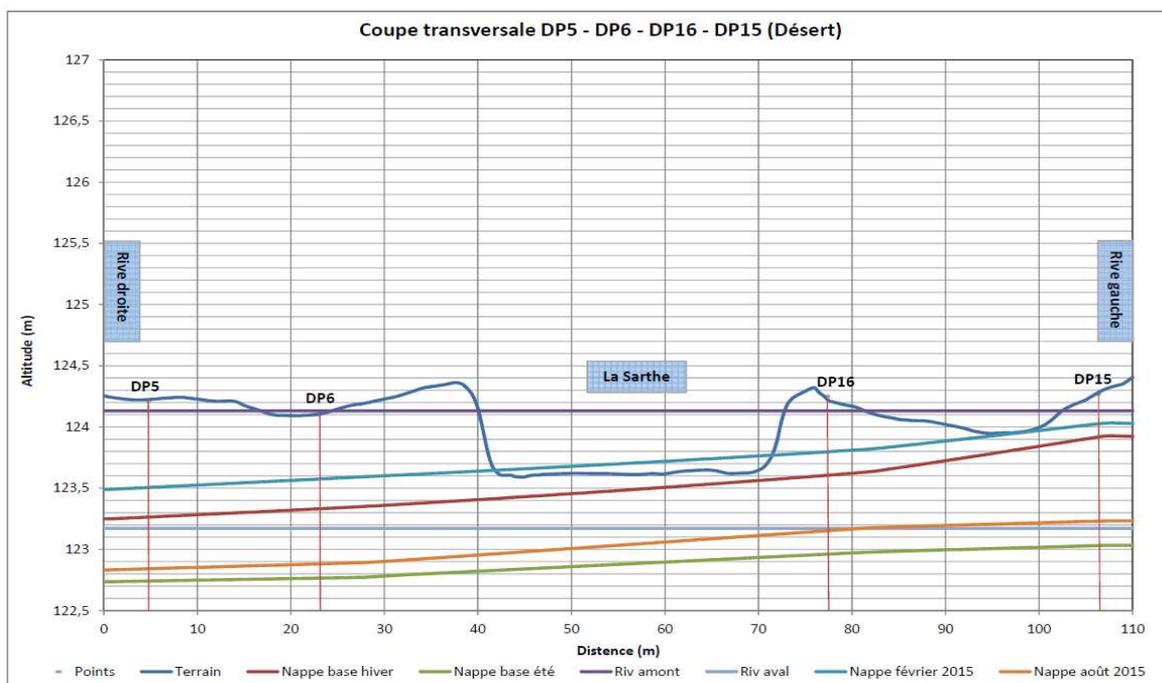


Figure 129 : Coupe transversale de DP 5 à DP15

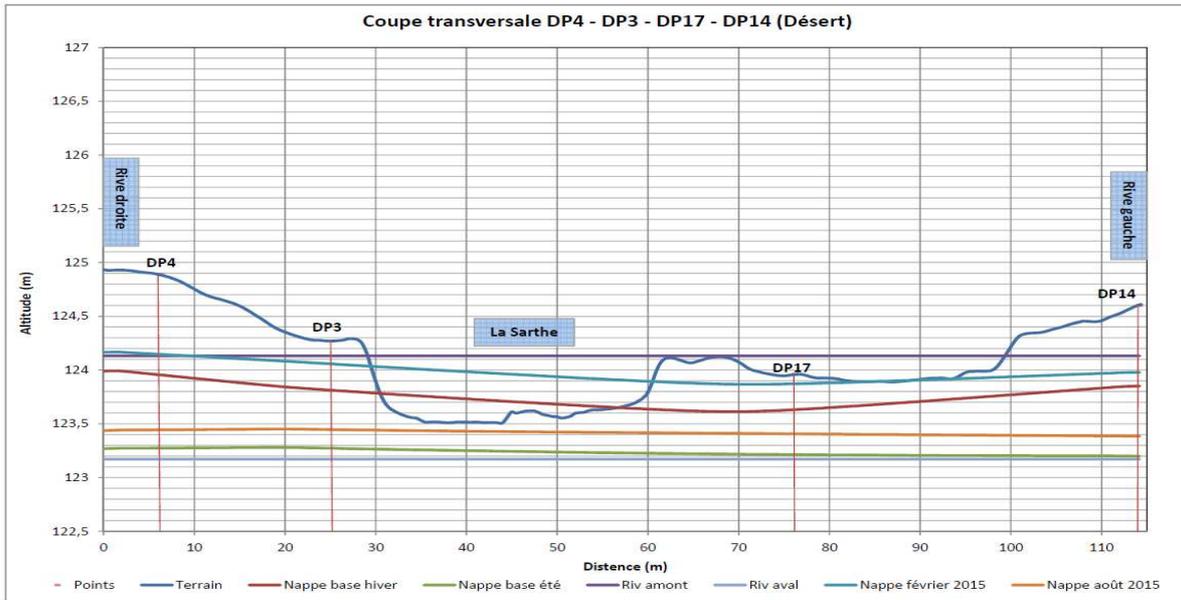


Figure 130 : Coupe transversale de DP 4 à DP 14

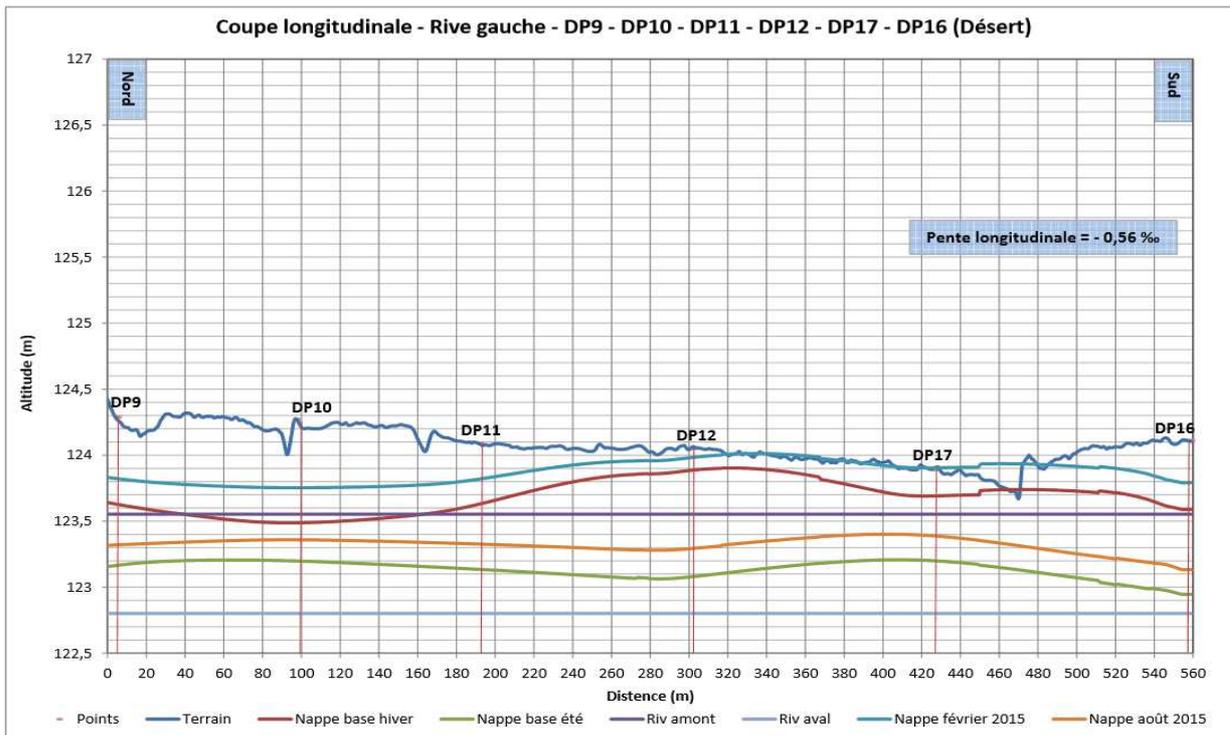


Figure 131 : Coupe longitudinale DP 9 à DP16 (rive gauche)

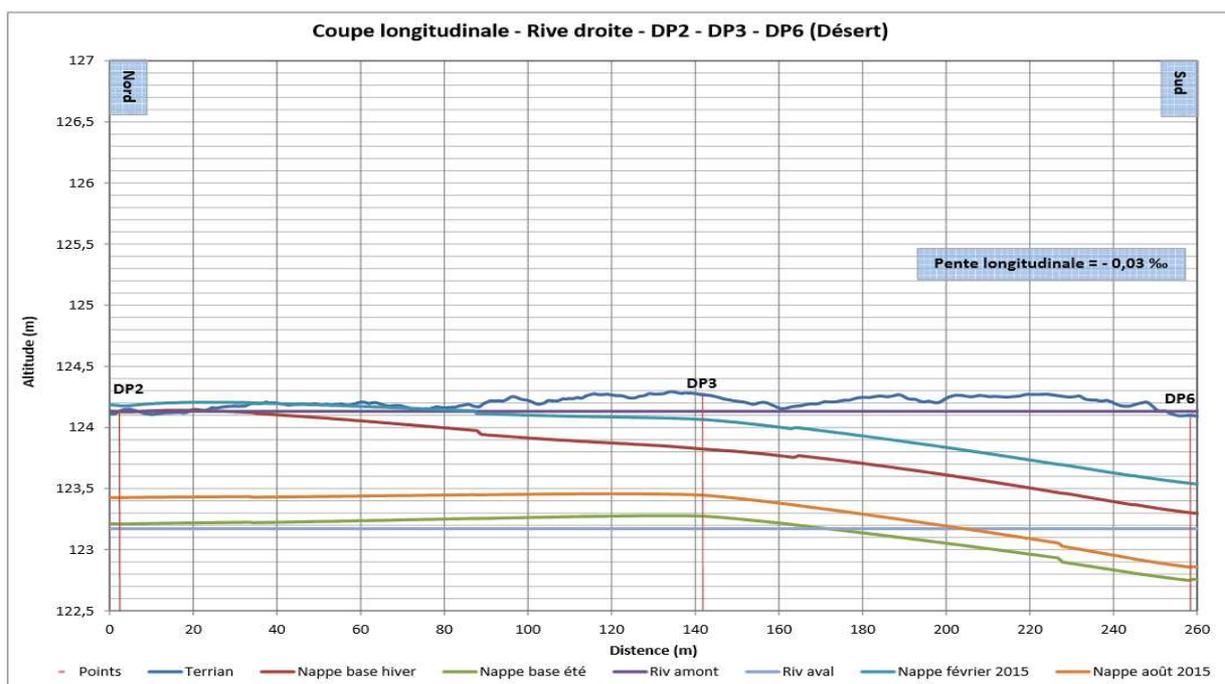


Figure 132 : Coupe longitudinale de DP2 à DP 6 (rive droite)

Selon les coupes transversales, les piézomètres DP1, DP4, DP13, DP14 et DP15 sont situés à l'extérieur de la zone humide du moulin du Désert. En cas du débordement de la Sarthe, les piézomètres DP2, DP3, DP12 et DP17 seront submergés par la lame d'eau.

Les coupes transversales démontrent que la rivière intercepte la nappe en hiver et le sens des échanges nappe-rivière varie selon le tronçon. Par exemple, selon la coupe transversale 9-15, la nappe alimente la rivière par la rive gauche et la rivière alimente la nappe par la rive droite.

La coupe longitudinale 9-16 montre bien l'effet des deux drains (à côté du DP10 et DP17) sur la forme de la nappe (niveau affaissé et surélévation relative en entre les deux drains). Par ailleurs, la coupe longitudinale 2-6 met en évidence une direction de l'écoulement souterrain parallèle à la direction de l'écoulement dans la rivière.

Comme cela a déjà été dit, il est difficile de détecter un mode unique de fonctionnement du système Sarthe-nappe-barrage. Les échanges nappe rivière sont complexes. Ils sont déterminés globalement par les conditions hydriques saisonnières qui commandent les mouvements verticaux de l'eau entre la surface et la nappe :

- pompage par l'ET ;
- infiltration de l'eau des précipitations et de la Sarthe lorsque la rivière déborde.

Peuvent participer également à ces mouvements, l'eau de nappes plus profondes séjournant dans le substratum encaissant, mais ces apports n'ont pas pu être mis en évidence.

Les échanges horizontaux d'eau sont encore plus difficiles à détecter :

- A Hauterive, les matériaux insuffisamment perméables contribuent très peu aux échanges nappe rivière. Ceux-ci doivent intervenir sur des pas de temps plus longs que la saison.
- Au Moulin du Désert, il est probable que ces échanges soient masqués par les circulations amont-aval, stimulées par la pente longitudinale du fond de vallée ce qui masque les échanges transversaux.

On montre ainsi que ce sont surtout les effets de sites qui permettent de comprendre la configuration des niveaux piézométriques et finalement l'alimentation des zones humides. Tant à Hauterive qu'à Désert, barrage et éloignement du lit de la Sarthe semblent en être les facteurs majeurs. Par ailleurs, notre analyse montre aussi que ces facteurs n'agissent que sur de petites superficies. Elles sont de l'ordre d'un hectare au maximum d'après les cartes piézométriques et les coupes. Au-delà ce sont les échanges verticaux qui commandent les mouvements de la nappe souterraine ainsi que les microtopographies qui « accidentent » le fond de vallée. Ces dernières, fréquentes dans le fond de la vallée de la Sarthe, permettent que les sites où les conditions favorables aux zones humides sont réunies, soient nombreux. Cela a déjà été montré dans la première partie de ce rapport.

3.4 Impact de l'abaissement du barrage au site du Moulin de Hauterive

Nous évoquons dans ce paragraphe une situation particulière qui illustre les réactions de la nappe à un abaissement du niveau de la Sarthe. Les données demandent cependant à être confirmées par l'étude d'autres situations similaires.

Grâce à un dysfonctionnement de la vanne du barrage au moulin de Hauterive au mois de juin 2016, on a eu un rabattement du niveau de la Sarthe à l'amont du barrage. Ce rabattement se déclenche le 4 juin (altitude de la rivière à HL1 = 135,94 m) et arrive à son minimum au 10 juin (altitude de la rivière à HL1 = 135,21 m). Ensuite le niveau monte progressivement jusqu'au 12 juin (altitude de la rivière à HL1 = 135,92 m) pour atteindre le niveau antérieur au rabattement. Selon ces données, la rivière varie de presque 70 cm en 8 jours. Par ailleurs, au cours de cette période il est tombé 16 mm de pluie sur le site. Ces conditions ont entraîné une variation moyenne du niveau de la nappe dans les piézomètres de 64 cm, avec un minimum du 54 cm pour HP4 et HP8 et un maximum de 74 cm pour HP2. La nappe descend donc autant que la rivière.

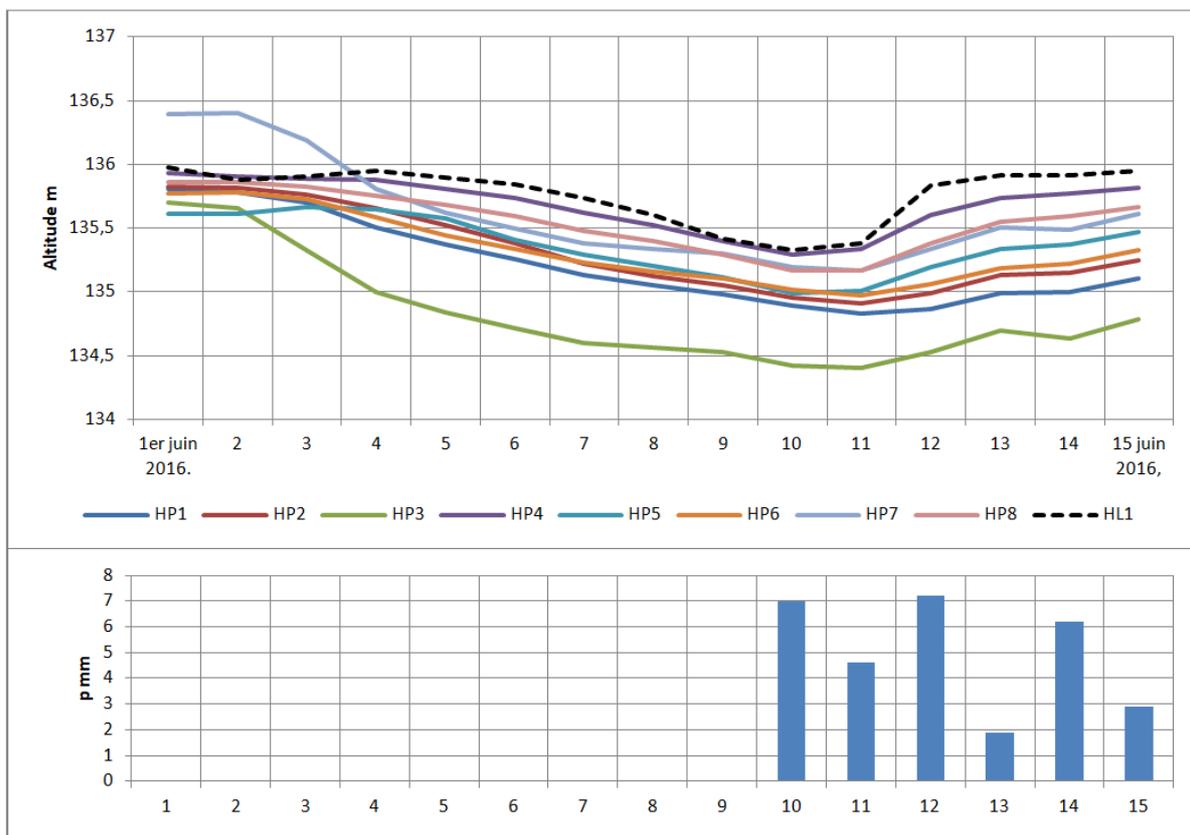


Figure 133 : Variations des niveaux d'eau du 1^{er} au 15 juin 2016 au moulin de Hauterive

Afin de pouvoir faire une comparaison sur la cause de la réaction de la nappe, on a choisi une période de 8 jours entre le 1^{er} et 15 mai 2016. Il tombe également 16mm de pluie sur le site. L'altitude de la rivière en HL1 est proche de celle du mois de juin et varie de seulement de 3 cm. La variation moyenne de la nappe dans les piézomètres pour cette période est égale à 10 cm avec un minimum du 10 cm pour HP07 et un maximum du 13 cm pour HP4 et HP5. Cette situation est commune puisque la nappe réagit aux conditions climatiques et que le niveau de la Sarthe est artificiellement stabilisé par le barrage.

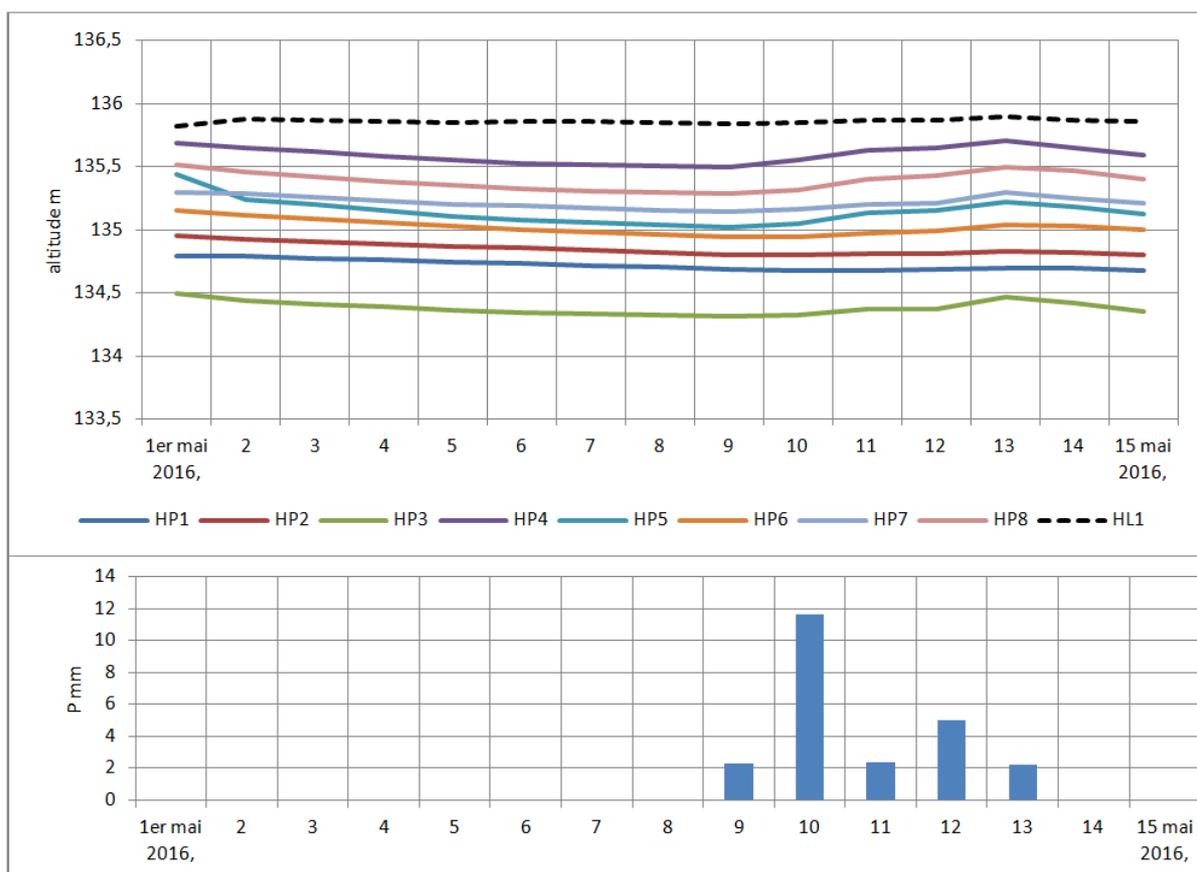


Figure 134 : Variations des niveaux d'eau du 1^{er} au 15 mai 2016 au moulin de Hauterive

La comparaison de ces deux périodes semble confirmer que la nappe est soutenue par la Sarthe et réagit par ailleurs aux précipitations. Mais elle montre également, ce qui n'a pas pu être mis en évidence précédemment qu'elle est très réactive aux variations du niveau de la Sarthe malgré la faible perméabilité des sédiments du fond alluvial.

On en déduit que la variation brusque de la rivière peut rabattre la nappe. Quantitativement, la corrélation est linéaire avec une pente égale à 1. Comme la hauteur du barrage est égale à 1,30 m, il est probable qu'avec l'arasement du barrage, la nappe dans la zone humide soit rabattue au maximum 1,30 m et pas plus. Mais les données de juin 2016, plus qu'une ampleur du rabattement de nappe qu'il faudrait examiner plus en détail à partir d'autres cas, mettent en évidence un mécanisme que des conditions spécifiques ont permis de déceler.

Les répercussions de l'arasement du barrage sur les formations végétales et la faune seront importantes. Mais elles ne semblent pas devoir suffire pour faire disparaître la zone humide. Vues les caractéristiques du fond alluvial et en particulier la texture limono-argileuse du sol une frange capillaire s'établira jusqu'à proximité de la surface du sol et permettra toujours qu'une zone humide pour la faune et la végétation se maintienne.

Conclusion :

Ainsi existe-t-il bien deux mécanismes superposés qui régissent les variations des niveaux d'eau à chaque épisode pluviométrique :

- un échange aquifère / rivière proximal, mis en évidence par l'épisode de l'ouverture du barrage en juin. Mais il faut rester prudent ; l'effet observé avec 0.70m de rabattement du niveau d'eau ne serait pas forcément plus grand dans le cas d'un rabattement de 1m de la rivière,
- un échange distal entre le bassin versant et l'aquifère alluvial par temps de pluie qui est mal connu. L'eau de la nappe comme l'ont indiqué les résultats des analyses physico-chimiques, ne vient pas seulement de la Sarthe. Une partie provient du bassin versant et rejoint la nappe sans transiter par la rivière.

Ces deux mécanismes sont combinés et participent dans des proportions variées à l'hydromorphie des sols et ainsi à la formation et à l'entretien des zones humides, associées à des barrages ou non.

4 Analyse de la végétation à l'échelle des sites

Les caractéristiques phyto-écologiques au droit des deux sites d'études ont été établies à partir des données collectées sur les terrains étudiés en 2014 et 2015 (Annexe II.10). Elles ont été collectées et mises en forme par le bureau d'études Biotope (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

4.1 Étude phyto-écologique des zones humides sur les sites

Sur les deux sites d'études, un inventaire complet des cortèges floristiques par la méthode phytosociologique sigmatiste, au niveau de l'association a été réalisé par le bureau d'étude Biotope. Une cartographie précise des habitats prairiaux complète l'ensemble de l'analyse phytosociologique.

4.1.1 Méthode d'inventaire et de cartographie (Annexe II.10)

Les relevés sont localisés au GPS, facilitant ainsi un suivi diachronique des habitats prairiaux. Deux passages ont été réalisés par des botanistes phytosociologues (Damien Avril et Pierre Agou) en mai 2014 puis en juin 2015.

La nomenclature des plantes à fleurs et des fougères utilisée dans cette étude est TAXREF v8.0 (MNHN 2014). Les habitats naturels ou semi-naturels sont identifiés selon le prodrome des végétations de France avec les correspondances vers la typologie Corine biotopes et la typologie EUNIS (typologie européenne remplaçant la typologie Corine biotopes) pour tous les habitats, ainsi que la typologie Natura 2000.

L'identification des habitats naturels se base sur la réalisation de relevés phytosociologiques (relevés d'espèces par habitat avec attribution d'un coefficient d'abondance/dominance). Les relevés phytosociologiques ont été réalisés selon la méthode préconisée par le Conservatoire botanique national et le MNHN et complétés par une photographie de la station et des plantes caractéristiques. Il s'agit d'un relevé phytosociologique complet portant sur l'aire minimale appropriée.

Sur le terrain, la végétation (par son caractère intégrateur synthétisant les conditions de milieu et le fonctionnement de l'écosystème) est considérée comme le meilleur indicateur de tel habitat naturel et permet donc de l'identifier. Une reconnaissance floristique des structures de végétation homogènes a ainsi été menée sur l'ensemble de l'aire d'étude afin de les rattacher aux typologies CORINE BIOTOPES, EUNIS et EUR28 à l'aide des espèces végétales caractéristiques de chaque groupement végétal. La cartographie des habitats a utilisé les fonds IGN scan25 et l'orthophotographie aérienne.

Bien que la période de prospection soit la plus favorable à l'expression de la flore, il est à noter que certaines espèces fleurissent de manière éphémère très tôt en saison. Elles peuvent donc manquer aux inventaires estivaux. Lors du second passage en juin 2015, l'ensemble de la rive Est du site du Moulin du désert avait été fauché et une parcelle (sud-Ouest) du site du Moulin également. De ce fait, l'analyse de ces secteurs, s'est uniquement appuyée sur les relevés phytosociologiques réalisés en 2014.

Chaque habitat a fait l'objet d'au moins un relevé phytosociologique, à l'exception de certains habitats fragmentaires ou hors contexte prairial comme l'aulnaie/frênaie alluviale ou la mégaphorbiaie eutrophe alluviale présente en bordure de la Sarthe qui n'ont pas fait l'objet de relevé.

32 relevés phytosociologiques ont été réalisés sur les deux sites d'étude. L'ensemble des habitats prairiaux, des roselières et des cariçaies ont été caractérisés au niveau de l'association.

4.1.2 Résultats de l'inventaire

4.1.2.1 Description des habitats naturels et semi-naturels cartographiés

Le site du Moulin est constitué de 3 entités parcellaires. L'île comporte des formations végétales hétérogènes liées à la gestion mixte et plus ou moins extensive de la prairie. Les formations sont très eutrophisées plus ou moins enrichies en espèces de friche. La parcelle située à l'est est un ensemble à la topographie variable, traversée de chenaux et comportant de nombreuses dépressions. Cette parcelle est traitée en fauche dominante. Beaucoup moins eutrophe, elle comporte une forte diversité spécifique.

Enfin, la parcelle située au sud-ouest est de topographie uniforme, également gérée en fauche dominante.

Le site du Moulin du Désert est également constitué de 3 entités. En rive gauche, les formations prairiales s'organisent autour d'une dépression centrale très inondable. Ces formations sont traitées en fauche dominante. La rive Est, ainsi que l'île, de topographie uniforme, sont gérées exclusivement par un pâturage bovin.



Figure 135 : Milieux herbacées Moulin de Hauterive (à gauche) et Moulin du Désert (à droite) (Biotope 2014)

L'expertise des végétations a été réalisée sur les deux sites d'études. Plusieurs grands ensembles de végétations y sont recensés :

- Les végétations de prairies humides (Figure 136, Figure 137) ;
- Les roselières, cariçaies et mégaphorbiaies (Figure 138) ;
- Les autres habitats humides (Figure 139).



Gazon amphibie à Glycérie flottante © Biotope, 2014



Prairie très hygrophile à Eleocharide des marais et Oenanthe fistuleuse © Biotope, 2014



Prairie mésohygrophile à Orge faux-seigle et Ivraie vivace © Biotope, 2015



Prairie hygrophile à Sénéçon aquatique et Oenanthe à feuilles de Silaus © Biotope, 2015



Prairie hydrocline à Orge faux-seigle et Fromental © Biotope, 2015



Prairie fertilisée à Berce sphondyle et Brome mou © Biotope, 2015

Figure 136 : Les prairies humides à hydroclines dominées par la fauche



Prairie eutrophe à Ivraie vivace et Crételle © Biotope, 2015



Prairie piétinée à Ivraie vivace et Plantain à larges feuilles © Biotope, 2015



Prairie piétinée à Ivraie vivace et Potentille ansérine © Biotope, 2015

Figure 137 : Les prairies humides à mésophiles dominées par la pâture



Roselière à Baldingère et Iris des marais © Biotope, 2014



Cariçaie à Fausse Laiche aiguë © Biotope, 2014

Figure 138 : Les roselières et cariçaies



Figure 139 : Autres formations végétales humides

Les deux sites du Moulin et du Moulin du Désert présentent un ensemble de prairies hygrophiles à hydroclines inondables dont la composition spécifique est nettement influencée par la gestion agricole. Cependant la topographie, très variable selon les secteurs, est avant tout à l'origine de la diversité des types prairiaux développés.

Le site du Moulin de Hauterive (Tableau 32 ; Figure 140) présente des conditions physiques très variables selon les parcelles concernées. L'île, bien que de topographie relativement hétérogène, reste peu diversifiée, l'eutrophisation ayant tendance à uniformiser la composition spécifique.

En revanche la parcelle située à l'Est combine un ensemble de facteurs nettement favorable à une pleine expression de la biodiversité. La mosaïque de chenaux et de dépressions plus ou moins engorgés permettent l'existence de tous les types prairiaux (des plus hygrophiles au moins inondables) susceptibles d'être présents dans la plaine alluviale de la Sarthe. La gestion adaptée (eutrophisation limitée et fauche dominante) est de plus nettement favorable à une forte diversité spécifique.

**Tableau 32 : Synthèse des végétations sur l'aire d'étude du site du Moulin de Hauterive (8,27 ha)
(Biotope 2015)**

Nom de l'habitat	Syntaxon(s)	Corine Biotopes	EUNIS	Natura 2000	Surface (ha)	% de la surface totale de l'aire d'étude
Prairies						
Gazon amphibie à Glycerie flottante	<i>Glycerietum fluitantis</i>	53.4	C3.11	NC	0,12	1,39
Prairie très hygrophile fauchée à Eléocharide des marais et Oenanthe fistuleuse	<i>Eleocharito palustris-Oenanthetum fistulosae</i>	37.21	E3.41	NC	0,35	4,21
Prairie hygrophile de fauche à Séneçon aquatique et Oenanthe à feuilles de silaüs	<i>Senecioni aquatici-Oenanthetum mediae</i>	37.21	E3.41	NC	3,40	41,11
Prairie mésohygrophile mixte à Orge faux-seigle et Ivraie vivace	<i>Hordeo secalini-Lolietum perennis</i>	37.21	E3.41	NC	1,50	18,17
Prairie hydrocline mixte à Orge faux-seigle et Fromental	<i>Hordeo secalini-Arrhenatheretum elatioris</i>	38.22	E3.41	6510	1,82	22,06
Prairie de fauche fertilisée à Berce sphondyle et Bromes mou	<i>Heracleo sphondylii-Brometum mollis</i>	38.22	E2.22	6510	0,21	2,49
Roselières, cariçaies et mégaphorbiaies						
Roselière à Baldingère et Iris des marais	<i>Irido pseudacori-Phalaridetum arundinaceae</i>	53.16	C3.24B	NC	0,33	3,93
Cariçaie à Fausse Laïche aiguë	<i>Caricetum acutiformis</i>	53.2122	D5.21	NC	0,04	0,47
Cariçaie à Laïche des rives	<i>Galio palustris-Caricetum ripariae</i>	53.213	D5.21	NC	0,001	0,04
Mégaphorbiaies alluviales eutrophes	<i>Convolvulion sepium</i>	37.71	E3.4	6430	0,17	2,02
Fourrés arbustifs et boisements						
Aulnaies/frênaies alluviales	<i>Alnion glutinoso-incanae</i>	44.3	G1.21	91E0*	0,10	1,25
Haies et bosquets	<i>Crataego monogynae - Prunetea spinosae</i>	84.2	FA	NC	0,03	0,40
Autres habitats						
Eaux courantes	/	24.1	C2.3	NC	0,20	2,46



© Conservatoire National des Arts et Métiers - Tous droits réservés - Sources : ©IGN Geofila® (2010), Cartographie : Biotope, 2015

Figure 140 : Végétations observées sur le site du Moulin de Hauterive (Biotope 2015)

Végétations observées sur l'aire d'étude

-  Gazon amphibie à Glycerie flottante
-  Prairie très hygrophile fauchée à Eléocharide des marais et Oenanthe fistuleuse
-  Prairie mésohygrophile mixte à Orge faux-seigle et Ivraie vivace
-  Prairie hygrophile de fauche à Sénéçon aquatique et Oenanthe à feuilles de silaüs
-  Prairie hydrocline mixte à Orge faux-seigle et Fromental
-  Prairie de fauche fertilisée à Berce sphondyle et Brome mou
-  Prairie pâturée eutrophe à Ivraie vivace et Crételle
-  Prairie mésophile piétinée à Ivraie vivace et Plantain à larges feuilles
-  Prairie hygrophile piétinée à Ivraie vivace et Potentille ansérine
-  Roselière à Baldingère et Iris des marais
-  Cariçaie à Fausse Laïche aiguë
-  Cariçaie à Laïche des rives
-  Végétations pionnières estivales à automnales des sols exondés ou humides
-  Mégaphorbiaies alluviales eutrophes
-  Aulnaies/frênaies alluviales
-  Haies et bosquets
-  Plantations de Peupliers
-  Eaux courantes

Localisation des relevés phytosociologiques et leur numéro

- Localisation des relevés phytosociologiques et leur numéro

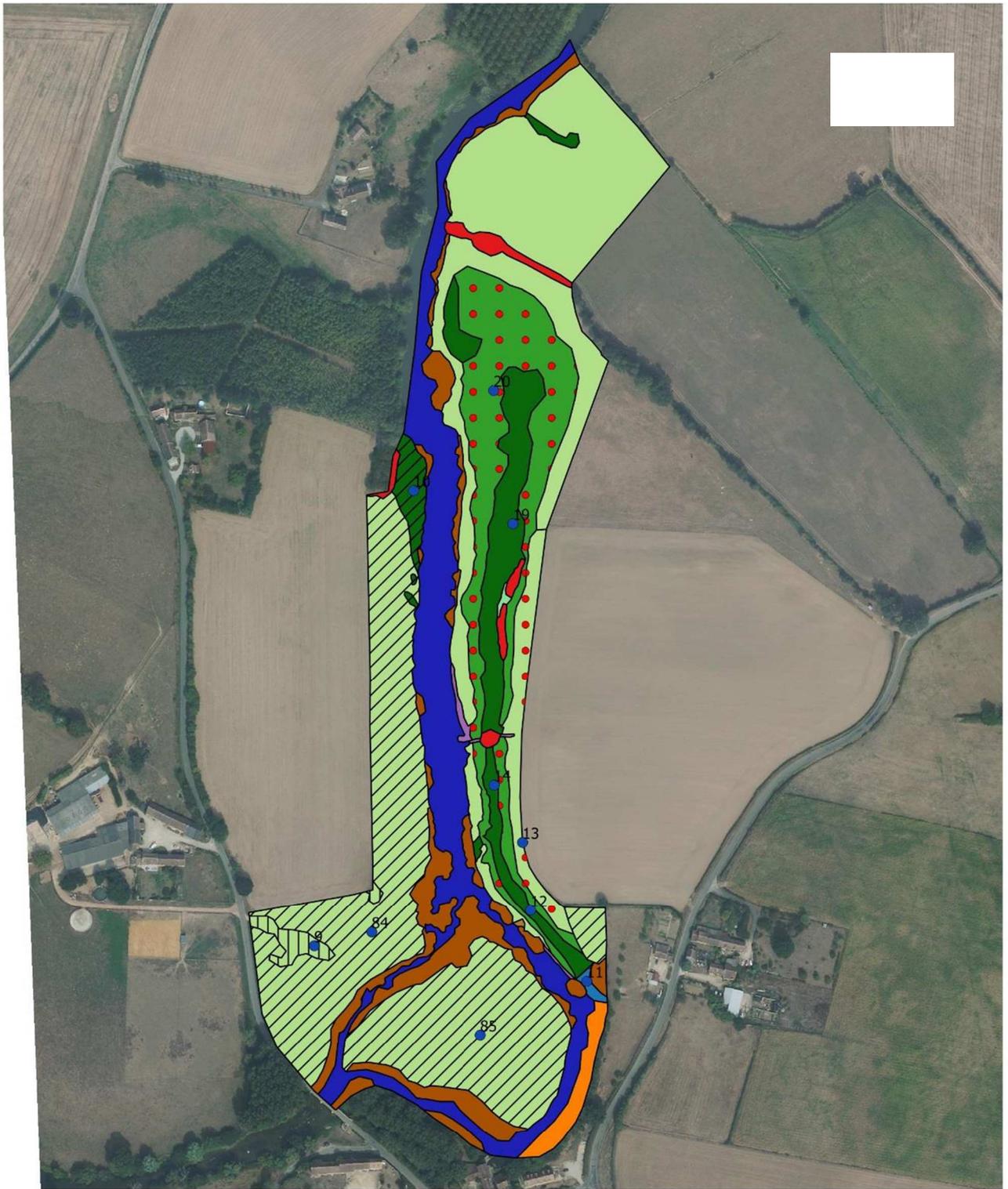
Figure 141 : Légendes des cartes de végétation (Biotope 2015)

Le site du Moulin du Désert (Tableau 33 ; Figure 142) présente en rive droite une dépression linéaire le long de la Sarthe occupée par une prairie très inondable. Les autres prairies hygrophiles à hydroclines s'organisent autour de cette dépression. Toutefois, la diversité spécifique reste modérée et les différents groupements ne s'expriment pas dans toute leur potentialité en raison de la gestion mixte de la rive droite.

La rive gauche ainsi que l'île, exclusivement pâturée présente des prairies à faible diversité spécifique. Seules les espèces les plus ubiquistes pouvant résister au piétinement et au tassement des horizons supérieurs.

Tableau 33 : Synthèse des végétations sur l'aire d'étude du site du Moulin du Désert (12,44 ha)

Nom de l'habitat	Syntaxon(s)	Corine Biotopes	EUNIS	Natura 2000	Surface (ha)	% de la surface totale de l'aire d'étude
Prairies						
Gazon amphibie à Glycerie flottante	<i>Glycerietum fluitantis</i>	53.4	C3.11	NC	0,01	0,08
Prairie très hygrophile fauchée à Éléocharide des marais et Oenanthe fistuleuse	<i>Eleocharito palustris-Oenanthetum fistulosae</i>	37.21	E3.41	NC	0,84	6,77
Prairie mésohygrophile mixte à Orge faux-seigle et Ivraie vivace	<i>Hordeo secalini-Lolietum perennis</i>	37.21	E3.41	NC	1,51	12,13
Prairie hydrocline mixte à Orge faux-seigle et Fromental	<i>Hordeo secalini-Arrhenatheretum elatioris</i>	38.22	E3.41	6510	2,50	20,07
Prairie de fauche fertilisée à Berce sphondyle et Brome mou	<i>Heracleo sphondylii-Brometum mollis</i>	38.22	E2.22	6510	0,35	2,84
Prairie pâturée eutrophe à Ivraie vivace et Crételle	<i>Lolio perennis-Cynosuretum cristati</i>	38.111	E2.11	NC	3,68	29,60
Prairie mésophile piétinée à Ivraie vivace et Plantain à larges feuilles	<i>Lolio perennis-Plantaginetum majoris</i>	38.1	E2.8	NC	0,11	0,89
Prairie hygrophile piétinée à Ivraie vivace et Potentille ansérine	<i>Lolio perennis-Potentilletum anserinae</i>	37.24	E3.44	NC	0,16	1,30
Roselières, cariçaies et mégaphorbiaies						
Cariçaie à Laïche des rives	<i>Galio palustris-Caricetum ripariae</i>	53.213	D5.21	NC	0,02	0,18
Mégaphorbiaies alluviales eutrophes	<i>Convolvulion sepium</i>	37.71	E3.4	6430	0,04	0,30
Végétations pionnières estivales à automnales des sols exondés ou humides	<i>Bidentetea tripartitae</i>	24.52	C3.53	NC	0,001	0,02
Fourrés arbustifs et boisements						
Aulnaies/frênaies alluviales	<i>Alnenion glutinoso-incanae</i>	44.3	G1.21	91E0*	1,06	8,51
Haies et bosquets	<i>Crataego monogynae - Prunetea spinosae</i>	84.2	FA	NC	0,16	1,29
Autres habitats						
Eaux courantes	/	24.1	C2.3	NC	1,83	14,70
Plantations de Peupliers	/	83.321	G1.C1	NC	0,16	1,31



© Conservatoire National des Arts et Métiers - Tous droits réservés - Sources : ©IGN GeoFla® (2015), Cartographie : B 2015



Figure 142 : Végétations observées sur le site du Moulin du Désert

4.2 Relation entre la végétation et le fonctionnement des zones humides

S. Dufour (LETG, Rennes 2) propose ici un essai de traitement de ces données avec pour objectif principal, moins de détecter l'influence des barrages sur la végétation que de voir comment cette végétation réagit à l'humidité à l'intérieur de chacun des deux sites.

4.2.1 Principe général

On peut rappeler que la distribution de la végétation dans une plaine alluviale dépend de nombreux facteurs : distance au chenal, position topographique, position et variation de la nappe d'accompagnement, nature et variabilité du substrat, nature et histoire des pratiques agropastorales, etc.

Afin de proposer des éléments de réflexion sur l'influence d'un ouvrage et de sa suppression dans le lit mineur sur la végétation de la plaine alluviale, nous avons, dans un premier temps, essayé de mettre en évidence l'importance relative de la nappe en faisant l'hypothèse que, parmi les facteurs de contrôle de la distribution de la végétation, il s'agit probablement du plus sensible à la suppression d'un ouvrage. Mais les travaux conduits sur l'ensemble de la vallée (1^{ère} partie) montrent que dans la réalité, cette distribution est complexe. Si un lien statistique peut être établi entre la distribution des communautés végétales et la nappe et s'il est possible d'évaluer quantitativement l'influence de la suppression sur la nappe (position et variation), il est théoriquement possible d'anticiper d'éventuelles modifications dans le recouvrement des différentes communautés végétales à l'échelle du site.

4.2.2 Méthode

Afin d'évaluer le rôle de la nappe dans la distribution des communautés végétale dans les deux sites de Hauterive et de Désert, une approche statistique a été mise en œuvre. Il s'agit de prédire les différentes modalités d'une variable à expliquer en fonction de variable explicative. Dans notre cas, la variable à expliquer est qualitative puisqu'elle correspond au type de végétation représenté par le syntaxon (Cf. Étude biotope Annexe II.10). Les variables explicatives retenues sont quantitatives : altitude relative (par rapport à la ligne d'eau lors du relevé Lidar), distance au chenal principal, amplitude de la variation de la position de nappe phréatique entre l'hiver et l'été, position moyenne de la nappe en été, position moyenne de la nappe en hiver. Les valeurs ont été renseignées de façon systématique en des points positionnés selon un maillage de 10 x 10 m au sein de l'emprise des cartes de végétation dressées par Biotope pour les deux sites

La principale limite de cette méthode est la non-prise en compte d'autres paramètres, notamment les pratiques agropastorales, qui peuvent être très structurants. Cependant, dans la mesure où nous ne cherchons pas à expliquer toute la variabilité de la répartition de la végétation mais uniquement la variabilité relative à la nappe au sein de sites restreints cette simplification semble, en première approche, raisonnable.

Trois méthodes statistiques ont été testées afin de conserver celle qui propose la capacité explicative la plus forte : arbre de décision, régression logistique multinomiale et analyse factorielle discriminante.

4.2.3 Résultats

4.2.3.1 Distribution des syntaxons en fonction des paramètres hydro-topographiques

Les communautés végétales occupent des positions contrastées au sein de la plaine et enregistrent donc des conditions d'alimentation en eaux différentes. La séparabilité, c'est-à-dire la capacité des variables explicatives à discriminer les types de végétation, est globalement assez bonne à quelques exceptions près (ex. Alnenion / Caricetum). Les valeurs brutes pour un syntaxon donnée sur différentes d'un site à l'autre (ex. Alnenion plus bas avec une nappe d'hiver moins profonde sur le site Désert que sur le site Hauterive).

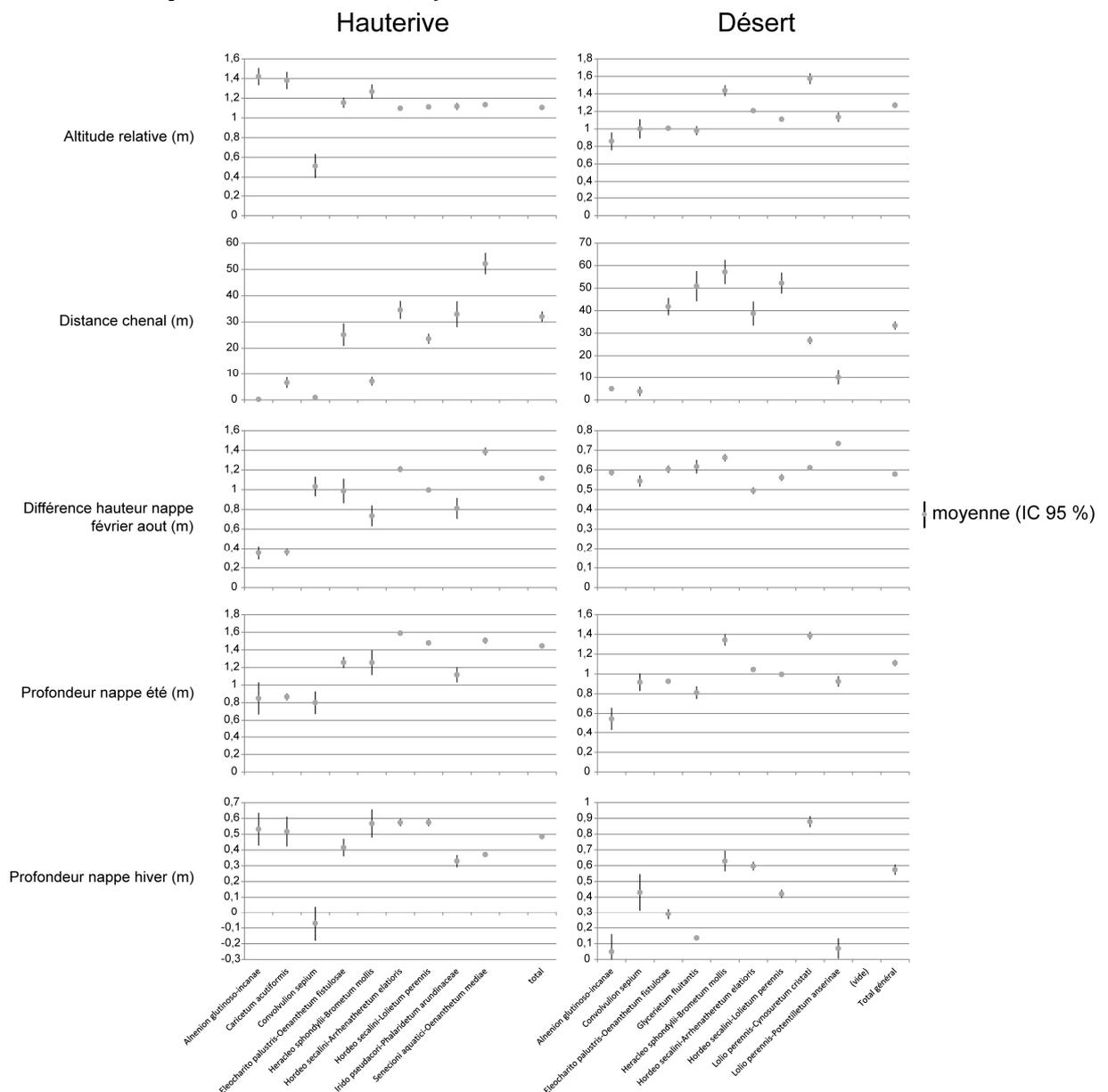


Figure 143 : Distribution des syntaxons en fonctions des paramètres hydro-topographiques

4.2.3.2 Modèles statistiques

L'approche par régression logistique multinomiale aboutit à des pourcentages de mauvais classement plus bas que l'approche par arbre de régression, respectivement en 21 pour le site Hauterive et 32 % pour le site Désert contre 38 % pour les 2 sites. L'analyse discriminante aboutit à des valeurs intermédiaires, respectivement 30 et 38 %.

Dans la régression logistique, parmi les 5 variables (altitude, distance, nappe en hiver, nappe en été, variation nappe), pour les deux sites la position de la nappe en été et la variation de la nappe sont les deux variables qui influencent le plus le modèle prédictif d'appartenance à un groupe.

Tableau 34 : Taux de mauvais classement des syntaxons issus des modèles statistiques

	Site Hauterive	Site Désert
Arbre de décision	38 %	38 %
Régression logistique multinomiale	21 %	32 %
Analyse Factorielle Discriminante	30 %	38 %

Conclusion de la deuxième partie

Les chroniques des données piézométriques et limnimétriques, qui mesurent la réaction du système à la pluie et à l'évapotranspiration sur les deux sites, procurent un ensemble d'éléments pertinents pour repérer les modes majeurs du fonctionnement hydrogéologique des deux zones humides étudiées.

La nappe voit son niveau influencé par des paramètres non seulement hydrogéologiques, mais aussi météorologiques et hydrogéomorphologiques : ainsi, l'infiltration de l'eau superficielle (produite par les apports climatiques ou par l'eau de débordement de la Sarthe) est-elle influencée par la texture du sol mais aussi par la micro-topographie de la surface, et l'écoulement souterrain est-il guidé par la stratification des alluvions souvent fines présentes dans le lit majeur.

La grande réactivité du niveau piézométrique à la pluie à très court terme est une caractéristique des nappes alluviales peu profondes. L'effet de longue durée de l'évapotranspiration sur l'abaissement progressif du niveau d'eau pendant une durée sans pluie, est une autre caractéristique, connue surtout dans les zones humides des fonds de vallées.

Dans chacun des sites, les mesures ont montré cependant que cette réactivité était d'amplitude variable selon les apports d'eau, les saisons et la place des piézomètres à l'intérieur des sites.

- en saison hivernale, les apports d'eau plus ou moins grands déterminent des réactions plus ou moins amples. A Hauterive, les piézomètres situés le plus loin de la Sarthe et en aval du barrage enregistrent les variations de niveaux les plus fortes. A Désert, les situations sont plus « chaotiques » comme cela a été montré.
- en saison estivale, les niveaux d'eau sont sub-horizontaux. Mais ils se différencient à l'intérieur de chacun des sites par leur altitude. A Hauterive, l'écart est de 1.6m environ entre le niveau le plus bas et le plus élevé. Celui-ci est mesuré dans les piézomètres proches de la Sarthe et en amont du barrage. A Désert, l'écart de niveau est moins grand, de l'ordre de 1m.

Nos résultats montrent ainsi que les zones humides sont soumises avant tout à des déplacements verticaux d'eau. La faible perméabilité des matériaux du fond alluvial (de l'ordre de 10^{-7} m/s à Hauterive, ce qui est compatible avec la texture des sols et sédiments prélevés par carottage sur le site) semble peu intervenir sur ces déplacements.

Les échanges latéraux d'eau entre la nappe et la Sarthe n'ont pas pu être clairement mis en évidence. Ils semblent lents à se réaliser.

Au niveau du Moulin de Hauterive ils sont très peu actifs compte tenu de la platitude et de la grande étendue du fond de vallée ; la nappe imprègne les sédiments et son niveau n'est relevé qu'à l'approche de la Sarthe. Les mélanges d'eau sont par ailleurs limités par la vitesse plus rapide de l'eau qui s'écoule librement dans le lit de la Sarthe, même ralentie par le barrage et qui circule difficilement sous la surface, à travers des sédiments dont la très faible perméabilité intervient ici (la Sarthe fait un barrage hydraulique qui contraint ces échanges latéraux).

Au niveau Moulin du Désert, ces échanges latéraux Sarthe-nappe sont réduits du fait de l'étroitesse du fond de vallée et de la texture plus grossière des alluvions. Le dispositif fonctionne

comme une gouttière qui reçoit également des apports des versants repérés dans plusieurs piézomètres.

Les analyses d'eau de la nappe et de la Sarthe ont montré des différences entre la composition chimique de l'eau de la nappe et celle de la Sarthe. Mais il n'a pas été possible de définir un traceur fiable pour identifier les échanges par ailleurs étalés sur un temps pluri-annuel.

Les caractéristiques du couvert végétal dans les deux sites sont finalement assez révélatrices de l'état de l'eau dans les zones humides plus que de la dynamique des niveaux d'eau. Compte tenu du rôle principal des échanges verticaux d'eau dans l'alimentation des nappes alluviales, il est difficile de prévoir les effets de l'abaissement des niveaux d'eau sur les échanges latéraux rivière-nappe et leurs impacts sur les zones humides. A Hauterive, le scénario peut être proche de la situation révélée par l'abaissement du niveau d'eau survenu en juin 2016, ou bien présenter des similitudes avec les variations de niveaux mesurées dans les piézomètres les plus éloignés de la Sarthe (HP12 et HP13). A Désert, il est probable que l'abaissement du barrage aura un effet plus grand sur le niveau de la nappe apparue comme assez bien relié à celui de la Sarthe.

Conclusion générale du rapport

Les travaux qui ont été menés dans le cadre de cette étude ont permis de produire de nouvelles données dont les interprétations contribuent à l'amélioration des connaissances sur le fonctionnement des zones humides alluviales et les influences des barrages sur ces zones humides.

Les travaux conduits à plusieurs échelles montrent la variété des états du milieu qui a enregistré à la fois les effets des dynamiques naturelles ayant conduit à son façonnement et les effets des aménagements réalisés pour exploiter ce milieu. Cependant dans les secteurs étudiés ces aménagements sont davantage des arrangements du milieu dont les effets cumulés au cours du temps conduisent à des transformations qui agissent en particulier sur les dynamiques de l'eau.

Les méthodes mises en œuvre pour conduire cette étude peuvent être considérées comme exploratoires par les échelles de la collecte des données et de leur analyse :

- prise en compte de la vallée et de secteurs représentatifs pour la mise en place d'un dispositif de mesure.
- dispositif serré de points de mesures pour le suivi des niveaux de l'eau souterraine et de l'eau de surface.

Dans l'ensemble de la vallée de la Sarthe amont, les zones humides sont « rétives » à toute organisation spatiale affirmée.

Cette vallée est repérée comme humide partout (étude du SAGE) ce qui résulte des ambiances climatiques et géomorphologiques.

Mais l'humidité est plus ou moins forte selon les lieux déterminés moins par des conditions naturelles spécifiques que par l'aménagement et la gestion de l'espace (aménagements agricoles et fonciers permettant la valorisation du fond de vallée par les activités économiques. Elle est révélée par la végétation cartographiée dans l'Atlas 2000 à l'échelle du parcellaire agricole.

A proximité des barrages la mise en œuvre d'un modèle prédictif a cherché à établir le lien entre cette végétation et les critères physiographiques et hydriques, identifiés à partir des MNT et des images satellites (humidité et verdure). On montre ainsi qu'à partir des données utilisées, les seuils des barrages modifient moins l'humidité qu'ils ne stimulent l'activité végétative dans les secteurs situés en amont des barrages. Ces résultats ne font donc apparaître que des tendances. On retrouve ces tendances dans les sites où la végétation réagit au « manque d'eau » comme cela a pu être mesuré. On note par ailleurs que l'impact des barrages est mieux enregistré par les niveaux que par la végétation dont la répartition intègre d'autres influences.

Le rôle des barrages n'est clairement identifié que dans des bandes de terrain situées à proximité de la rivière larges de 25-35m (longueur non détectable dans les deux sites de mesures) :

- En hiver cette bande est peu différente des zones voisines
- En été, les barrages soutiennent les niveaux d'eau à des altitudes plus élevées qu'ailleurs dans le lit majeur

Enfin, est-il possible de déterminer plus précisément les *Impacts hydrogéologiques sur les zones humides du rétablissement de la continuité écologique sur la Sarthe amont* sont ainsi complexes ?

Nos résultats éclairent le fonctionnement des zones humides alluviales dans les lits majeurs des rivières de faible énergie gorgés d'eau :

- Mise en évidence des processus
- Identification de la variété des situations et de la variation des niveaux d'eau (rythme, ampleur)
- Evaluation du critère « végétation » pour la détermination des zones humides

Enfin, ces résultats conduisent à la suite des travaux ...

- Prise en compte les pratiques agricoles et les aménagements en général en complément des données déjà acquises,
- Suivi piézométriques dans les lits majeurs (de rares piézomètres contrôlent les niveaux des aquifères pour l'AEP, 3 dans tout le bassin versant de la Sarthe amont).
- Modélisation prenant en compte l'humidité des sols, les microtopographies
- Extension du réseau de mesures
- Et peut-être, dans les vallées comme celle de la Sarthe, travailler sur les zones sèches qui à l'inverse des zones humides y constituent l'exception.

Liste des Figures

Figure 1 : Localisation des deux sites dans le bassin de la Maine.....	8
Figure 2. Prairies humides en amont du Moulin du Désert.....	9
Figure 3 : Localisation du site du Moulin du Désert.....	9
Figure 4 : Localisation du Moulin de Hauterive.....	10
Figure 5. Vannes, seuil et prairie humide du Moulin de Hauterive.....	10
Figure 6 : Organisation du projet en tâches.....	11
Figure 7 : Réseau de mesures sur le site du moulin de Hauterive.....	13
Figure 8 : Réseau de mesures sur le site du Moulin du Désert.....	14
Figure 9 : Le bilan hydrologique d'une zone humide (Baker et al. 2009).....	19
Figure 10 : Inventaire de plantes indicatrices des zones humides. (Source: SAGE de l'Huisne 2010)	22
Figure 11 : Exemple de méthodologie appliquée à l'identification des zones humides. (Source : Lebaut et Manceau, 2015).....	25
Figure 12 : Bassin versant.....	29
Figure 13 : Carte orographique du bassin versant de la Sarthe amont.....	30
Figure 14 : Courbe hypsométrique. (Source : BD Alti).....	30
Figure 15 : Carte géologique simplifiée du bassin versant de la Sarthe amont.....	32
Figure 16. Schéma structural de la carte géologique (Feuille 252 de Mortagne-au-Perche (1998) G.Moguedet).....	33
Figure 17 : Géologie de la zone d'étude (source BRGM).....	34
Figure 18 : Unités BDLISA par nature. Bleu : unités aquifères ; Jaune : unités semi-perméables ; Orange : unités imperméables. Echelle : 1/250 000.....	35
Figure 19 : Unités BDLISA par état. Marron : aquifères captives ; Vert : aquifères à parties libres et captives ; Bleu ciel : aquifères libres ; Blanc : unités non aquifères. Echelle : 1/250 000.....	35
Figure 20 Répartition de l'occupation du sol dans le bassin versant (d'après CLC 2006).....	37
Figure 21 : Répartition de l'occupation des sols (Source : CLC 2006).....	38
Figure 22. Évolution du pourcentage de surface toujours en herbe, des communes du bassin versant entre 1988 et 2010.....	39
Figure 23. Obstacles à l'écoulement le long de la Sarthe.....	40
Figure 24 : Qualité des eaux souterraines du bassin versant entre 2010 (gauche) et 2012 (droite).	42
Figure 25 : Qualitogramme des eaux souterraines au site du moulin du Désert.....	43
Figure 26 : Qualitogramme des eaux souterraines du site de Hauterive.....	44
Figure 27 : Qualitogramme de l'eau de la Sarthe au moulin de la Marche.....	45
Figure 28 : Qualitogramme des eaux de la Sarthe à Alençon.....	45
Figure 29 : Qualitogramme des eaux de la Sarthe à Moulins le Carbonnel.....	46
Figure 30 : localisation des différents prélèvements pour l'étude de la qualité des eaux (Outils de visualisation BRGM).....	47
Figure 31 : Températures moyennes annuelles à la station d'Alençon (Météo France).....	48

Figure 32 : Précipitations annuelles à la station d'Alençon, période 1979-2015 (Météo nationale)	49
Figure 33 : Régime annuel des facteurs principaux du climat.	49
Figure 34 : Débits moyennes annuels de la Sarthe à la station de Saint Ceneri le Gerei	50
Figure 35 : Régime hydrologique de la Sarthe à Saint Cénéri le Gerei (1979-2015)	50
Figure 36 : Débits mensuels minimaux par an pour la période 1979 – 2013. (Source : Banque Hydro)	51
Figure 37 : Nombre de jours par an de débits journaliers inférieurs au VCN3 de fréquence biennale (0,707 m3/s) période 1998 - 2015. Source : Banque Hydro	52
Figure 38 : Courbe de tarissement de la Sarthe à Saint-Cénéri-le-Gérei sur le mois d'Avril 2007	54
Figure 39 : Courbe de tarissement de l'Hoëne à La Foulerie sur les mois de Mars et Avril 2002	55
Figure 40 : Courbe de tarissement au Mêle-sur-Sarthe sur les mois de Mars et Avril 1997	55
Figure 41 : Débit moyen journalier maximum de l'année (1998-2015)	56
Figure 42 : Durée des périodes à débit supérieur à 52 m3/s (débit de crue de fréquence biennale). 1998-2015 (Banque Hydro)	57
Figure 43 Pâturage inondé. Gué-Saint-Vaast 17.02.2014- C. LHUILLIER	57
Figure 44 Pâturage inondé. Pont de Saint-Paul 17.02-2014- C-LHUILLIER	57
Figure 45. Zones inondables entre Saint-Cénéri-le-Gérei et Ménil-Broût. Sources : SCAN25, BD Carthage, BD Topo, Zones inondables	58
Figure 46 : Carte géomorphologique et de repérage	62
Figure 47 : Le substratum du fond de la vallée de la Sarthe	64
Figure 48 : Barrage du Désert 17 février 2014 (photo JC)	65
Figure 49 : Profil en long de la Sarthe, localisation des obstacles à l'écoulement et des limites des tronçons homogènes (01, 02...)	65
Figure 50 : Principales familles d'occupation du sol (CLC 2006)	66
Figure 51 : Morcellement du lit majeur par les microtopographies (inondation de février 2014) (clichés C. Lhuillier)	66
Figure 52 : Ancienne voie ferrée et route à travers le lit majeur (extrait de la carte topographique IGN)	67
Figure 53 : Légende des cartes de l'Atlas Natura 2000	68
Figure 54: Exemple de carte de l'Atlas Natura 2000	68
Figure 55 : Lit majeur de la Sarthe en amont de Saint Aubin de Courteraie ; modification de la végétation (extrait Atlas Natura 2000) en lien avec les aménagements hydrauliques (tracé sinueux de la rivière en amont de la D 228 et rectiligne en aval) (données IGN Geoportail)	69
Figure 56 : Caractéristiques principales des sous tronçons	70
Figure 57 : Surface du lit majeur et densité de drainage	71
Figure 58 : Démarche retenue pour le traitement des données	74
Figure 59 : Classes de formations végétales. Source : GORET, JUHEL (2015)	75
Figure 60 : Regroupement des formations végétales. Source : GORET, JUHEL (2015)	75
Figure 61 : Répartition des formations végétales d'après le modèle SVM Radial	78
Figure 62 : Répartition des formations végétales d'après le modèle Random Forest	79
Figure 63 : Répartition des formations végétales d'après le modèle C5.0	79
Figure 64 : Performance de la modélisation (3 modèles testés)	80

Figure 65 : Variables indépendantes de la végétation en mètres (en pourcentage la pente).....	83
Figure 66 : Variables dépendantes de la végétation.....	84
Figure 67 : Bilan d'occupation du sol en amont des obstacles en 2007. Les différences ont été calculées en soustrayant à la surface en amont, la surface en aval. Lorsque la surface est plus grande en amont, le résultat est positif.....	86
Figure 68 : Humidité en amont et en aval des obstacles.....	87
Figure 69 : Verdeur en amont et en aval des obstacles.....	87
Figure 70 Différence amont-aval de la verdeur pour les deux dates disponibles. Si négative, amont sec. Si positive, amont plus humide.....	88
Figure 71 : Différence amont-aval de l'humidité pour les deux dates disponibles. Si négative, amont sec. Si positive, amont plus humide.	88
Figure 72 : Types d'anomalies : cas d'étude dont la plus élevée humidité est en aval.....	88
Figure 73 : Formations végétales, surface occupée en % de la surface du lit majeur	90
Figure 74 : Formations végétales hygrophiles par hectares de lit majeur.....	91
Figure 75 : Formations prairiales par hectares de lit majeur.....	91
Figure 76 : Corrélation entre caractère morphométriques du lit majeur et formations végétales :	92
Figure 77 : Caractéristiques morphométriques des sous-tronçons (tronçon 9, Hauterive points rouges, tronçon 14, Desert point jaune).....	99
Figure 78 : Le fond de la vallée de la Sarthe aux abords du site de Hauterive	99
Figure 79 : Lit mineur et lit majeur aux abords du site de Hauterive	100
Figure 80 : Image aérienne et courbes de niveaux issues du levé Lidar du site de Hauterive.....	101
Figure 81 : Courbes granulométriques des échantillons de Hauterive	102
Figure 82 : Texture des alluvions de Hauterive.....	102
Figure 83 : Le fond de la vallée de la Sarthe aux abords du site de Hauterive	103
Figure 84 : Lit mineur et lit majeur aux abords du site de Hauterive	104
Figure 85 : Image aérienne et courbes de niveau issues du levé Lidar du site du Moulin du Désert	105
Figure 86 : granulométrie des échantillons de Moulin du Désert.....	107
Figure 87 : Texture des matériaux de Moulin du Désert	107
Figure 88 : Texture des échantillons des sols des sites sur le triangle de texture de USDA (<i>United States Department of Agriculture</i>) : moulin du Désert (points rouges) et moulin de Hauterive (points bleus) (pourcentages des proportions Argile (< 0,002 mm), Limon (0,05 - 0,002 mm) et sable (> 0,05 mm) dans la partie fine des échantillons des deux sites tracés sur le triangle de texture de USDA).....	108
Figure 89 : Résultats de la conductivité hydraulique au Moulin de Hauterive	109
Figure 90 : Résultats de la conductivité hydraulique au Moulin du Désert.....	109
Figure 91 : Variation de la teneur en eau du sol sur un mètre de profondeur sur 6 points (10, 20, 30, 40, 60 et 100 cm) – Hauterive	111
Figure 92 : Variation de la teneur en eau du sol sur un mètre de profondeur sur 6 points (10, 20, 30, 40, 60 et 100 cm) – Désert.....	111
Figure 93 : Variation de la teneur en eau du sol sur un mètre de profondeur sur 6 points (10, 20, 30, 40, 60 et 100 cm) – Sol témoin – espace vert de l'ESGT	112

Figure 94 : Station météorologique WatchDog 2900ET mise en place en chaque site.....	113
Figure 95 : Températures horaires le 20 juin 2015 (en abscisse les heures, en ordonnée la température moyenne horaire).....	114
Figure 96 : Précipitations mensuelles	118
Figure 97 : Températures moyennes mensuelles.....	118
Figure 98 : Débits moyens mensuels à Saint-Céneri-le-Gérei.....	119
Figure 99 : Hydrogramme journalier de la station de Saint Ceneri le Gerei. Année 2015 et 2016 (Banquehydro).....	119
Figure 100 : Niveaux de nappe enregistrés à Hauterive (moyennes journalières du 1/1/2015 au 30/04/2016).....	122
Figure 101 : Niveaux de nappe enregistrés à Moulin de Désert (moyennes journalières du 1/1/2015 au 30/04/2016).....	123
Figure 102 : Apports climatiques et niveaux d'eau au Moulin de Hauterive (moyennes mensuelles et moyennes de tous les enregistrements).....	125
Figure 103 : Apports climatiques et niveaux d'eau au Moulin du Désert (moyennes mensuelles et moyennes de tous les enregistrements).....	126
Figure 104 : Précipitations et niveaux d'eau en janvier 2015 (HP = piézomètre, HL = limnimètre)	127
Figure 105 : Précipitations et niveaux d'eau en juin 2015 (HP = piézomètre, HL = limnimètre)	128
Figure 106 : Précipitations et niveaux d'eau du 1er au 11 août 2015 (HP = piézomètre, HL = limnimètre) (période sans précipitations).....	128
Figure 107 : Exemple de corrélation niveau moyen de la nappe souterraine et de l'évapotranspiration cumulée.....	129
Figure 108 : Variations des niveaux d'eau à tous les points de mesures en janvier, juin et août 2015	130
Figure 109 : Niveaux d'eau (en m) du 1er au 31 janvier 2015 au Moulin du Désert. Groupe 1..	131
Figure 110 : Niveaux d'eau du 1er au 31 janvier 2015 au Moulin du Désert. Groupe 2.....	131
Figure 111 : Niveaux d'eau du 1er au 31 janvier 2015 au Moulin du Désert. Groupe 3.....	132
Figure 112 : Niveaux d'eau du 1er au 31 janvier 2015 au Moulin du Désert. Groupe 4.....	132
Figure 113 : Niveaux d'eau du 1er au 30 juin 2015 au Moulin du Désert.....	133
Figure 114 : Niveaux d'eau du 1er au 11 août 2015 au Moulin du Désert.....	134
Figure 115 : Exemples de corrélation entre le niveau d'eau et l'ETP cumulée (Site du Moulin du Désert).....	134
Figure 116 : Corrélation entre le niveau d'eau et l'ETP cumulée (Site du Moulin du Désert).....	135
Figure 117 : Découpage de l'hydrogramme et niveau de base de l'écoulement (Vernoux et al. 2011)	137
Figure 118 : Niveaux de nappe en saison hivernale et en saison estivale :.....	139
Figure 119 : Profondeur de la nappe en hiver et en été.....	139
Figure 120 : Topographie du toit de la nappe à Hauterive.....	141
Figure 121 : Position des coupes transversales et longitudinales au Moulin de Hauterive.....	142
Figure 122 : Coupe transversale du nord au sud (du HP4 au HP12).....	142
Figure 123 : Coupe transversale du nord au sud (du HP8 au HP13).....	143

Figure 124 : Coupe transversale du nord au sud (du HP1 au HP2)	143
Figure 125 : Coupe longitudinale de l'amont à l'aval (est à l'Ouest) (HP8 au HP3)	144
Figure 126 : Altitudes du toit de la nappe au Moulin du Désert.....	146
Figure 127 : Position des coupes transversales et longitudinales au Moulin du Désert.....	147
Figure 128 : Coupe transversale de DP 1 à DP 13	148
Figure 129 : Coupe transversale de DP 5 à DP15	148
Figure 130 : Coupe transversale de DP 4 à DP 14	149
Figure 131 : Coupe longitudinale DP 9 à DP16 (rive gauche)	149
Figure 132 : Coupe longitudinale de DP2 à DP 6 (rive droite).....	150
Figure 133 : Variations des niveaux d'eau du 1 ^{er} au 15 juin 2016 au moulin de Hauterive	152
Figure 134 : Variations des niveaux d'eau du 1 ^{er} au 15 mai 2016 au moulin de Hauterive.....	153
Figure 135 : Milieux herbacées Moulin de Hauterive (à gauche) et Moulin du Désert (à droite) (Biotope 2014).....	156
Figure 136 : Les prairies humides à hygrocènes dominées par la fauche.....	157
Figure 137 : Les prairies humides à mésophiles dominées par la pâture.....	158
Figure 138 : Les roselières et cariçaies.....	158
Figure 139 : Autres formations végétales humides.....	159
Figure 140 : Végétations observées sur le site du Moulin de Hauterive (Biotope 2015)	161
Figure 141 : Légendes des cartes de végétation (Biotope 2015).....	162
Figure 142 : Végétations observées sur le site du Moulin du Désert	164
Figure 143 : Distribution des syntaxons en fonctions des paramètres hydro-topographiques..	166

Liste des Tableaux

Tableau 1 . Membres du projet.....	7
Tableau 2. Partenariat institutionnel.....	8
Tableau 3 : Méthodes d'analyse des compartiments des zones humides. (Source : CLEMENT et al., 2008).....	24
Tableau 4 : Données collectées.....	26
Tableau 5 : Liste de travaux préalables sur la zone d'étude.....	27
Tableau 6 : Densité du réseau (Source : BD Carthage).....	30
Tableau 7. Évolution des surfaces agricoles utiles (SAU) et des surfaces toujours en herbe (STH) entre 1988 et 2010. Source : Agreste.....	38
Tableau 8. Hauteur des obstacles. Source : ROE (ONEMA)	41
Tableau 9 : Coefficients de variation des ions majeurs pour 2010 et 2012. En rouge le plus fort et en vert le plus faible.....	42
Tableau 10 : Coefficients de variation des ions majeurs au Désert et Hauterive	44
Tableau 11 : Coefficients de variations des eaux de la Sarthe de l'amont vers l'aval	46
Tableau 12 : Bilan hydrologique (période 1998/2015)	51
Tableau 13 : Fréquences théoriques VCN 3 (1979-2015) (BanqueHydro)	52
Tableau 14 : Nombre de jours par mois où le débit passe en dessous de 0,600 m ³ /s	53

Tableau 15 : Données sélectionnées pour l'étude des tarissements	53
Tableau 16 : Valeurs moyennes et médianes du tarissement entre 1998 et 2015.....	54
Tableau 17 : QJ fréquentiels calculés pour 1979-2015, d'après la loi de Gumbel (Source : Banque Hydro).....	56
Tableau 18 : Caractéristiques morphométriques des zones de vallée :	70
Tableau 19 : Synthèse de la méthode appliquée. De gauche à droite, étape, manipulation, logiciel et sorties terrains effectuées pour la validation des résultats.	72
Tableau 20 : Métadonnées des couches spatiales utilisées. (*) Référentiel des Obstacles à l'Écoulement.....	73
Tableau 21 : Quelques précisions sur les formations végétales étudiées.	76
Tableau 22 : Comparaison des surfaces des formations végétales de l'inventaire Natura 2000 et des modèles statistiques. Source : PNR Normandie-Maine.....	85
Tableau 23 : Surface occupée par les formations végétales en hectares et en pourcentage ainsi que la différence entre l'amont et l'aval.	86
Tableau 24 : Différence amont-aval de l'humidité et de la verdure pour les deux dates disponibles. Si négative, amont plus sec. Si positive, amont plus humide (Source: USGS, Eau France).	87
Tableau 25 : Épaisseur des matériaux fins de surface dans les sondages de Hauterive	102
Tableau 26 : Regroupement des carottes selon la perméabilité (critère : épaisseur sous la surface du sol des matériaux fins)	106
Tableau 27 : Spécifications techniques de la station météorologique	113
Tableau 28 : Données climatiques mensuelles de la période de mesure en regard des données de la station d'Alençon.....	117
Tableau 29 : Débits mensuels à la station de Saint Ceneri le Geréi.....	119
Tableau 30 : Niveaux piézométriques et limnimétriques moyens en mètres	124
Tableau 31 : Niveaux de base de la nappe alluviale dans les sites de mesures (altitudes en mètres)	138
Tableau 32 : Synthèse des végétations sur l'aire d'étude du site du Moulin de Hauterive (8,27 ha) (Biotope 2015).....	160
Tableau 33 : Synthèse des végétations sur l'aire d'étude du site du Moulin du Désert (12,44 ha)	163
Tableau 34 : Taux de mauvais classement des syntaxons issus des modèles statistiques.....	167

Liste des annexes

Annexes de la première partie du rapport

- Annexe I 1. Indices de forme du bassin versant
- Annexe I.2. Prélèvements d'eau dans le bassin versant de la Sarthe amont en 2010
- Annexe I.3. Eaux souterraines sur le bassin versant
- Annexe I.4. Traitement des données hydrologiques
- Annexe I.5. Caractéristiques des tronçons homogènes
- Annexe I.6. Carte des seuils et déversoirs
- Annexe I.7. Caractéristiques des obstacles à l'écoulement par tronçon
- Annexe I.8. : Facteurs de contrôle de la repartition des habitats
- Annexe I.9. Diagrammes ombrothermiques du 30 juin et du 7 décembre 2015
- Annexe I.10. STATISTIQUES DES FACTEURS DE CONTRÔLE (VARIABLES DU MODÈLE)
- Annexe I.11. Aires d'apprentissage du modèle statistique
- Annexe I.12 Facteurs de contrôle
- Annexe I.13 : Végétation à l'amont et à l'aval des barrages
- Annexe I.14 : Cartes de végétation
- Annexe I.15. Répartition des ensembles de végétations par tronçon

Annexes de la deuxième partie du rapport :

- Annexe II.1 : Dispositif de mesure. Site de Hauterive
- Annexe II.2. Moulin de Hauterive. Description et analyses des sédiments du remplissage alluvial (carottes de sédiments prélevées lors de l'installation des piézomètres).
- Annexe II.3. Dispositif de mesures. Site de Désert.
- Annexe II.4. Moulin du Désert. Description et analyses des sédiments du remplissage alluvial (carottes de sédiments prélevées lors de l'installation des piézomètres).
- Annexe II.5. Conductivité hydraulique, teneur en eau du sol et composition chimique. Considérations générales, mesures de terrain et interprétation
- Annexes II.6. Description des appareils pour la mesure des facteurs du climat
- Annexe II.7. Mesures piézométriques et atmosphériques par le Diver
- Annexe II.8 Données journalières. Moulin de Hauterive
- Annexe II.9. Données journalières. Moulin de Désert
- Annexe II.10 : Étude CEZURES BIOTOP 2015
- Annexe II. 11. Structure de la base de données
- Annexe II.12. Présentation du 25 février 2016

Références principales

AGOU P. : Etude phyto-écologiques des zones humides sur les sites de Moulin du Désert et du Moulin de Ménil Broût. Biotop, Orléans. 44p. 2015.

ALHASKHER Z., Analyse spatiale des structures de paysages et de leur fonctionnement hydrologique dans les vallées de l'ouest de la France Sujet déposé en 2007. Co-encadrant : F. Laurent (boursier du gouvernement syrien). Thèse soutenue le 21 décembre 2012 au Mans. 519p.

ALTHIS, 2009 : Guide de détermination de la flore et des habitats des zones humides du Morbihan et de Bretagne. [Internet] [Consulté le 21 Janvier 2016] Disponible sur le site : www.althis.fr

AMOROS C., PETTS G.E. 1993 : Hydrosystèmes fluviaux. Masson. Coll « Ecologie 24. Paris 300p.

AUGUST 1999, Pages 257-263. Note présentée par Ghislain de Marsily.

BAIG MHA ET AL, 2014: Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 8 at satellite reflectance. Remote Sensing Letters. Vol 5, n° 5, pp 423-431.

BARNAUD G., FUSEC E. 2007 : Conserver les zones humides, pourquoi comment ? Ed. Educagri , 267p.;

BARRAUD R. 2004 : Les rivières à biefs étagés. Des paysages contre nature ? Cahier nantais N°61. 31-43.

BARRAUD R. : 2009 : La rivière aménagée et le moulin à eau. Un héritage en déshérence ? Trajectoires, modèles et projets de paysages. Exemples des vallées sud-armoricaines. Bulletin de l'Association de géographes Français.32-45.

BENJANKAR R., JORDE K., YAGER E.M, EGGER G., GOODWIN P., GLENN N. 2012: The impact of river modification and dam operation on floodplain vegetation succession trends in the Kootenai River, USA. Ecology Engeneerin 46, pp 88-97.

BONNEFOND Mathieu, CALI José, CORBONNOIS Jeannine, LABERGERIE Eric, TCHEKPO Wilfrid, VERDUN Jérôme : Morphodynamique des cours d'eau de faible énergie du bassin de la Maine : développement d'une méthode d'analyse. Poster présenté au colloque de Tours. Octobre 2012 : Morphodynamique et Transport Solide en rivière : du terrain aux modèles

BURKART M, 2001: River corridor plants (Stromtalpflanzen) in Central European lowland: a review of a poorly understood plant distribution pattern. Global Ecology & Biogeography. N° 10, pp 449-468.

CLÉMENT B ET AL, 2008: Etude des fonctions des zones humides à partir de données de télédétection à très haute résolution. Application expérimentale à la Basse Vallée de la Dordogne. Rapport d'étude.

COMISSION LOCALE DE L'EAU – SAGE DU BASSIN DE LA SARTHE AMONT, 2011: SAGE du bassin de la Sarthe Amont. Évaluation environnementale. , pp. 52.

CORBONNOIS J., ALHASKEER Z. : Comment représenter la diversité des fonds de vallées des cours d'eau du bassin de la Maine ? Cahier Nantais, N° 1-2, 2010. p 75-87 (en ligne)

CORBONNOIS J., GRANDET G., GRÉVILLIOT F., JAGER C., KREBS L., MONY F., MONY J.-F., SÉLINGER-LOOTEN R., VÉCRIN M.-P., 2000. Biodiversité et fonctionnement des écosystèmes prairiaux inondables des vallées alluviales dans le nord-est de la France. Application à leur gestion conservatoire et restauration. 139 p. Université de Metz, UR EBSE ; CEGUM. Rapport final du Programme national de recherche sur les zones humides

CORBONNOIS J., ROLLET A.-J., Dynamique des cours d'eau à faible énergie. Exemple de l'Huisne. Séminaire technique « le transport solide : principes et expériences sur le bassin ligérien ». Vierzon, 24 novembre 2011. Communication.

COSANDEY C., ROBINSON M. (2000) : Hydrologie continentale. Armand colin, Paris. 360p.

CURIE F ET AL, 2004: Classification et typologie fonctionnelle des zones humides riveraines à l'échelle du bassin de la Seine : élimination et rétention des nitrates ; Colloque PIREN, 2003. Paris (France).

DASIBAT C., DORE F., KUNTZ G., LE GALL J., RIOULT M., VERRON G. 1982 : Notice explicative de la carte géologique Alençon (1/50000è). BRGM. 70p.

DE WILDE M, 2014 : Conséquences des exondations pour les communautés végétales aquatiques et le fonctionnement des zones humides fluviales. Thèse de Doctorat en Écologie. Université de Lyon I.

DELAUNAY P. (1936) – Le sol sarthois. Ses historiens, son histoire géologique, sa géographie botanique, économique, historique et politique. (Sixième fascicule). Les zones quaternaires (première partie). Le Mans, imprimerie Monnoyer, 907-1095.

DESPRIEE J., VOINCHET P., BAHAIN J.-J., FALGUERES C., LORAIN J.-M., DUVALARD J. (2003) - Les nappes alluviales pléistocènes du Loir dans la région de Vendôme : contexte morphosédimentaire et chronologie RPE. Quaternaire, 14 (4), 207-218.

DIRECTION RÉGIONALE DE L'ENVIRONNEMENT RHÔNE-ALPES, 2007: Prairies humides atlantiques et subatlantiques, dans « Zones Naturelles d'Intérêt Écologique Faunistique et Floristique de la région Rhône-Alpes ». Guide Méthodologique Régionale. Pp 21.

Dossier Zones humides alluviales in Zones Humides Info. Revue trimestriel, N°51-52, 2008

ESTEVEES M., 1988, Modélisation des relations entre un aquifère alluvial et une rivière – application au Ried de Colmar (Alsace, France). 113è Congrès national des Sociétés savantes, Strasbourg, Géographie, p. 41-61.

FORUM DES MARAIS ATLANTIQUES, 2011 : Synthèse bibliographique sur l'évaluation écologique des mesures agroenvironnementales territorialisées des zones humides de la région de Pays de la Loire. Pp 278.

FROHN RC ET AL, 2009: Satellite remote sensing of isolated wetland using object-oriented classification of Landsat 7 data. Wetlands. Vol 29, n° 3, pp 931-941.

FUSTEC E., LEFEUVRE J.C., 2002 : Fonctions et valeurs des zones humides. Dunod, Paris Coll Industrie techniques. Série Environnement. 426 p.

GATIEN A, LAURENT F., CORBONNOIS J. : Pratiques agricoles et ressources en eau des vallées principales du bassin versant de la Maine : quelles représentations ? Vertigo, hors série N°10. Déc 2011..

GERMAINE MA : Trajectoires paysagères et poids des héritages dans les vallées normandes. Mappemonde N° 99, 2010 (en ligne)

GERMAINE M-A (2009) : De la caractérisation à la gestion des paysages ordinaires de vallées du Nord Ouest de la France. Représentations, enjeux d'environnement et politiques publiques en Basse Normandie. Université de Caen. Thèse. 645 p.

GERMAINE MA, BARRAUD R, 2013 : Restauration écologique et processus de patrimonialisation des rivières dans l'Ouest de la France. [Internet] [Consulté le 23 Février 2016]. Disponible sur le site web: <http://www.https://vertigo.revues.org/13583>

GORET M, JUHEL C, 2015: Typologie des habitats du site Natura 2000 FR 2500107 "Haute Vallée de la Sarthe ». DREAL Basse Normandie. Villers-Bocage : Conservatoire botanique national de Brest.

GUNERALP I, RHOADS BL, 2009: Planform change and stream power in the Kishwaukee River watershed, Illinois: Geomorphic assessment for environmental management. The Geological Society of America. Special paper n° 451, pp 109-118

HARDY X SARL. 2008 : Révision du SDAGE Loire Bretagne. Démarche d'inventaire des zones humides. Rapport final. 98 p.

HURD JD ET AL, 2006: Tidal wetland classification from Landsat imagery using an integrated pixel-based and object-based classification approach. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2006 Annual Conference, Reno, Nevada.

HYDRATEC - ETABLISSEMENT PUBLIC LOIRE. 2007. Etude de cohérence du bassin de la Maine. 3 tomes.

HYDRECO, BIOTOPE, 2012: Vulnérabilité des milieux aquatiques et de leurs écosystèmes. Étude des zones humides. Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, de l'Énergie.

INSTITUTION INTERDÉPARTAMENTALE DU BASSIN DE LA SARTHE, 2010 : Diagnostic environnemental. Inventaire des zones humides, des cours d'eau et des haies. Institution Interdépartementale du Bassin de la Sarthe, Commission Locale de l'Eau du Bassin Versant de l'Huisne, pp 84.

JUIGNET P., LEBERT A., LE GALL J., 1984, Notice explicative de la Feuille Fresnay-sur-Sarthe, BRGM

KREBS L, CORBONNOIS J. : 2001 : Fonctionnement hydrodynamique des fonds alluviaux. Exemple de la Meuse dans le secteur de Stenay. 18p. Mélanges Bonnefont. Nancy.

KREBS L., CORBONNOIS J., MULLER S., 1999. The impact of hydrological fluctuations on shallow groundwater hydrochemistry under two alluvial meadows. Hydrobiologia, 410: 195-206.

LARUE J.-P. (1991) – Contribution à l'étude de l'évolution des vallées à l'Holocène : l'exemple du Loir (Sarthe, France). Physio-Géo., n° 22/23, 1991, pp. 149-155, 5 fig.

LEBAUT, MANCEAU, 2015 : Potentialités des images Landsat pour l'identification et la délimitation de zones humides à l'échelle régionale : l'exemple de l'Est de la France. *Physio-Géo*. Vol IX, pp 125-140.

LEE S, 2011: Detecting Wetland Change through Supervised Classification of Landsat Satellite Imagery within the Tunkwa Watershed of British Columbia, Canada. *Mémoire Hogskolan I Gavle*.

LEPEZ L., VIEL V., ROLLET AJ., DELAHAYE D. 2015 : The anthropogenic nature of present-day low energy rivers in western France and applications for current restoration projects. *Geomorphology*, 251, 64-76.

LESPEZ L. (éd.) 2012 : Paysages et gestion de l'eau. Sept millénaires d'histoires de vallées et de plaines littorales en basse Normandie. Presses Universitaires de caen / MRSH. 340p.

LHULLIER C, 2015: Étude phyto-écologique des zones humides sur les sites du Moulin Désert (en aval d'Alençon) et Moulin du Menil-Brout (en amont d'Alençon). *Mémoire de Master 1 Politiques Territoriales de Développement Durable à l'Université du Maine*.

LÓPEZ ALONSO ET AL, 2004: Efectos hidromorfológicos aguas abajo de embalses. *Cimbra*. Vol. ,Nº , pp 22-28.

LORAH M.M., COZZARELLI I.M., BOHLKE J/K/ 2009 : Biogeochemistry at a wetland sediment-alluvial aquifer interface in a landfill leachate plume. *Journal of Contaminant Hydrology* 105. Pp 99-117.

LUCAS J ET AL, 2012 : Guide pour la reconnaissance des zones humides du bassin Rhône-Méditerranée, vol 1. Agence de l'eau Rhône-Méditerranée et Corse, pp. 78.

MALAVOI J.-R. (2009). *Ouvrages transversaux sur les cours d'eau : impacts hydromorphologiques et écologiques et principes de restauration globale*. 88ème congrès de l'ASTEE. Nice, ONEMA.

MALAVOI J.R. 2003. *Stratégie d'intervention de l'Agence de l'Eau sur les seuils en rivière*. AREA/AELB.

MARY G. (1998) - Organisation cénozoïque et réorganisation pléistocène du réseau hydrographique de la Sarthe. *Géomorphologie*, 3, 251-270.

MATHIEU S. 2006 : Evaluation de l'intérêt des zones humides ordinaires, arguments pour les valoriser auprès du public. OIE/Engref Montpellier. 32p.

MCCULLY P, 2001: *Silenced Rivers: The Ecology and Politics of Large Dams*. Zed Books, pp 432.

MEDDE GIS, 2013: Guide d'identification et de délimitation des sols des zones humides. Ministère de l'écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, pp 63.

MOGUEDET G. 1998 : Notice explicative, carte géologique de la fance (1/50000è), feuille mortagne au perche. BRGM, 87p.

MOSS BR, 1998: *Ecology of Fresh Waters: Man and Medium, Past to Future*. Wiley-Blackwell, pp.572

MOURIER B., WALTER C., MEROT P., 2008 : Soil distribution in valleys according to stream order. *Catena* 72, pp 395-404.

MUZARD Diane (2009). La gestion des prairies alluviales. *SpectroSciences* <http://www.spectrosciences.com/spip.php?article106>.

NILSSON C, BERGGREN K, 2000: Alterations of riparian ecosystems caused by river regulation. *BioScience*. Vol 50, n° 9, pp 783-792.

ONEMA, 2010: Pourquoi rétablir la continuité écologique des cours d'eau? [Internet] [Consulté le 23 Février 2016]. Disponible sur le site web : www.onema.fr/IMG/jc2010/Brochure-continuite.pdf

OZESMI SL, BAUER ME, 2001: Satellite remote sensing of wetlands. *Wetlands Ecology and Management*. N° 10, pp 381-402.

WENG Philippe, COUDRAIN-RIBSTEIN Anne, KAO Cyril, BENDJOURI Hocine and de MARSILY Ghislain 1999 : Mise en évidence de fortes circulations verticales temporaires entre zones humides et aquifères alluviaux et régionaux [Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science Volume 329, Issue 4](#), 30 August 1999, Pages 257-263. Note présentée par Ghislain de Marsily.

PIANA J., CARCAUD N., CYPRIEN-CHOUIN A.-L., VISET L., et D. LEROY (2011) : « Dynamique paysagère tardi-glaciaire et holocène dans la vallée du Loir à Pezou (Loir-et-Cher) : développements méthodologiques et premiers résultats », *Noréis* [En ligne], 213 | 2009/4, mis en ligne le 15 décembre 2011, consulté le 20 janvier 2015. URL : <http://norois.revues.org/3047> ; DOI : 10.4000/norois.3047.

PNR NORMANDIE-MAINE, 2007 : Site Natura 2000 – FR 2500107 « Haute Vallée de la Sarthe ». Atlas cartographique. Pp 66.

POIRIER L, 2015 : Modélisation par l'outil SIG de la relation nappe phréatique – rivière en zone humide : mise en œuvre d'une base de données et d'une méthodologie d'interpolation. Cas des sites du moulin de Hauterive (61) et du moulin du Désert (72). Mémoire de fin d'études au CNAM ESGT (École Supérieure des Géomètres et topographes).

RAPINEL S, 2012: Contribution de la télédétection à l'évaluation des fonctions des zones humides : de l'observation à la modélisation prospective. Thèse de Doctorat en Géographie. Université de Rennes 2/ Université de Rennes 1.

Référentiel Hydrogéologique Français BDLISA, Bassin Loire-Bretagne, Délimitation des entités hydrogéologiques en région Pays de la Loire, Départements du Maine-et-Loire et de la Sarthe, Rapport final, Mise à jour BDLISA Version 0, BRGM-62226-FR, Juin 2013.

Référentiel Hydrogéologique Français BD-LISA, Bassin Seine-Normandie, Délimitation des entités hydrogéologiques de niveaux 2 et 3 du bassin Seine-Normandie, Rapport final BRGM/RP-61826-FR, Janvier 2013

Référentiel Hydrogéologique Français BDRHF Version 2 Bassin Loire-Bretagne Année 2, Délimitation des entités hydrogéologiques en région Pays de la Loire. Départements du Maine-et-Loire et de la Sarthe, Rapport d'étape, BRGM-56954-FR, Mars 2009

RHOADS BL ET AL, 2003: Stream geomorphology, bank vegetation and three-dimensional habitat hydraulics for fish in Midwestern agricultural streams. *Water Resources Research*. Vol 39, n° 8, pp 1-12.

RHOADS BL, URBAN MA, 1997: Human-induced geomorphic change in low-energy agricultural streams: an example from East-Central Illinois in "Proceedings of the Conference on Management of Landscapes Disturbed by Channel Incision". Ed. by Wang SSY et al.

RUSSO T.R., FISHER A.T., ROCHE J.W. 2012 : Improving riparian wetland conditions based on infiltration and drainage behavior during and after controlled flooding. *Journal of Hydrology* 432-433, pp 98-111.

SCHULE C.A. 1984 : La Maine, contribution à la connaissance d'un hydrosystème. Thèse de doctorat d'état. Université de Nancy II.

TOUCHART L, 2005 : Lacs, étangs et zones humides : une démarche de géographie limnologique. *Géographies Bulletin de l'Association de Géographes Français*. Vol. 82, n° 2, pp. 197-198.

VERAGUE J. 1975 ; le complexe alluvionnaire de la Briante (Orne). *Revue NOROIS*, N°85, 45-70.

VERNOUX J F., LIONS J., PETELET-GIRAUD E., SEGUIN J.J., STOLLSTEINER P., LALOT E. (2011) – Contribution à la caractérisation des relations entre eau souterraine, eau de surface et écosystèmes terrestres associés en lien avec la DCE, rapport BRGM/RP-57044-FR, 207p., 91ill., 1 ann.