

DELIMITATION DU BASSIN D'ALIMENTATION DU CAPTAGE AEP DES SABLES A HERRY

RAPPORT FINAL

Etude CPGF-12-022/18A

Avril 2013

CPGF-HORIZON

Centre-Est



eau
environnement
géophysique...

"Le Rivet" 5 allée du Levant - 38300 BOURGOIN-JALLIEU
Tél. : 04 74 18 32 47 - Fax : 04 74 18 32 58

www.cpgf-horizon-ce.com



OPOiBi
INGENIERIE QUALIFIEE
CERTIFICAT
N° 08 06 1986

SOMMAIRE

1 Préambule	4
2 Contexte et objectifs de l'étude	6
3 Phase 1 : Etude hydrogéologique.....	9
3.1 Synthèse bibliographique	9
3.2 Le captage des Sables à Herry	10
3.2.1 Présentation de l'alimentation en eau potable.....	10
3.2.2 Qualité des eaux captées sur le puits des Sables	12
3.2.3 Périmètres de protection du captage	13
3.3 Cadre physique	13
3.3.1 Contexte hydrologique	13
3.3.2 Contexte géologique	19
3.3.3 Contexte hydrogéologique	22
3.3.4 Synthèse.....	26
3.4 Méthodologie de délimitation d'un BAC	27
3.4.1 Cas d'un système aquifère continu	27
4 Phase 2 : Délimitation du bassin d'alimentation du captage	28
4.1 Méthodologie	28
4.1.1 Généralités	28
4.1.2 Application au contexte hydrogéologique	28
4.1.3 Caractéristiques hydrogéologiques locales	29
4.2 Modélisation hydrodynamique de la nappe alluviale	30
4.2.1 Principe de la modélisation	30
4.2.2 Paramètres de calage du modèle	31
4.2.3 Caractéristiques de l'aquifère.....	34
4.2.4 Calage du modèle.....	34
4.2.5 Simulations en régime dynamique permanent	36
4.2.6 Délimitation de la PNAC et du BAC.....	40
5 Phase 3 : Cartographie de la vulnérabilité	42
5.1 Méthodologie utilisée	42
5.2 Appréciation des critères sur le bassin d'alimentation.....	43
5.2.1 Pluie efficace « P »	43
5.2.2 Nature des sols « S »	44
5.2.3 Infiltration efficace « I »	48



5.2.4 Epaisseur de la zone non saturée « H »	49
5.2.5 Perméabilité des aquifères « K »	49
5.2.6 Notation des critères	50
5.3 Répartition spatiale des nitrates sur le BAC.....	53
5.4 Etude environnementale.....	56
5.4.1 Occupation agricole des sols	56
5.4.2 Autres sources de pollutions diffuses.....	57
5.5 Hiérarchisation des risques sur le BAC.....	60
6 Conclusions, recommandations.....	61



Liste des figures

- Figure 01 :** Carte de situation générale
- Figure 02 :** Localisation du captage
- Figure 03 :** Contexte géologique
- Figure 04 :** Esquisse piézométrique de référence
- Figure 05 :** Modèle hydrogéologique - Maillage et conditions aux limites
- Figure 06 :** Modèle hydrogéologique - Calage du modèle
- Figure 07 :** Modèle hydrogéologique - Piézométrie statique calculée
- Figure 08 :** Modèle hydrogéologique - Simulation de pompage à 14 m³/h
- Figure 09 :** Modèle hydrogéologique - Simulation de pompage à 100 m³/h
- Figure 10 :** Modèle hydrogéologique - Simulation de pompage à 180 m³/h
- Figure 11 :** Délimitation du Bassin d'Alimentation de Captage
- Figure 12 :** Données pédologiques de la Chambre d'Agriculture du Cher
- Figure 13 :** Etude de vulnérabilité : cartographies thématiques
- Figure 14 :** Etude de vulnérabilité : analyse multicritère
- Figure 15 :** Répartition spatiale des nitrates sur le BAC
- Figure 16 :** Carte d'occupation des sols

Liste des annexes

- Annexe :** Campagne de sondages pédologiques et tests d'infiltration

1

Préambule

Le Syndicat Intercommunal d'Alimentation en Eau Potable de la Région de Sancergues (département du Cher) assure l'alimentation en eau potable de 17 communes.

Le SIAEP de Sancergues dispose d'un puits d'eau potable dans la nappe alluviale de la Loire sur le territoire de la commune d'Herry : « le captage des Sables ». Cet ouvrage est exploité pour la production d'eau potable.

Dans le cadre de la définition des 507 captages prioritaires selon l'engagement n°101 du Grenelle de l'Environnement, le captage des Sables à Herry a été inscrit comme « captage prioritaire » dans le département du Cher. L'objectif est de réduire les pollutions diffuses sur son bassin d'alimentation (nitrates, phytosanitaires) pour préserver durablement la qualité de la ressource en eau.

CPGF-HORIZON a été mandaté par le SIAEP de Sancergues pour délimiter le bassin d'alimentation du puits des Sables, définir son fonctionnement hydrogéologique et cartographier sa vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses.

Cette étude, réalisée avec le soutien financier de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, s'est déroulée sous la direction d'un Comité de Pilotage regroupant les collectivités, les services de l'Etat et les représentants agricoles.

CPGF-HORIZON présente les résultats de cette étude.



CARTE DE SITUATION GÉNÉRALE



2

Contexte et objectifs de l'étude

Le captage AEP du puits des Sables à Herry a été déclaré comme « captage prioritaire » dans les engagements du Grenelle de l'Environnement. Conformément à l'article L.211-3 du Code de l'Environnement et l'article R.114-3 du Code Rural, le bassin (ou aire) d'alimentation de ce type de captage doit être délimitée.

L'aire d'alimentation constitue la zone sur laquelle des actions correctives ou préventives vis-à-vis des pollutions diffuses sont mises en place par le biais des programmes d'actions dans les formes prévues par l'article L.114-1 du Code Rural incluant, entre autres, des mesures agro-environnementales.

La zone d'étude est essentiellement rurale, peu urbanisée et axée sur l'activité agricole. Les dernières analyses de qualité des eaux réalisées en 2009 sur le puits des Sables confirmaient le maintien des concentrations en nitrates comprises entre 37 et 51 mg/l. Ces teneurs récurrentes sont en général inférieures à la limite de qualité pour une eau destinée à la consommation humaine (Code de la Santé Publique).

Les études menées sur le secteur montrent que la nappe des alluvions de la Loire au droit du captage des Sables est affectée par les nitrates d'origine agricole.

Les contextes géologiques, hydrogéologiques et environnementaux sont à préciser afin de définir l'origine de ces pollutions diffuses et de définir les objectifs en termes de préservation de la ressource en eau potable.

Les opérations de réduction des pollutions diffuses sur les bassins d'alimentation de captage s'articulent en plusieurs phases :



- ☞ délimitation du bassin d'alimentation et cartographie de la vulnérabilité,
- ☞ diagnostic des pressions agricoles,
- ☞ lancement d'un programme d'actions.

L'objet de la présente étude est de délimiter et de définir le fonctionnement du bassin d'alimentation du puits des Sables, de cartographier la vulnérabilité intrinsèque du BAC.

L'étude doit cibler les secteurs les plus vulnérables où les actions futures seront prioritaires.

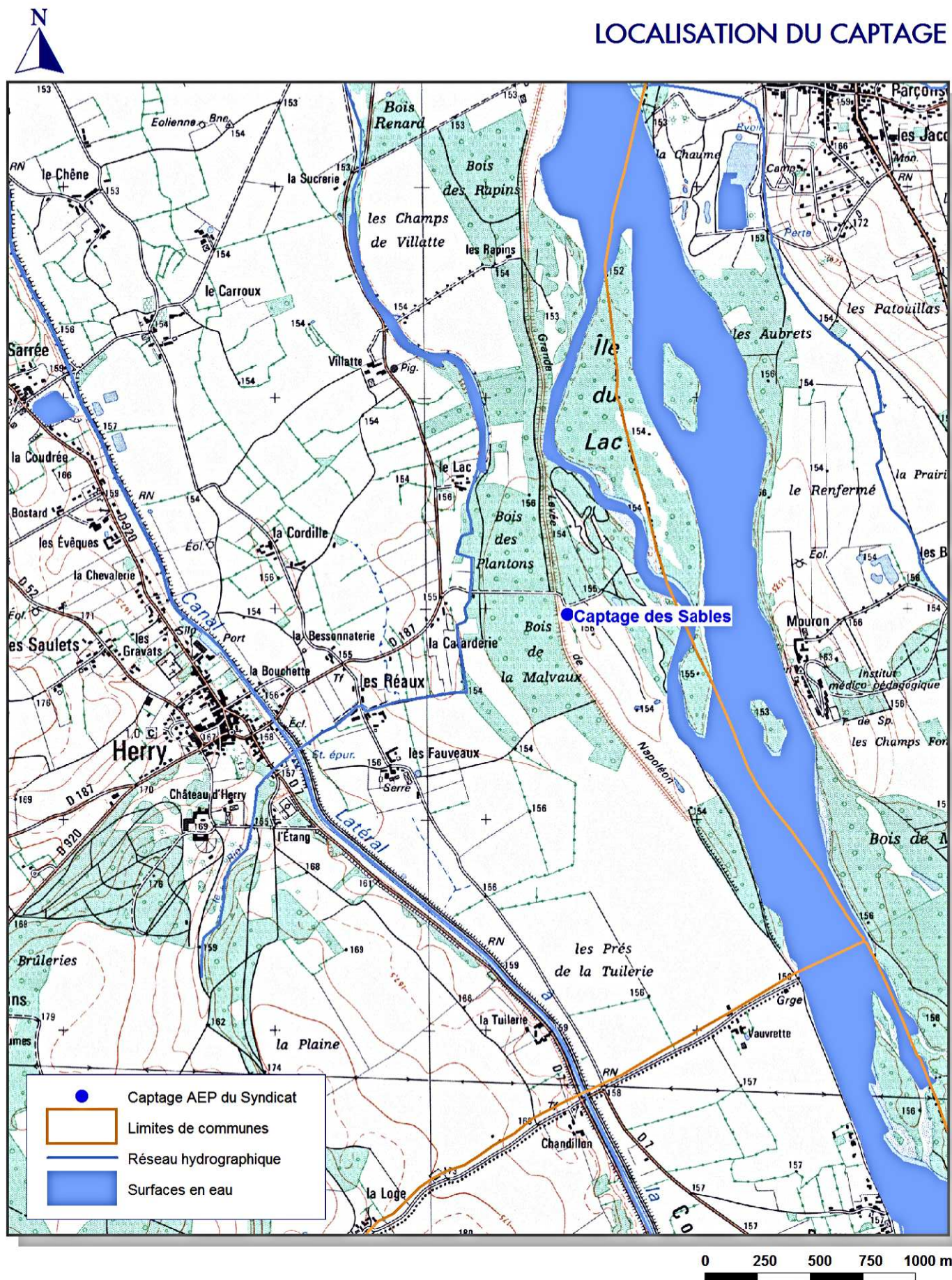


Le plan de phasage suivant est respecté au travers de l'étude :

<p style="text-align: center;">Phase 1 Etude hydrogéologique du bassin versant souterrain</p> <p style="text-align: center;"></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Caractéristiques du captage - Synthèse et/ou acquisition de données - Compréhension du système aquifère - Typologie du système - Choix de la méthode
<p style="text-align: center;">Phase 2 Délimitation du BAC</p> <p style="text-align: center;"></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Délimiter la portion de nappe alimentant le captage - Identifier la zone en surface susceptible d'influer sur la qualité de l'eau du captage
<p style="text-align: center;">Phase 3 Cartographie de la vulnérabilité</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Identifier à l'intérieur du BAC les secteurs les plus contributifs à l'alimentation du captage et donc les plus vulnérables vis-à-vis d'une pollution

(D'après le guide méthodologique du BRGM RP/55874-FR de septembre 2007)

LOCALISATION DU CAPTAGE



3

Phase 1 : Etude hydrogéologique

3.1 Synthèse bibliographique

Pour le recueil de données préalable, un ensemble de documents a été remis à CPGF-HORIZON au début de l'étude. Il regroupait plusieurs études ayant été menées sur le territoire du SIAEP de Sancergues depuis plus de 30 ans.

La liste qui suit identifie ces documents, de manière chronologique et par secteur :

- *Le Syndicat des Eaux de Sancergues :*
 - Etude de recherche en eau - 1^{ère} phase - Etude bibliographique
- *Captage AEP de Herry :*
 - Reproduction couleur des isochrones « SAFEGE » / mars 2005 / SAFEGE
 - Protection des points de prélèvement d'eau destinée à la consommation humaine - Puits lieu-dit « Les Sables » - Commune de Herry / juillet 2010 / SAFEGE
 - Dont en annexes :
 - Etudes de 1994 à 1995 par GEO-INVESTIGATIONS
 - Détermination des isochrones de 2005 par SAFEGE
 - Avis hydrogéologique de 2005 par Gilbert PIERSON
- *Captage AEP de Saint-Léger-le-Petit :*
 - Station de Saint-Léger-le-Petit - Etude hydrogéologique en rive gauche de la Loire entre les bourgs de Beffes au sud et Argenvières au nord / 1991 / GEO-INVESTIGATIONS
 - Station de Saint-Léger-le-Petit - Forage de reconnaissance / avril 1992 / GEO-INVESTIGATIONS
 - Station de Saint-Léger-le-Petit - Essais de pompages et analyses complémentaires / mai 1992 / GEO-INVESTIGATIONS
 - Station de Saint-Léger-le-Petit - Analyses chimiques sur les piézomètres Pz8 et Pz6 / juin 1992 / GEO-INVESTIGATIONS



- Station de Saint-Léger-le-Petit - Forage de reconnaissance n°2 / septembre 1992 / GEO-INVESTIGATIONS
- Station de Saint-Léger-le-Petit Puits n°2 (puits à drains rayonnants) - Etude hydrogéologique complémentaire préalable à la mise en place des périmètres de protection / novembre 1998 / GEO-INVESTIGATIONS
- Captage n°2 de Saint-Léger-le-Petit - Périmètres de protection - Avis de l'hydrogéologue agréé / mai 1999 / Philippe MAGET

L'ensemble des documents a été mis à disposition de CPGF-HORIZON par la Direction Départementale des Territoires du Cher.

3.2 Le captage des Sables à Herry

3.2.1 Présentation de l'alimentation en eau potable

3.2.1.1 Présentation de la commune

La commune d'Herry est située dans le département du Cher, au sein de la région Centre. Cette commune dépend administrativement du canton de Sancergues et de l'arrondissement de Bourges.

L'altitude moyenne de la commune est voisine de 168 mètres. Le territoire communal s'étend sur une superficie est de 49,87 km². La densité de population est de 22 hab./km².

Située à l'est du département du Cher, la commune s'étend en rive gauche de la Loire.

Herry comptait 1 075 habitants au dernier recensement de 2008. Sa population oscille autour de 1 000 habitants depuis 1962, comme indiqué dans le tableau suivant :

Tableau 3-a : Evolution de la population communale d'Herry depuis 1962

Années	1962	1968	1975	1982	1990	1999	2006	2008
Habitants	936	1097	964	1024	991	1016	1072	1075

L'activité économique sur la commune est principalement agricole. Un regroupement scolaire avec les villages alentours permet de maintenir une population familiale.

3.2.1.2 Organisation de l'alimentation en eau potable

Herry fait partie des 17 communes adhérentes au Syndicat Intercommunal d'Alimentation en Eau Potable de la région de Sancergues. A ce titre, l'adduction d'eau potable sur la commune est donc assurée par le SIAEP.

Le Syndicat a établi un contrat d'affermage avec la société SAUR. La SAUR assure la gestion des ouvrages et des réseaux du SIAEP ainsi que la distribution et la facturation de l'eau potable.



3.2.1.3 Les ressources en eau

Le SIAEP de la Région de Sancergues dispose de deux ouvrages de captage aujourd'hui exploités. L'un est implanté sur la commune d'Herry (puits des Sables), l'autre sur la commune de Saint-Léger-le-Petit (puits P2 de la Pièce aux Moines), à une quinzaine de kilomètres plus au sud.

Ces deux ouvrages captent les eaux souterraines de la nappe d'accompagnement de la Loire, qui siège au sein des alluvions sablo-graveleuses.

3.2.1.4 Traitement de l'eau potable

Les eaux brutes pompées sont traitées par chloration à l'hypochlorite de sodium.

3.2.1.5 Stockage

Le réseau d'alimentation en eau du SIAEP de Sancergues comprend 6 réservoirs. Le réservoir des Bonnins à Herry stocke les eaux en provenance du captage des Sables. Le réservoir des Chamignons reçoit les eaux du puits P2 à Saint-Léger-le-Petit.

La liste des réservoirs du SIAEP est fournie dans le tableau ci-après.

Tableau 3-b : Description des sites de stockages des eaux pompées à Herry et St-Léger-le Petit

Nom de l'ouvrage	Site	Volume	Rôle
La Prouze	Charentonnay	200 m ³	Bâche de reprise
Les Bonnins	Herry	150 m ³	Bâche de reprise
Les Rames	Gardefort	300 m ³	Tour de stockage
La Prouze	Charentonnay	500 m ³	Tour de stockage
Les Chamignons	Jussy-le-Chaudrier	1 000 m ³	Tour de stockage
Le Chêne Fourchu	Saint-Bouize	1 000 m ³	Ouvrage de stockage semi-enterré

3.2.1.6 Distribution

Le puits des Sables est équipé de trois pompes. Deux d'entre elles fournissent un débit nominal de 14 m³/h, la troisième peut pomper jusqu'à 100 m³/h. Cette dernière sert de by-pass. Elle permet en effet de faire circuler l'eau directement jusqu'au réservoir du Chêne Fourchu, sans transiter par la bâche des Bonnins.

En 2010, la production du puits des Sables était de 52 656 m³ alors que celle du puits P2 à la Pièce aux Moines était de 688 996 m³. Le volume d'eau produit par ces deux captages était donc proche de 742 000 m³.

La consommation annuelle a été de 467 209 m³.

Le rendement des réseaux en 2010 était de 63 %.

Le nombre de clients sur la commune d'Herry était de 703 cette même année, alors qu'à Saint-Léger il était de 246. Le nombre total de clients alimentés par le SIAEP est de 4 396.



3.2.2 Qualité des eaux captées sur le puits des Sables

Les eaux brutes captées dans la nappe alluviale de la Loire ont une minéralisation moyenne.

Le captage des Sables est concerné par une pollution azotée et les phytosanitaires.

Cette pollution azotée est ici représentée par la forme « nitrates ». Une tendance à la baisse des concentrations en nitrates est néanmoins constatée depuis 2007.

L'atrazine-déséthyl (métabolite de l'atrazine) est le résidu phytosanitaire qui a été relevé le plus souvent au niveau du captage des Sables. Il peut s'agir d'une rémanence de l'ancienne utilisation de l'atrazine sur les cultures. Ce composé et ses métabolites sont très persistants (temps de dégradation d'une dizaine d'années).

Le graphique suivant est une chronique des mesures de nitrates sur le puits des Sables de 1993 à 2010. Les données ont été collectées auprès de l'ARS Centre.

Graphique 3-a : Chronique des concentrations en nitrates mesurés sur le puits des Sables

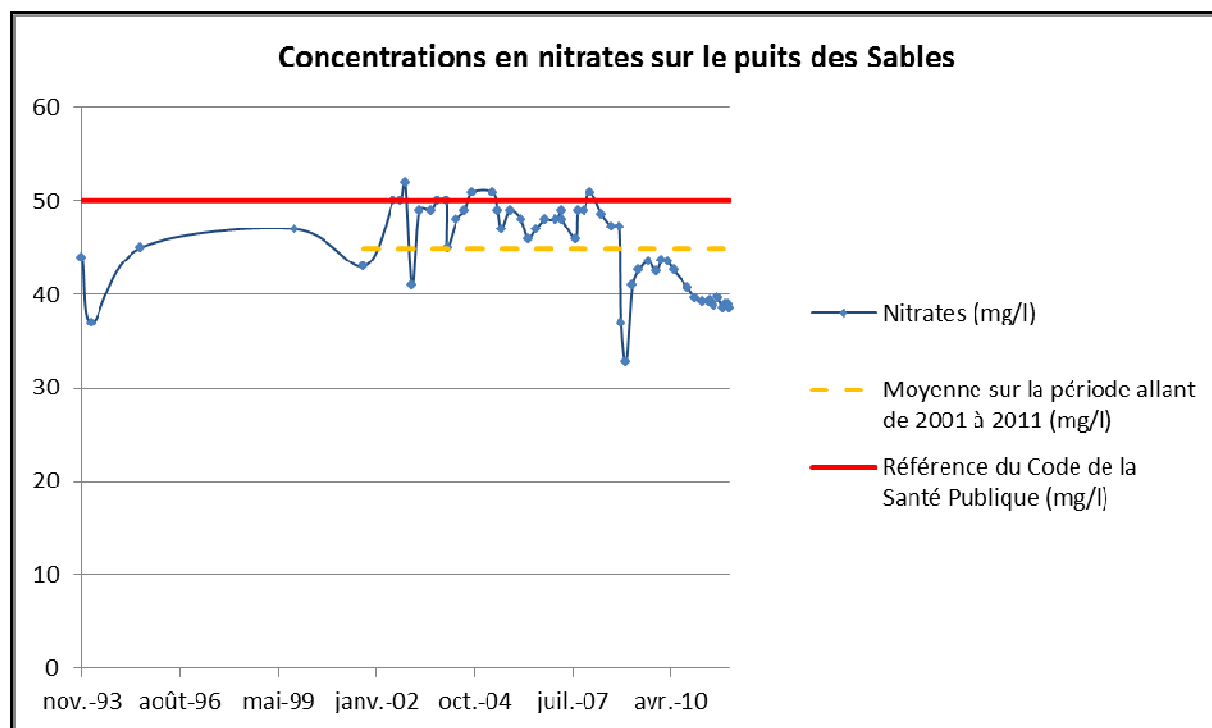


Tableau 3-c : Concentrations en phytosanitaires mesurées au niveau du captage depuis 1993 (données ADES)

Substance phytosanitaire	Nombre de mesures	Nombre de dépassements	% de dépassement	Valeur max du dépassement	Date du dernier dépassement
Atrazine-déséthyl	3	2	66,7	0,04 µg/l	mars 2007

Des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ont également été identifiés au niveau du captage des Sables jusqu'en 2001. Il s'agissait de benzopyrène et fluoranthène, aux concentrations respectives de 0,005 et 0,007 µg/l.

Les marqueurs d'anoxie tels que le fer et le manganèse restent stables. Ils sont situés sous la référence de qualité des eaux pour la consommation humaine. La nappe alluviale est ici libre, en condition aérobie.

Il en va de même pour l'ensemble des autres paramètres physico-chimiques généraux, dont les concentrations sont inférieures aux limites et références de qualité. Les paramètres sulfates, TAC et turbidité sont notamment légèrement plus élevés sur le puits P2.

Une analyse simple des eaux du puits P4, situé dans le PPR du captage des Sables, a été réalisée le 13 mars 2012. Le pH des eaux était alors de 8,15, pour une conductivité de 567 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et une température 13 $^{\circ}\text{C}$.

3.2.3 Périmètres de protection du captage

Les périmètres de protection immédiate et rapprochée sont institués par Arrêté Préfectoral sur le captage des Sables.

L'avis hydrogéologique, émis par M. PIERSON le 14 avril 2005, stipule la mise en place d'un périmètre de protection rapprochée étendu sur la plaine alluviale.

Les prescriptions mentionnent l'interdiction d'épandage d'engrais minéraux ou organiques, ainsi que l'interdiction d'épandage de produits phytosanitaires.

Ces prescriptions dans le périmètre de protection rapprochée ont amené le SIAEP à acquérir des parcelles du domaine agricole de Vauvrette, aujourd'hui reconverties en prairies d'élevage et de fauche.

3.3 Cadre physique

3.3.1 Contexte hydrologique

3.3.1.1 Réseau hydrographique

La zone d'étude est située dans le Val-de-Loire. La Loire est un fleuve drainant un bassin versant d'une superficie de plus de 30 000 km^2 au droit d'Herry.

Le seul affluent notable du fleuve à Herry est le ruisseau appelé « le Riot ». Provenant des coteaux calcaires, il s'écoule dans la plaine alluviale avant de se jeter dans la Loire plus en aval de la zone d'étude (après avoir changé plusieurs fois de nom).

Le puits des Sables est installé à environ 500 m d'un bras du fleuve. La langue de terre isolée par la formation de ce bras est nommée « l'Île du Lac ». Ce nom provient de l'étendue d'eau nommée le « Lac » et formée par l'élargissement du Riot non loin du captage.

Nous notons la présence d'un canal latéral à la Loire s'écoulant au pied des coteaux d'Herry.

Les informations relatives au référentiel de la Directive Cadre Eau synthétisées dans le tableau ci-après.



Tableau 3-d : Dénominations des entités hydrographiques d'après le référentiel de la DCE

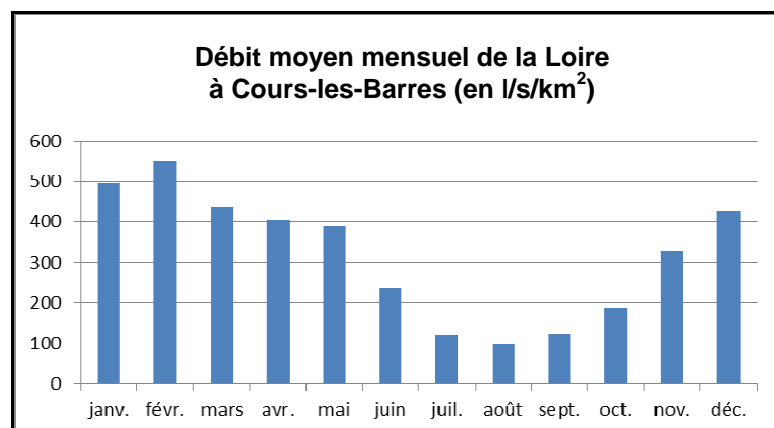
Entité	Code	Nom
Bassin versant	FRG01	La Loire, l'Allier, le Cher, l'Indre, la Creuse et la Vienne, le Loir et la Sarthe et la Mayenne
Bassin versant RNDE	BVRN3330405	Loire moyenne en amont du bec de Vienne
Région hydrographique	K	La Loire de sa source à la Vienne
Zones hydrographiques	<ul style="list-style-type: none"> • K403 • K405 	<ul style="list-style-type: none"> • La Loire de l'Aubois au Mazou • La Loire du Mazou à la Vauvize
Cours d'eau	<ul style="list-style-type: none"> • K---200G • K4054100 	<ul style="list-style-type: none"> • De plus de 100 km : Canal latéral à la Loire • De 10 à 25 km : Le Lac (ou Riot)

3.3.1.2 La Loire

3.3.1.2.1 Régime hydrologique

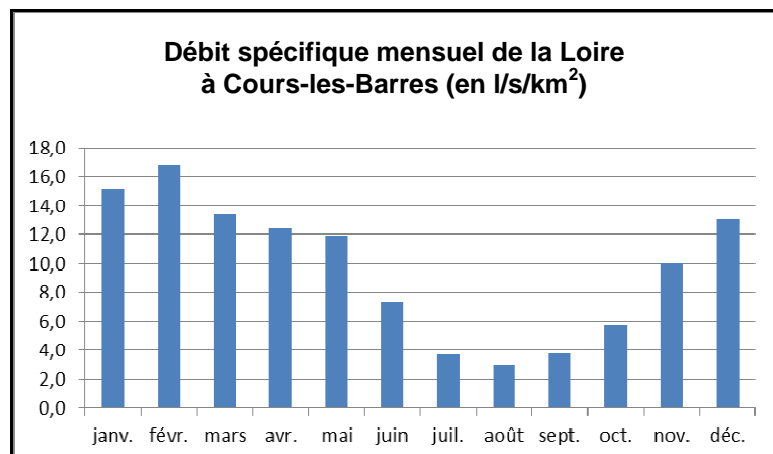
Le débit de la Loire est suivi par la station hydrologique de Cours-les-Barres, environ 20 km en amont d'Herry.

Le graphique suivant présente la moyenne des débits moyens mensuels de la Loire calculée sur 46 ans, pour la station de Cours-les-Barres.

Graphique 3-b : Débit moyen mensuel de la Loire à Cours-les-Barres

La période de hautes eaux se situe en janvier et février et la période de basses eaux entre juillet et septembre. Le débit d'étiage quinquennal de la Loire est estimé à 270 m³/s.

Les débits moyens peuvent être rapportés à la surface du bassin versant, et ainsi traduits en débits spécifiques, dont l'unité est le l/s/km².

Graphique 3-c : Débit spécifique mensuel de la Loire à Cours-les-Barres

Le débit spécifique du bassin versant de la Loire à Cours-les-Barres, en période d'étiage, est de 3 l/s/km². Le débit spécifique moyen annuel est de 9,6 l/s/km².

3.3.1.2 Qualité des eaux de la Loire

La station de suivi de la qualité des eaux de la Loire la plus proche (et avec le suivi le plus complet) est située à Saint-Satur, environ 15 km en aval d'Herry (suivi de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne : station n°04046800).

Les eaux de la Loire présentent une concentration moyenne en nitrates de l'ordre de 9 mg/l (sur plus de 20 années de données collectées). Le suivi de qualité des eaux montre une certaine saisonnalité des concentrations en nitrates, liée aux périodes de fertilisation des cultures.

La présence de nitrates dans les eaux de la Loire témoigne de l'impact des activités agricoles sur la qualité des eaux superficielles.

Les molécules phytosanitaires les plus fréquemment retrouvées dans les eaux ne sont pas détectés (atrazine, déséthylatrazine, simazine, etc.), excepté pour le diuron dont la concentration dépasse parfois très légèrement le seuil de détection des appareillages de laboratoire (concentrations comprises entre 0,02 et 0,06 µg/l).

3.3.1.3 Bilan hydroclimatique

3.3.1.3.1 Généralités

Les données climatiques mensuelles moyennes de précipitations et de températures des dix dernières années (de début 2002 à fin 2011) ont été acquises auprès de Météo France, pour la station de Sevry, située à une dizaine de kilomètres au sud-ouest d'Herry.

Les données brutes communiquées par Météo France sont placées en annexe 1.

Il est à noter que ces données incluent l'année de sécheresse exceptionnelle de 2003. Ceci nous a permis de comparer le bilan hydroclimatique moyen des 10 dernières années à un bilan hydroclimatique d'année sèche.

Le tableau suivant présente les précipitations et les températures moyennées sur la décennie allant de 2002 à 2011, ainsi que les calculs d'ETP qui en résultent :

Tableau 3-e : Données météorologiques

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total
Pluvio (mm)	65,04	50,40	65,66	53,08	68,52	55,32	60,54	81,34	48,50	67,54	67,92	83,56	767,42
Temp (°C)	3,33	4,53	7,54	11,15	14,35	18,53	20,04	19,57	16,40	12,46	7,75	3,83	11,62
ETP (mm)	10,2	15,1	28,6	46,9	64,4	88,9	98,1	95,2	76,2	53,9	29,6	12,2	619,3

Sur la période 2002-2011, la moyenne annuelle des précipitations s'élève, sur le secteur d'étude, à 767 mm. Elle varie entre un minimum d'environ 651 mm en 2005 et un maximum d'environ 941 mm en 2004.

La température annuelle moyenne est de 11,6°C, avec un pic à 12,7°C en 2011, et un minimum à 10,7°C en 2010.

L'ETP (Evapotranspiration potentielle) annuelle moyenne, calculée d'après les données de Météo France, est de 619 mm.

3.3.1.3.2 Principe du bilan hydroclimatique

Réaliser un bilan hydroclimatique sur un bassin versant consiste à dresser le bilan des entrées et des sorties d'eau de ce système. Il peut se résumer par la relation suivante :

$$P = ETR + Q$$

Avec :

P = précipitations (mm) ;

ETR = évapotranspiration réelle (mm) ;

Q = pluie efficace correspondant à la somme de R (ruissellement) + I (infiltration) ;

P constituant le terme entrant (E) et ETR, I et R constituant les termes sortants (S).

Ce bilan peut se révéler :

- équilibré, si $(E) = (S)$;
- déficitaire, si $(E) < (S)$, ce qui se traduira par un appauvrissement de la réserve globale en eau ;
- ou enfin excédentaire, si $(E) > (S)$, ce qui permettra une recharge des nappes.

Le calcul du bilan hydroclimatique nécessite, en premier lieu, d'estimer l'évapotranspiration réelle (ETR). Celle-ci se détermine à partir des valeurs mensuelles de d'ETP et de la pluviométrie P.

On admet que les premières couches du sol et du sous-sol contiennent un stock optimum d'eau (soit la portion de réserve hydrique mobilisable, RFU) qu'il faut reconstituer avant qu'il puisse y avoir ruissellement, et dont une partie est mobilisée par l'ETP en cas de déficit pluviométrique.

Plusieurs cas de figure se posent :

- si $P > ETP$, on admet qu'il y a suffisamment d'eau disponible, et dès lors $ETR=ETP$,



- si $P < ETP$, on admet que toute la pluie est reprise par l'évaporation. La valeur d'ETR se situera alors entre la valeur d'ETP (valeur maximale), et la valeur des précipitations (valeur minimale). C'est ensuite la réserve hydrique mobilisable stockée dans le sol, la RFU, qu'il faut estimer et qui déterminera la valeur définitive de l'ETR.

La RFU dépend des caractéristiques du sol ; elle a été fixée à une valeur moyenne de 100 mm.

A partir des valeurs de P et de RFU, sont calculées des valeurs de pluie efficace, ou débit d'écoulement Q et Q3, exprimées en lame d'eau en mm et en l/s/km².

Le débit Q (mm) est calculé sur la base des précipitations et de la RFU du mois (m-1).

Le débit Q3 (mm) est calculé en répartissant sur 3 mois la pluie efficace, en additionnant 50 % de l'écoulement du mois (m0), 30 % de l'écoulement du mois précédent (m-1) et 20 % de l'écoulement d'il y a deux mois (m-2).

Enfin, le débit spécifique Qs (l/s/km²) traduit la valeur de débit Q rapportée à la surface du bassin versant. Il est estimé de la manière suivante :

$$Q_s = (Q_3 \times 10^6) / (\text{nb jours dans le mois} \times 24 \times 3600)$$

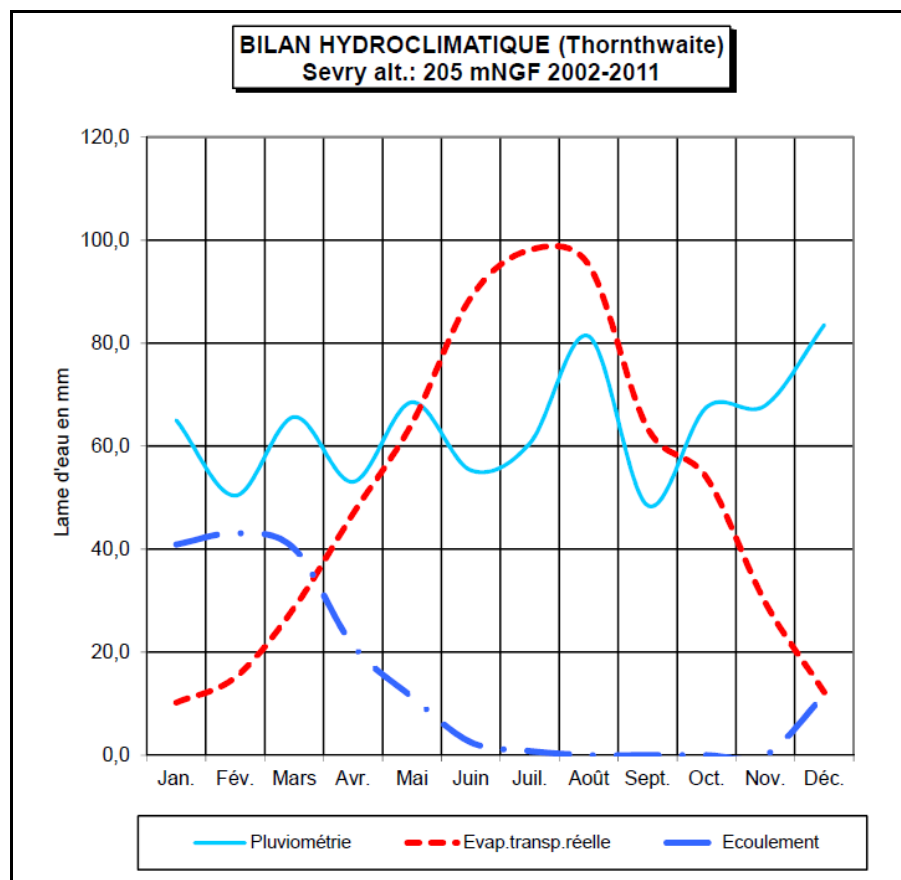
3.3.1.3.3 Résultats

Le tableau suivant présente le bilan hydroclimatique à l'échelle mensuelle, calculé à partir des valeurs mesurées entre 2002 et 2011 :

Tableau 3-f : Bilan hydro-climatique mensuel

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total
Pluvio (mm)	65,04	50,40	65,66	53,08	68,52	55,32	60,54	81,34	48,50	67,54	67,92	83,56	767,42
Temp (°C)	3,33	4,53	7,54	11,15	14,35	18,53	20,04	19,57	16,40	12,46	7,75	3,83	11,62
ETP (mm)	10,2	15,1	28,6	46,9	64,4	88,9	98,1	95,2	76,2	53,9	29,6	12,2	619,3
RFU	100	100	100	100	100	66,42	28,86	15,00	0	13,64	51,96	100	-
ETR (mm)	10,2	15,1	28,6	46,9	64,4	88,9	98,1	95,2	63,5	53,9	29,6	12,2	606,6
Q (mm)	54,84	35,30	37,06	6,18	4,12	0	0	0	0	0	0	23,32	160,82
Q3 (mm)	40,9	43,1	40,1	21,3	11,3	2,5	0,8	0	0	0	0	11,7	171,7
Qs (l/s/km²)	15,3	17,8	15	8,2	4,2	1	0,3	0	0	0	0	4,4	5,5

Graphique 3-d : Bilan hydro-climatique mensuel



Des bilans ont été calculés pour toutes les années de 2002 à 2011. Avec une pluviométrie annuelle de 767 mm, la pluie efficace est de l'ordre de 161 mm, ce qui représente un débit spécifique de 5,5 l/s/km² pour l'année moyenne 2002-2011. Pour l'année sèche de 2003, la pluviométrie a été de 699 mm et la pluie efficace de l'ordre de 193 mm (Qs = 6,8 l/s/km²).

Sur ces 10 années la pluie efficace a fluctué entre 94 mm (2011) et 315 mm (2004). Les précipitations moyennes étant inférieures à l'évapotranspiration (ETR) moyenne entre juin et septembre, la réserve (RFU) est sollicitée du mois de juin jusqu'au mois d'octobre. Ceci a pour effet de ralentir les écoulements, qui deviennent très nuls entre août et novembre (Q3 = 0).

On retiendra une pluie efficace moyenne de l'ordre de 5,5 l/s/km² qui se répartira entre ruissellement et infiltration.

Remarque :

Cette valeur de débit spécifique est inférieure au débit spécifique calculé pour l'alimentation de la Loire à Cours-les-Barres (9,6 l/s/km²) car l'alimentation de la rivière dépend non seulement de la part de pluie efficace qui contribue au ruissellement, mais aussi des apports issus de sources (émergences d'eaux souterraines). Ceci explique donc que le débit de la rivière ne soit pas nul en période d'étiage (quand la pluie efficace ne contribue plus au ruissellement de façon significative).

3.3.2 Contexte géologique

3.3.2.1 Contexte régional

La commune d'Herry se situe à l'est du département du Cher, en rive gauche de la Loire.

Le contexte géologique dans le secteur est marqué par les formations sédimentaires du Secondaire, les formations du Tertiaire et les alluvions quaternaires de la Loire.

Au Secondaire, la sédimentation marine dépose des formations calcaires et marneuses. La région est concernée par les formations du Jurassique. Les plateaux calcaires jurassiques ont été progressivement entaillés par la Loire.

Au Tertiaire, les terrains calcaires subissent une altération sous climat tropical (Eocène), puis sont recouverts de dépôts sablo-argileux par la formation du Bourbonnais (Pliocène). Sur les plateaux, il est possible de retrouver des affleurements caillouteux dans une matrice sablo-argileuse d'âge éocène. Des silicifications locales ont entraîné la formation de silex ayant pu, par la suite, être roulés.

A la fin du Tertiaire et au Quaternaire, la Loire s'encaisse progressivement dans les calcaires. Les dépôts argilo-sableux du Bourbonnais se sont donc retrouvés surélevés d'une quinzaine de mètres.

Les alluvions constituant actuellement la plaine d'inondation de la Loire sont donc récentes et datées du Quaternaire. Entre les alluvions récentes et les épandages du Bourbonnais, des terrasses d'alluvions plus anciennes sont retrouvées.

3.3.2.2 Contexte local

La commune d'Herry est en partie située sur les formations du Bourbonnais et les anciennes terrasses de la Loire.

Dans la zone d'étude, au droit du captage des Sables, les formations géologiques rencontrées sont constituées de la succession stratigraphique verticale du substratum jurassique, chapeauté par les alluvions récentes de la Loire.

La série sédimentaire complète est ici détaillée, de bas en haut :

- ✓ niveaux marno-calcaires du Lias (Toarcien), dont la profondeur de base est de 225 m ;
- ✓ calcaires oolithiques du Callovien (j_3), dont la profondeur de base est de 140 m ;
- ✓ calcaires de l'Oxfordien moyen (j_5) ;
- ✓ calcaires de l'Oxfordien supérieur (j_{6a-b}) : calcaires lités inférieurs et calcaires crayeux de Bourges, d'une puissance respective de 120 et 50 m ;
- ✓ calcaires de l'Oxfordien supérieur et du Kimméridgien inférieur (j_{6c-7a}) : calcaires lités supérieurs et calcaires de Levroux (partie supérieure), d'une puissance de 25 à 30 m ;
- ✓ calcaires du Kimméridgien inférieur (j_{7b}) : calcaires de Buzançais (trois membres), dont la puissance du membre inférieur est estimée à 15 m.

Les calcaires rencontrés à la base du puits d'Herry sont datés de l'Oxfordien.



Le captage des Sables est un ouvrage d'environ 9 m de profondeur, réalisé en 1980, au droit des alluvions quaternaires de la Loire.

Le contexte géologique est présenté sur la figure suivante.

3.3.2.3 Etude structurale

La tectonique affectant les terrains calcaires du Secondaire a entraîné la formation d'un réseau de failles d'orientation subméridienne (nord-sud). Orienté selon un axe sud-ouest nord-est, un ensemble de failles conjuguées de second ordre découpe le paysage des bords de Loire.

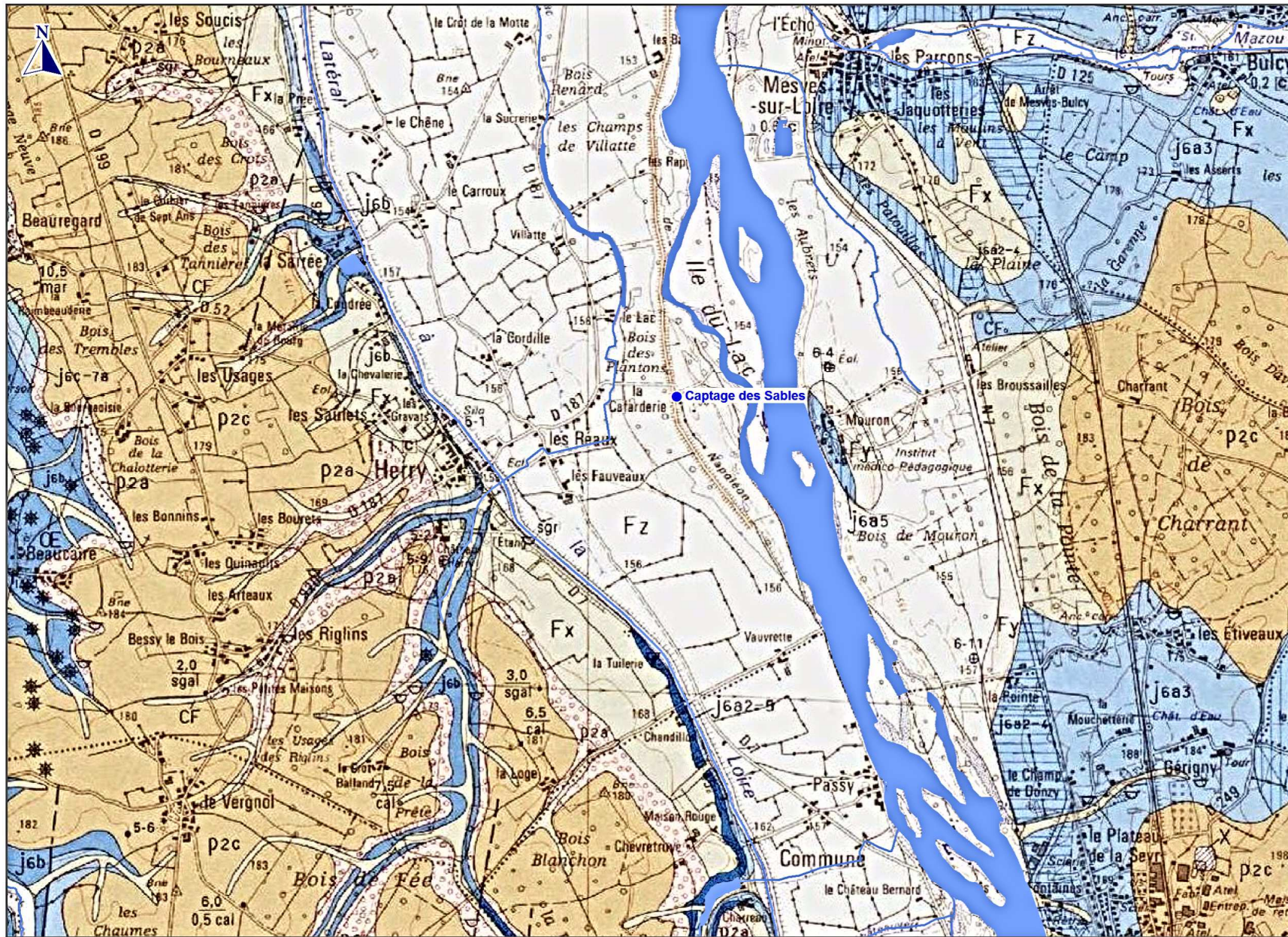
Cette tectonique cassante date du Secondaire, liée à une extension crustale.

Les rejeux verticaux ont permis le basculement de panneaux d'inclinaison variable compris entre les précédentes failles. Les pendages sont généralement orientés légèrement vers l'ouest.

D'autres phénomènes tectoniques ont affecté les dépôts sédimentaires superficiels jusqu'au Quaternaire.

Cette succession d'épisodes tectoniques complique fortement la compréhension du contexte hydrogéologique sur les coteaux.





CONTEXTE GEOLOGIQUE

- Captage AEP du Syndica
- Surfaces en eau
- Réseau hydrographique

SECONDAIRE

- j5 : calcaires de l'Oxfordien moyen
- j6a-b : calcaires de l'Oxfordien supérieur
- j6c-7a : calcaires de l'Oxfordien supérieur et du Kimméridgien inférieur
- j7b : calcaires du Kimméridgien inférieur

TERTIAIRE

- e : formations argileuses de l'Eocène
- p2 ou FL : placages pliocènes sablo-argileux dits du Bourbonnais

QUATERNAIRE

- Fw / Fx : terrasses alluvionnaires anciennes de la Loire
- Fy / Fz : alluvions récentes de la Loire



3.3.3 Contexte hydrogéologique

3.3.3.1 Aquifères en présence

3.3.3.1.1 Nappes des alluvions de la Loire

Le puits des Sables est implanté au droit des alluvions récentes de la Loire.

D'après la notice de la carte géologique du BRGM, les données de sondages recueillies dans la BSS et la bibliographie fournie, ces formations alluviales sont constituées de sables et graviers plus ou moins argileux, mêlés avec quelques éléments quartzeux. Elles sont recouvertes d'un horizon végétal argilo-sableux.

L'épaisseur des alluvions sablo-argileuses varie de 6 à 11 m dans la région de Sancergues. Sur Herry, un surcreusement du substratum calcaire selon une gouttière orientée sud-est / ouest-nord-ouest a entraîné une accumulation alluvionnaire.

3.3.3.1.2 Calcaires du Jurassique

Les calcaires jurassiques sont le siège d'une ressource en eau répartie de manière hétérogène sur les coteaux du Val-de-Loire. En effet, de nombreux niveaux marneux cloisonnent la ressource.

Les failles subméridiennes jouent un rôle similaire, mais de manière verticale, produisant tantôt des zones d'alimentation privilégiée, tantôt des barrages hydrauliques.

Du point de vue de la DCE (Directive Cadre Européenne), cette masse d'eau est référencée sous le code FRGG078 et sous le libellé « Calcaires et marnes du Jurassique supérieur Berry est ».

L'état actuel de la masse d'eau est caractérisé par une altération de la qualité par les nitrates et les pesticides. L'objectif de bon état de la masse d'eau en 2027 vise la diminution des concentrations en nitrates et en produits phytosanitaires.

3.3.3.2 Piézométrie

3.3.3.2.1 Sens d'écoulement et gradient hydraulique

Une campagne piézométrique a été réalisée les 13 et 14 mars 2012 en période de transition entre régimes de hautes et basses eaux.

Elle a eu lieu au sein de l'aquifère des alluvions récentes de la Loire ainsi que sur les terrasses alluvionnaires plus anciennes sur lesquelles s'est bâtie Herry.

Plusieurs points (ouvrages AEP, puits de particuliers, cours d'eau, etc.) ont été nivelés au GPS avec une précision centimétrique afin de permettre une lecture référencée NGF des niveaux statiques.

Un drainage des terrains par la Loire est observé à l'est de la levée de Napoléon. Plus à l'ouest, les isopièzes s'orientent de manière quasi parallèle par rapport au fleuve. Cette disposition est le reflet de la part d'alimentation de la nappe par les coteaux. L'écoulement général se fait selon un axe sud-nord en rive gauche de la Loire. Le gradient est plus important sur les versants qu'en bordure de Loire (tassement des isopièzes).



Le captage semble être indépendant de la Loire.

Cette campagne vient étayer celles réalisées en 1994 et 1995 par M. Max MICHEL du bureau d'études GEO-INVESTIGATIONS (cf. annexe 2). Le réseau de piézomètres qui avait alors été mis en place (réseau incomplet aujourd'hui) avait permis de réaliser des mesures nombreuses et précises au droit du PPR. Trois axes principaux d'écoulement vers le captage avaient été révélés :

- ☞ un premier axe de drainage par la Loire à l'est de la levée de Napoléon ;
- ☞ un second axe d'alimentation au sein des alluvions s'orientant sud-est / nord-ouest puis obliquant vers la Loire au droit du captage des Sables ;
- ☞ un troisième et dernier axe de circulation des eaux provenant des bois au sud de la commune d'Herry, depuis les coteaux calcaires.

De notre campagne piézométrique et de celles réalisées par GEO-INVESTIGATIONS, une carte piézométrique de référence a pu être dessinée.

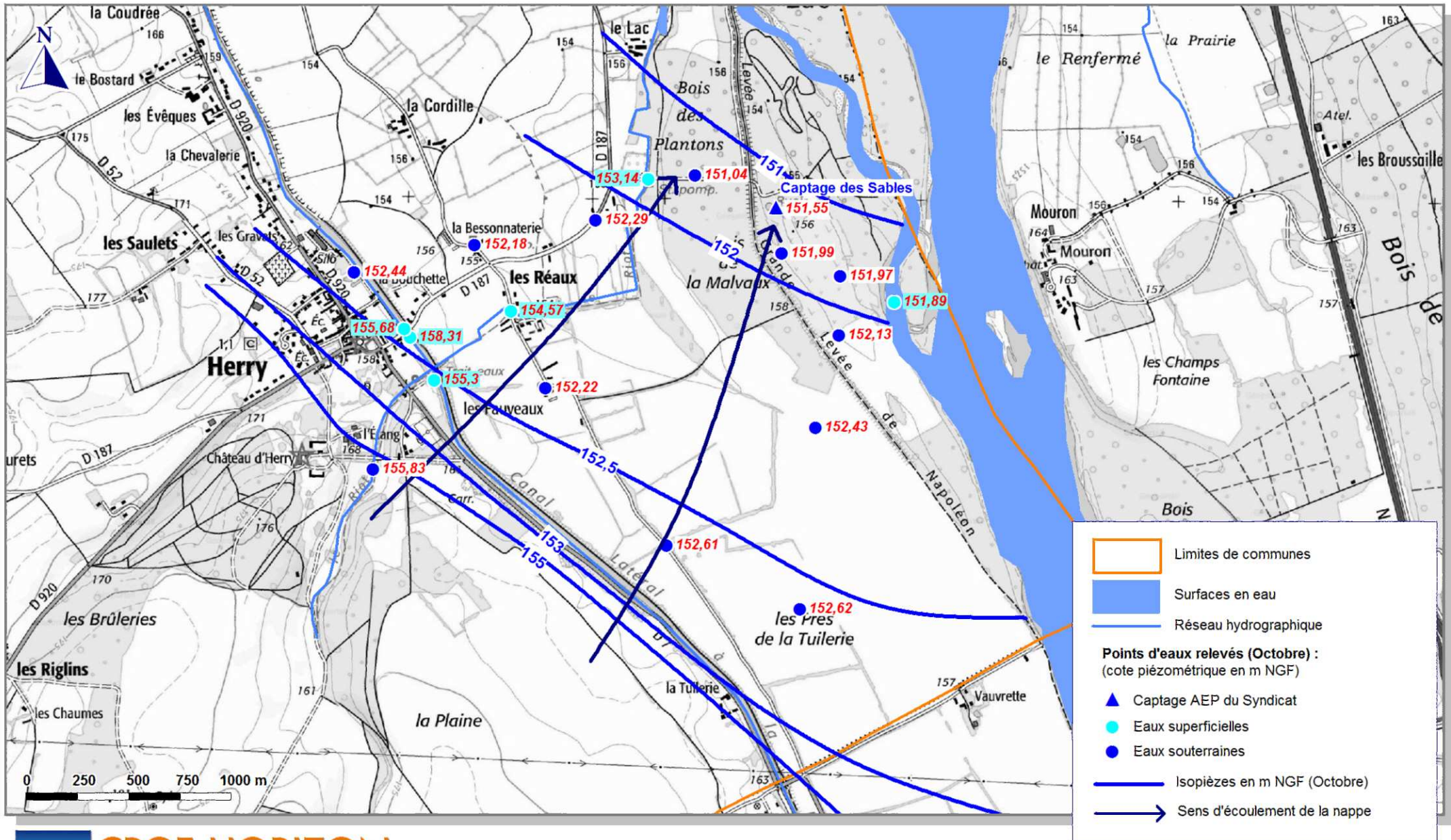
Globalement, les écoulements au sein des alluvions du lit majeur de la Loire préservent un sens de circulation sud-nord. Un gradient hydraulique de nappe de 0,08 % a été défini par SAFEGE lors d'essais de pompages ayant eu lieu en 2004.

Le canal latéral à la Loire ne semble avoir aucun impact sur les écoulements au sein des alluvions. Il est en effet surélevé par rapport à la plaine. Lors des inspections de terrain, des fuites allant du canal au Riot ont toutefois été constatées. Cette alimentation reste faible en termes de débit.

Une esquisse piézométrique de référence est présentée sur la figure suivante.



ESQUISSE PIEZOMETRIQUE DE REFERENCE



- Limites de communes
- Surfaces en eau
- Réseau hydrographique
- Points d'eaux relevés (Octobre) :**
(cote piézométrique en m NGF)
- Captage AEP du Syndicat
- Eaux superficielles
- Eaux souterraines
- Isopièzes en m NGF (Octobre)
- Sens d'écoulement de la nappe

3.3.3.2 Amplitude piézométrique et variations saisonnières

Les quatre campagnes de mesures piézométriques réalisées par GEO-INVESTIGATIONS permettent de réaliser des comparaisons au niveau des écoulements entre les saisons.

Le constat est que les variations du niveau de la Loire, dues aux variations annuelles de l'alimentation météorique, entraînent des changements en ce qui concerne les isopièzes dans la plaine alluviale.

En période de basses eaux, la Loire s'encaisse et draine les alluvions. Les isopièzes s'inclinent alors dans la direction du fleuve. La part d'alimentation depuis les coteaux devient alors périodiquement importante.

En période de hautes eaux, la Loire alimente les terrains quaternaires, et le tracé des isopièzes se fait alors de manière quasi perpendiculaire au fleuve. L'impact des écoulements provenant des coteaux se fait alors beaucoup moins ressentir.

En 1994-1995, l'amplitude du marnage entre les saisons est plus conséquente côté Loire que du côté des anciennes terrasses et des placages tertiaires. Ainsi, entre hautes et basses eaux, le niveau piézométrique s'abat d'environ 4 m en bordure de Loire, alors qu'il ne baisse que de près de 2 m au milieu de la plaine alluviale (il est donc tout à fait imaginable que ce marnage soit encore plus faible dans les terrains aquifères au pied du bourg d'Herry).

D'après les données de GEOPAL en 2009, le niveau piézométrique sur Herry est situé en moyenne à 20 m de profondeur en zone de plateau, et compris entre 5 et 10 m sous les formations du Bourbonnais.

En 2012, il n'a pas été possible de faire une comparaison entre les saisons, compte tenu du temps imparti pour l'étude. Néanmoins, les niveaux mesurés sur la Loire et dans le Pz3 en mars 2012 seraient équivalents aux niveaux attendus en période de basses eaux lors des campagnes de GEO-INVESTIGATIONS. Le niveau de la Loire a donc baissé depuis 17 ans, même si l'année 2012 a démarré sur des bases très sèches.

3.3.3.3 Sources

Aucune source de débordement n'est recensée sur la commune d'Herry.

3.3.3.3 Paramètres hydrodynamiques de la nappe des alluvions

3.3.3.3.1 Données existantes

Des essais de débits ont eu lieu à la création du captage des Sables. Ils ont permis de déterminer un débit exploitable de l'ouvrage supérieur à 200 m³/h.

En 2004, le bureau d'études SAFEGE, avec l'aide technique du fermier (SAUR), a réalisé un essai de pompage de longue durée, à un débit fixé de 180 m³/h. De cet essai, plusieurs conclusions pouvaient être tirées :

- pas d'atteinte d'un front d'alimentation ou d'une barrière étanche, cela vient confirmer l'hypothèse d'indépendance du captage par rapport à la Loire,
- transmissivité T de l'ordre de 1 à 2.10⁻¹ m²/s sur les alluvions près du puits,
- perméabilité K de 2.10⁻² m/s (avec une épaisseur d'aquifère H de près de 7 m),

- coefficient d'emmagasinement S de 3,2 %.

Ces observations sont proches de celles issues des études hydrogéologiques réalisées au début des années 90 dans le secteur d'Herry. Une perméabilité d'environ 4.10^{-3} m/s (selon avis hydrogéologique de M. SCHMIDT) avait été déterminée à partir d'essais sur l'ouvrage de code BSS 04946X1015 / F2. Le facteur 5 de différence peut provenir d'une épaisseur d'aquifère saturé plus faible ou d'une granulométrie des terrains moins importante.

3.3.4 Synthèse

Situé en rive gauche de la Loire dans le département du Cher, le bassin d'alimentation du champ captant d'Herry est soumis aux conditions climatiques suivantes (moyenne sur la période allant de 2002 à 2011) :

- un cumul de précipitations de 767 mm,
- une température moyenne annuelle de 11,6 °C,
- et une ETP de 619 mm.

Le contexte géologique local peut être synthétiquement décrit comme tel :

Les dépôts calcaires marins du Secondaire (allant du Jurassique inférieur jusqu'au Jurassique supérieur) sont localement recouverts par des placages datés de l'Eocène et du Pliocène (formations du Bourbonnais). En bordure de Loire, les alluvions quaternaires se répartissent dans tout le lit majeur. La commune d'Herry est en partie bâtie sur d'anciennes terrasses alluvionnaires.

La succession verticale des calcaires du Jurassique est compartimentée. En effet, un système faillé subméridien s'est formé par l'enchaînement de jeux tectoniques.

La piézométrie à l'amont du puits des Sables suit plusieurs axes d'écoulement s'orientant globalement du sud vers le nord avec un gradient de 0,08 %.

Le marnage en bord de Loire est important entre périodes de hautes et basses eaux. L'encaissement du fleuve modifie les écoulements au sein de la plaine alluviale. La part d'alimentation de l'aquifère des alluvions de la Loire par les coteaux calcaires varie donc saisonnièrement (importance marquée en période de basses eaux).

Des essais de pompages ont été réalisés depuis la création de l'ouvrage en 1980. Les paramètres hydrodynamiques suivants étaient calculés :

- une transmissivité comprise entre 1 et 2.10^{-1} m²/s,
- une perméabilité locale de l'ordre de 10^{-2} m/s,
- un coefficient d'emmagasinement d'environ 3 %.

Selon des essais déjà réalisés, la mise en œuvre de nouveaux pompages d'essais ne semble pas nécessaire dans le cadre de la présente étude. Néanmoins, un pompage par paliers de débits effectué avec des pompes externes à l'ouvrage, et suivi par sondes de niveau, permettrait de définir clairement la courbe caractéristique du puits et de réactualiser son débit critique (diminuant avec l'âge des installations).

3.4 Méthodologie de délimitation d'un BAC

Le bassin ou aire d'alimentation d'un captage d'eaux souterraines (BAC, AAC) est la surface topographique correspondant à la portion de nappe d'eau souterraine alimentant le captage (ou en d'autres termes à l'ensemble des particules d'eau situées dans la zone saturée qui termineront leur course dans le captage).

CPGF-HORIZON s'est vu confier, au sein de la phase 2 de la présente étude, la délimitation du bassin d'alimentation du captage des Sables. La méthodologie pour mener à bien cette étape de l'étude est déclinée dans le chapitre suivant.

3.4.1 Cas d'un système aquifère continu

La nappe alluvionnaire exploitée par le captage des Sables est une nappe libre et continue. Elle est alimentée par la Loire et les coteaux calcaires.

Dans un tel cadre, le guide du BRGM de septembre 2007 (BRGM/RP-55874-FR) ayant trait à la délimitation des bassins d'alimentation de captage liste plusieurs méthodes à choisir en fonction de certaines caractéristiques du milieu :

- cas n°1 : *le captage est une source et n'est pas soumis à des circulations rapides (pas de zone d'appel) ;*
- cas n°2 : *la connaissance du système aquifère tend à montrer que l'écoulement suit une direction principale, sans écarts notables, notamment dus à des pompages dans l'aquifère (zone d'appel simple). Aucune rivière n'est drainée - naturellement ou artificiellement - par la nappe. A posteriori, on s'assure que la PNAC (Portion de Nappe Alimentant le Captage) délimitée reste dans les limites latérales du bassin versant hydrogéologique ;*
- cas n°3 : *l'écoulement dans l'aquifère ne suit pas une direction principale, ou des pompages influent sur cet écoulement, ou bien l'on sort du bassin versant hydrogéologique, ou la nappe draine un cours d'eau sans en modifier la hauteur d'eau. L'aquifère peut être modélisé par un système monocouche à nappe libre ;*
- cas n°4 : *la modélisation des écoulements dans l'aquifère nécessite la prise en compte d'un système multicouche, le cas échéant à nappe captive ou semi-captive ou avec intervention de drainages à partir d'épontes ou encore avec des échanges nappe-rivière complexes (non modélisables par une charge imposée au niveau du cours d'eau).*

☞ Dans le cas du puits des Sables, c'est le cas n°3 qui sera privilégié. Un modèle monocouche sera donc réalisé.

Remarque :

Le bassin hydrologique de la Loire sera occulté lors de la modélisation, du fait de son importance. Comme le souligne le guide du BRGM :

« [...] Il n'apparaît pas réaliste d'intégrer la totalité du bassin versant d'un grand cours d'eau (exemple d'un captage dans les alluvions de la Seine). »



4

Phase 2 : Délimitation du bassin d'alimentation du captage

4.1 Méthodologie

4.1.1 Généralités

Le bassin (ou aire) d'alimentation d'un captage d'eaux souterraines (BAC, AAC) est la surface topographique correspondant à la portion de nappe d'eau souterraine alimentant le captage. En d'autres termes, il s'agit de l'ensemble des particules d'eau situées dans la zone saturée qui termineront leur course dans le captage.

CPGF-HORIZON s'est vu confier, au sein de la phase 2 de la présente étude, la délimitation du bassin d'alimentation du captage des Sables. La méthodologie pour mener à bien cette étape de l'étude est déclinée dans le chapitre suivant.

4.1.2 Application au contexte hydrogéologique

La nappe alluvionnaire exploitée par le captage des Sables est une nappe libre et continue. Elle est alimentée par la Loire et les coteaux calcaires.

Dans un tel cadre, le guide du BRGM de septembre 2007 (BRGM/RP-55874-FR) ayant trait à la délimitation des bassins d'alimentation de captage mentionne plusieurs méthodes utilisables en fonction des caractéristiques hydrogéologiques locales :

- ✓ cas n°1 : *le captage est une source et n'est pas soumis à des circulations rapides (pas de zone d'appel),*
- ✓ cas n°2 : *la connaissance du système aquifère tend à montrer que l'écoulement suit une direction principale, sans écarts notables, notamment dus à des pompages dans l'aquifère (zone d'appel simple). Aucune rivière n'est drainée - naturellement ou artificiellement - par la nappe. A posteriori, on s'assure que la PNAC (Portion de Nappe Alimentant le Captage) délimitée reste dans les limites latérales du bassin versant hydrogéologique,*
- ✓ cas n°3 : *l'écoulement dans l'aquifère ne suit pas une direction principale, ou des pompages influent sur cet écoulement, ou bien l'on sort du bassin versant hydrogéologique, ou la nappe draine un cours d'eau sans en modifier la hauteur d'eau. L'aquifère peut être modélisé par un système monocouche à nappe libre,*



✓ cas n°4 : la modélisation des écoulements dans l'aquifère nécessite la prise en compte d'un système multicouche, le cas échéant à nappe captive ou semi-captive ou avec intervention de drainages à partir d'épentes, ou encore avec des échanges nappe-rivière complexes (non modélisables par une charge imposée au niveau du cours d'eau),

☞ Dans le cas du puits des Sables, c'est le cas n°3 qui sera privilégié. Un modèle hydrodynamique de nappe monocouche sera donc réalisé pour délimiter la zone d'appel en pompage.

Remarque :

Le bassin hydrologique de la Loire sera occulté lors de la modélisation du fait de son importance. Comme le souligne le guide du BRGM : « [...] Il n'apparaît pas réaliste d'intégrer la totalité du bassin versant d'un grand cours d'eau (exemple d'un captage dans les alluvions de la Seine). »

4.1.3 Caractéristiques hydrogéologiques locales

La phase 1 de l'étude avait pour but de préciser le contexte hydrogéologique, en déterminant notamment les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère alluvial, mais aussi en estimant sa géométrie. Les données synthétisées lors de cette phase ont également permis de mettre à jour la relation d'alimentation de la plaine par les coteaux, plus ou moins prononcée en fonction de la période hydrologique.

Les différentes campagnes piézométriques réalisées au cours de cette étude et lors des précédentes, ont permis de déterminer le sens d'écoulement dans la nappe qui est globalement orienté du sud vers le nord. La Loire draine la nappe et constitue son niveau de base. Ces campagnes montrent aussi que le gradient de la nappe augmente en direction des terrasses et du versant, sans doute à la faveur de formations moins perméables.

Les pompages d'essais effectués sur le captage du Syndicat mais également sur les différents ouvrages du secteur ont mis en évidence des perméabilités alluvionnaires variant localement entre 10^{-4} et 10^{-2} m/s.

L'hétérogénéité des perméabilités reflète la complexité de la géométrie de l'aquifère alluvial, composé de différentes terrasses de dépôt.

Cette géométrie a été approchée dans les études préalables suivant des méthodes de prospections électriques permettant d'estimer l'épaisseur et la résistivité des matériaux. La part d'alimentation des alluvions par les infiltrations sur les coteaux calcaires a pu être démontrée en partie par le rendu de ces méthodes qui révèlent les variations de la cote du substratum. Les sondages mécaniques réalisés dans la zone d'étude viennent confirmer cette hypothèse au travers des relevés lithologiques.

Dans la plaine alluviale de la Loire, au droit du puits, l'épaisseur d'alluvions est estimée à une dizaine de mètres. Elle oscille globalement entre 5 et 15 mètres.

La terrasse alluvionnaire sur laquelle s'est bâtie la commune d'Herry est en continuité avec l'aquifère alluvial. La perméabilité de cette dernière est cependant plus faible que celle retrouvée aux environs immédiats du puits des Sables.

Les écoulements sur les coteaux calcaires sont partiellement drainés par le cours d'eau du Riot circulant dans les colluvions de fond de talweg. Dans la plaine, le Riot est perché, et ses eaux ne communiquent pas avec la nappe.

Le faible débit du Riot montre qu'il ne capte qu'une partie des écoulements calcaires. La majeure partie des eaux s'infiltrant dans les calcaires ressort localement dans la plaine au travers de failles dans le substratum.

Ainsi, le Bassin d'Alimentation du Captage (BAC) des Sables ne pourra être tracé qu'en prenant en compte le bassin versant hydrogéologique calcaire dont l'exutoire superficiel est le Riot. Il sera associé à la Portion de Nappe Alimentant le Captage (PNAC) pour former le BAC proposé dans cette phase 2. Au vu de la configuration géologique du secteur d'étude, le bassin versant hydrogéologique précité sera délimité en suivant les crêtes topographiques.

L'extension de la PNAC va être précisée à l'aide d'un modèle mathématique qui est abordé dans les paragraphes suivants.

4.2 Modélisation hydrodynamique de la nappe alluviale

A partir de l'ensemble des informations recueillies, nous avons créé un modèle mathématique de l'aquifère sous le logiciel SAGA. Le but des modélisations réalisées est de délimiter la PNAC (Portion de Nappe Alimentant les Captages).

4.2.1 Principe de la modélisation

Le principe de toute modélisation numérique consiste à diviser une zone d'intérêt en mailles (discrétisation), sur lesquelles sont ensuite appliquées les équations de base de l'écoulement en milieu poreux.

Le logiciel que nous avons utilisé, SAGA, est un logiciel de modélisation hydrogéologique qui permet de calculer les écoulements dans un système aquifère. Il est basé sur un code de calcul par différences finies.

En hydrogéologie, la démarche de modélisation peut être décomposée en deux étapes :

- ↳ Une première étape dite de « calage », qui consiste à reproduire par le calcul les écoulements observés dans la réalité, à un moment donné, et ce en faisant varier les différents paramètres intervenant dans les équations fondamentales. Dans le cas présent, le calage a consisté à utiliser les données géologiques et hydrogéologiques recueillies pour restituer « mathématiquement » une piézométrie de référence comparable à celle identifiée sur le terrain. Cette phase de calage consiste donc à fixer les paramètres caractérisant la configuration de l'aquifère et plus généralement ses propriétés, déterminantes pour l'organisation et le fonctionnement local des écoulements.
- ↳ Une fois le calage effectué, l'intérêt est de pouvoir faire varier des paramètres pour tester différents scénarii de gestion ou de pollution de l'aquifère. Cette deuxième étape permet donc une approche prévisionnelle dont les limites reposent en grande partie sur la qualité du calage, et par conséquent sur la quantité de données disponibles et/ou exploitables ainsi que sur la facilité de description numérique de ces données.



4.2.2 Paramètres de calage du modèle

4.2.2.1 Géométrie du modèle et maillage

L'extension totale du modèle est d'environ 16,3 km² et englobe le secteur compris entre le lieu-dit « la Sarrée » au nord et celui de « Passy » au sud. A l'est, le modèle s'étend en rive gauche de la Loire. A l'ouest, la limite du modèle a été calquée sur la limite des terrasses alluvionnaires anciennes.

Le modèle est de type monocouche. Seules les alluvions de la Loire sont modélisées.

Ainsi, l'épaisseur du modèle est en moyenne de l'ordre de 10 m. La géométrie de l'aquifère a été renseignée à partir des coupes de forage à notre disposition. Une interpolation linéaire a ensuite permis de renseigner la géométrie dans son ensemble.

La zone a été discrétisée suivant un maillage régulier : les mailles définies sont donc toutes de 50 m x 50 m. Au droit du captage, il n'a pas été jugé nécessaire de resserrer ce maillage, étant donné que le puits des Sables est un ouvrage à drains dont la longueur avoisine les 20 m.

4.2.2.2 Conditions aux limites

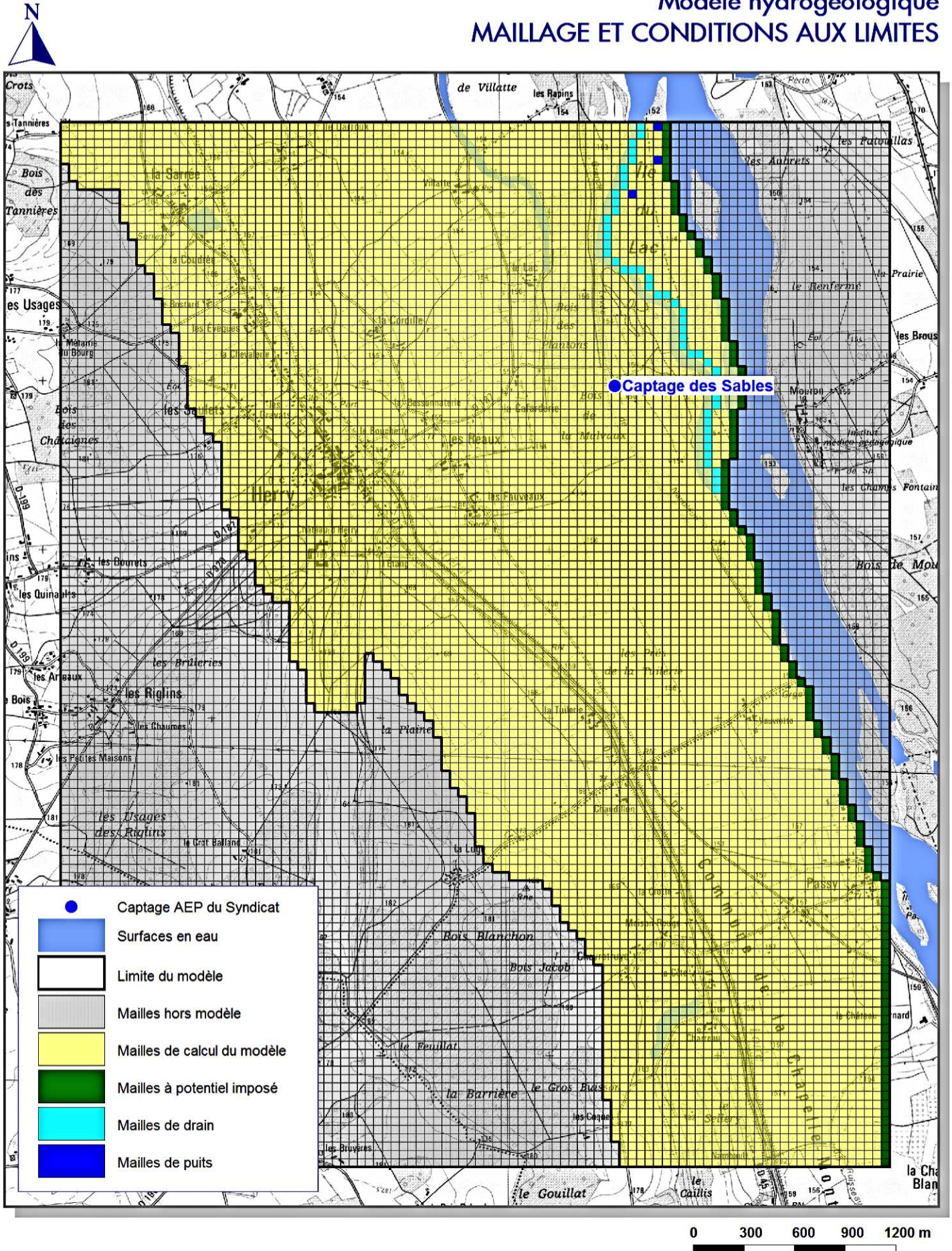
Nous avons appliqué trois types de conditions aux limites :

- Condition de flux imposé : le flux traversant la maille est imposé dans le modèle et le programme calcule le potentiel lié à ce flux. Cette condition a été appliquée à l'amont du modèle pour simuler le flux de la nappe de versant (provenant des infiltrations calcaires). Ce type de condition a aussi été imposé à l'ensemble des mailles du modèle, pour traduire la pluie efficace (précipitations totales - évapotranspiration). Ainsi, une pluviométrie efficace de 161 mm/an a été appliquée sur chaque maille (moyenne de la pluviométrie efficace sur 10 ans).
- Condition de drain : ces mailles ont été utilisées pour matérialiser les échanges nappe / rivière au niveau du bras de la Loire isolant l'Île du Lac. Pour simuler cet apport, ils ont été codés en mailles de drain, les cotes du fil d'eau ont été renseignées. La participation des rivières aux échanges avec la nappe est codée grâce à une valeur de colmatage. Cette valeur représente donc la part d'infiltration au travers des berges.
- Condition de potentiel imposé : la cote de la nappe est imposée et le modèle calcule le flux nécessaire pour maintenir la nappe à cette cote. Cette condition a été utilisée au droit de la Loire qui constitue le niveau de base et l'exutoire de la nappe alluviale. La cote imposée a été tirée de la campagne piézométrique de calage.

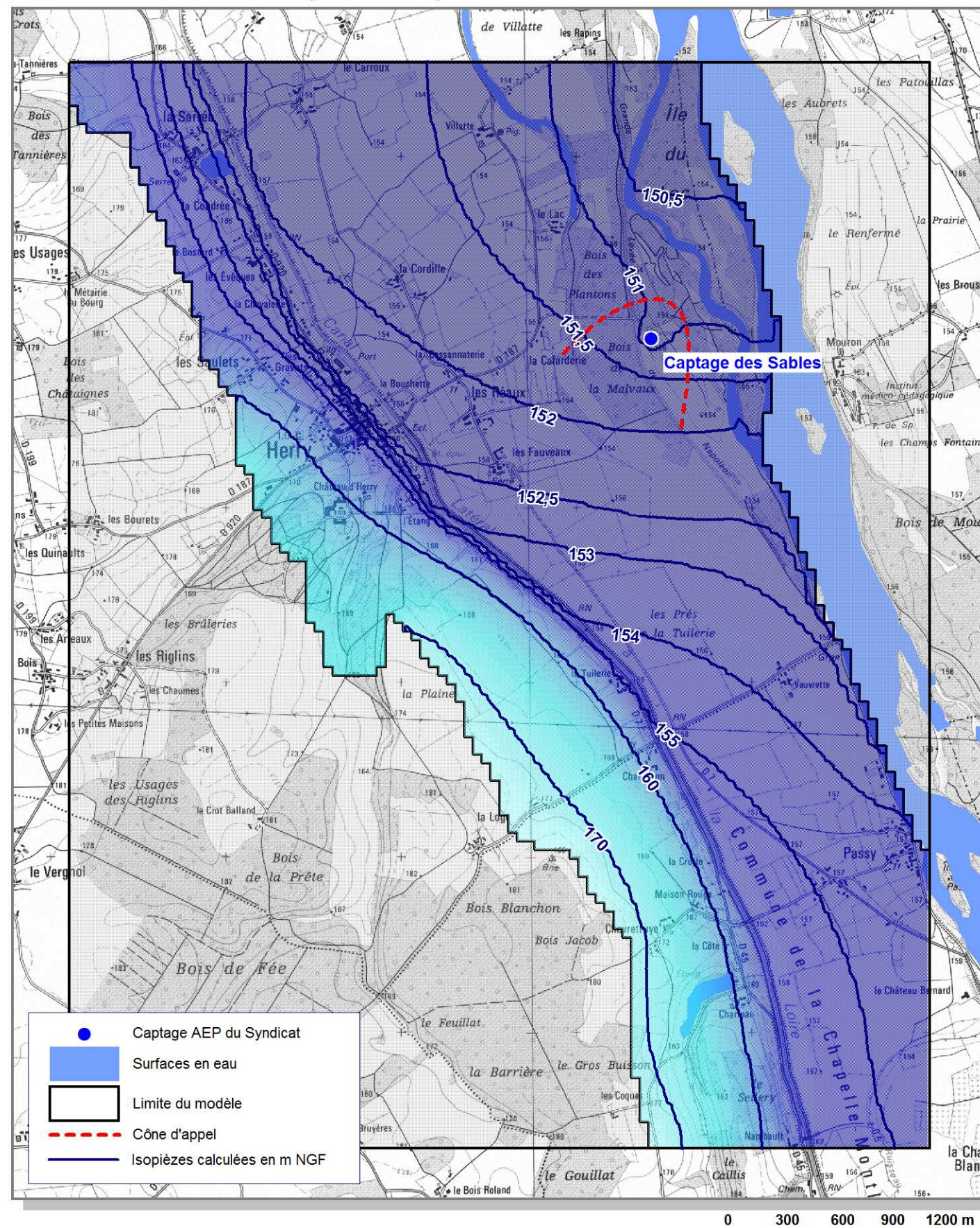
Les figures suivantes présentent l'extension du modèle maillé et les conditions aux limites.



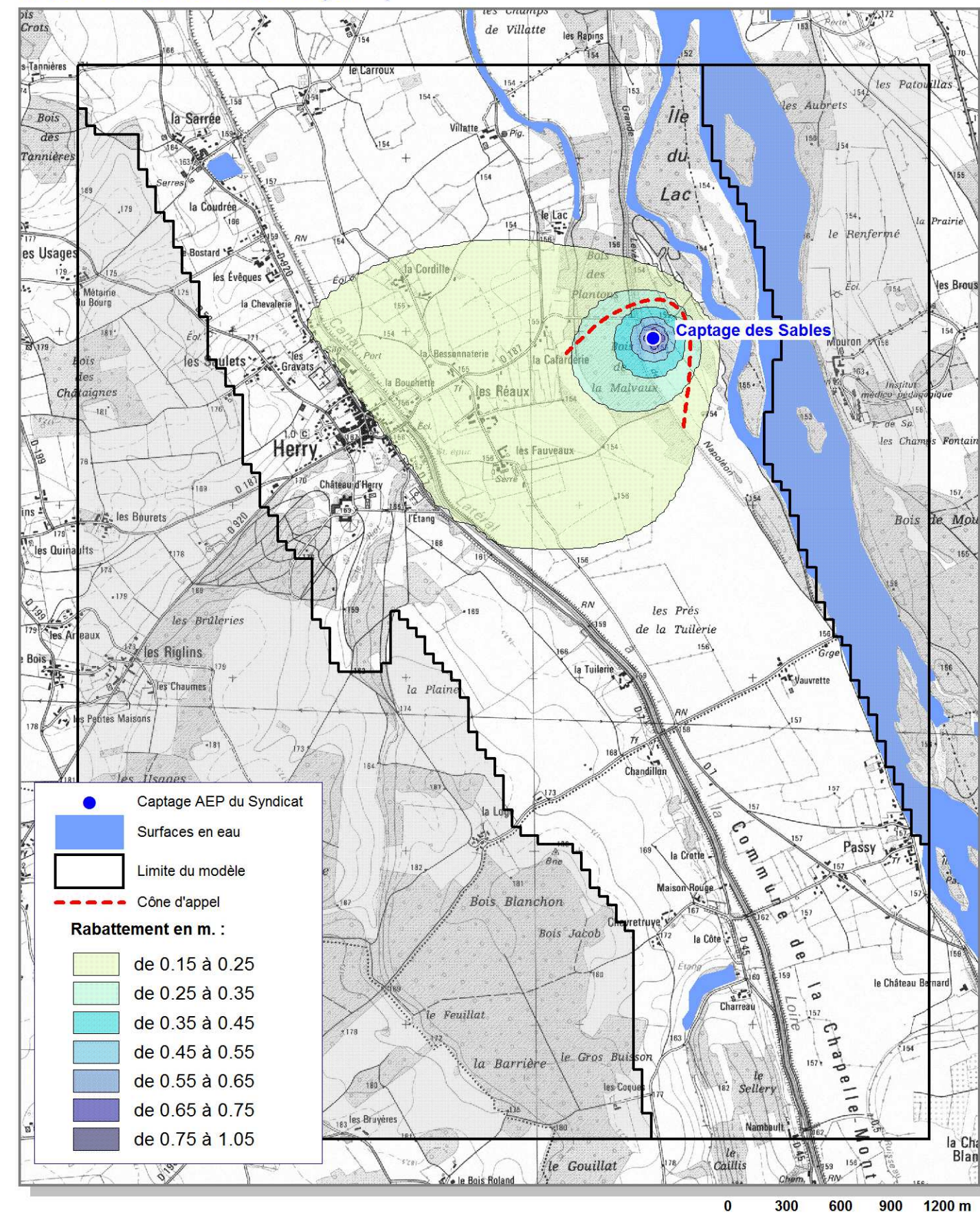
Modèle hydrogéologique
MAILLAGE ET CONDITIONS AUX LIMITES



PIEZOMETRIE CALCULEE (en m NGF)

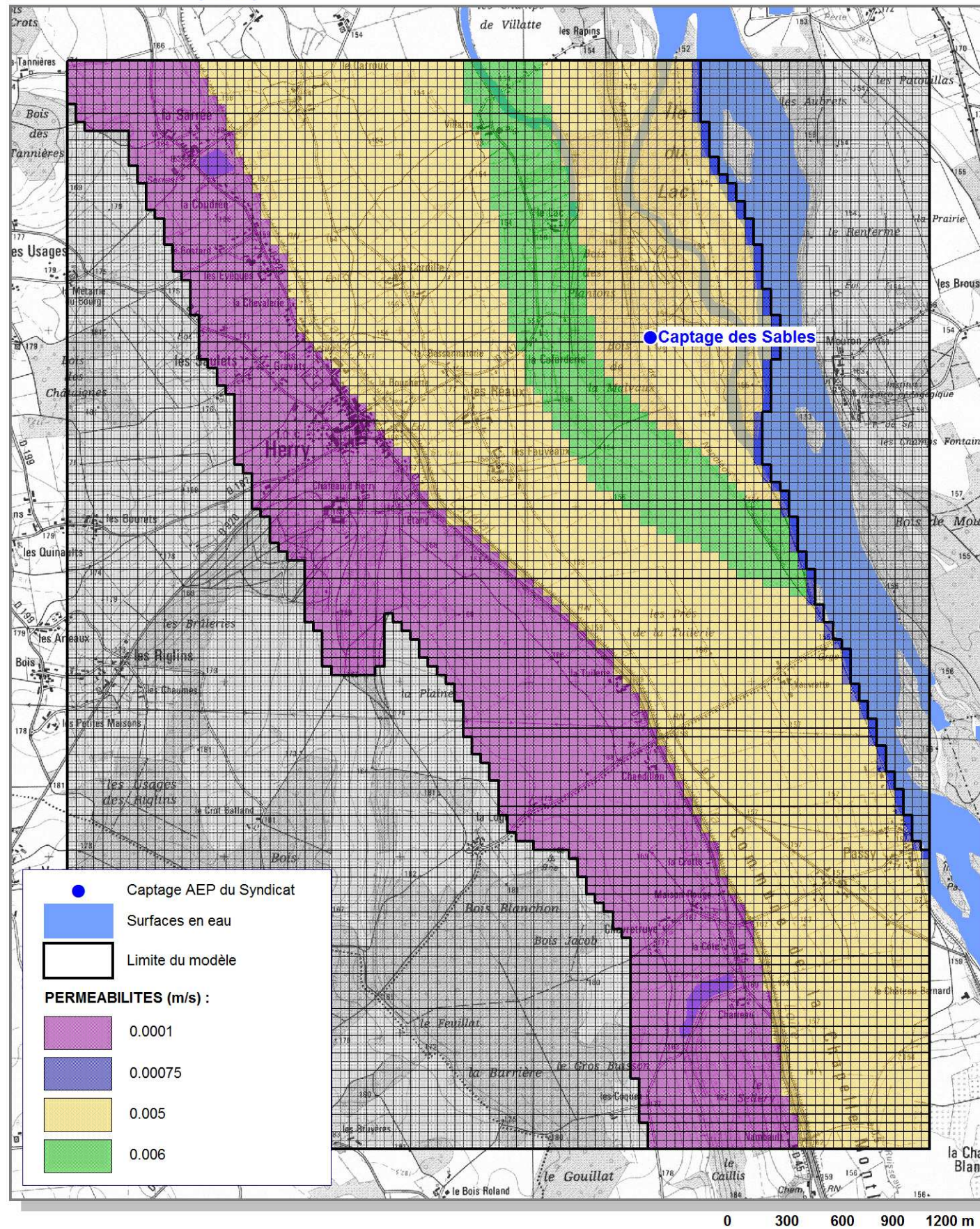


RABATTEMENTS INDUITS (en m)

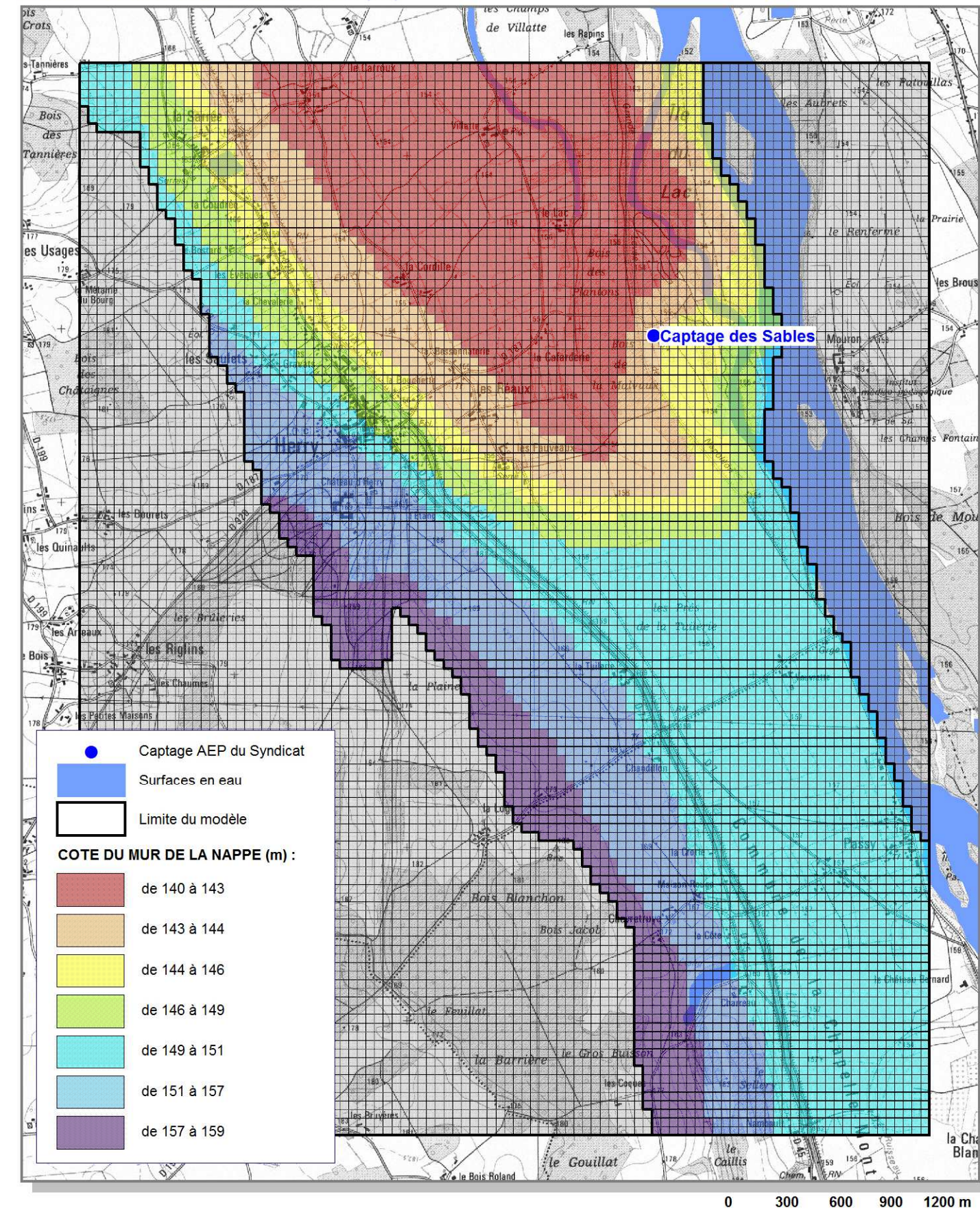


Modèle hydrogéologique
CALAGE DU MODELE

PERMEABILITES (m/s)



COTE DU MUR DE LA NAPPE (m)



4.2.3 Caractéristiques de l'aquifère

4.2.3.1 Géométrie de l'aquifère

Sur l'ensemble de la zone modélisée, les coupes géologiques des ouvrages recensés nous ont permis d'établir une cartographie du mur de l'aquifère. Le substratum des alluvions a une cote comprise entre 149 m en bord de Loire et 159 m sur les versants. L'épaisseur de l'aquifère alluvial augmente fortement au nord du modèle, du fait du surcreusement du substratum calcaire probablement dû à un ancien cheminement préférentiel du fleuve. La cote nord du substratum est donc de 140 m au minimum.

4.2.3.2 Perméabilité

La perméabilité caractérise le volume d'eau que l'on peut faire passer dans une section unitaire en un temps donné.

Les valeurs de perméabilité de l'aquifère sont déduites des pompages d'essai réalisés dans la zone d'étude et identifiées dans la bibliographie fournie par le Syndicat. Nous avons considéré un champ de perméabilités assez homogène sur l'ensemble de la zone d'étude, puisque les valeurs varient entre 1.10^{-4} m/s en amont du modèle (en bordure de versant) et 6.10^{-3} m/s dans la plaine alluviale. Cette dernière est associée à l'axe drainant identifié par GEO-INVESTIGATIONS dans les précédentes études. La perméabilité moyenne de l'aquifère alluvial est de 5.10^{-3} m/s. Les mailles représentant les bordures de Loire ont été colmatées avec une perméabilité de $7,5.10^{-4}$ m/s.

4.2.3.3 Piézométrie initiale et conditions de nappe

Le calage général du modèle a été réalisé sur la base de la piézométrie qui a été relevée en octobre 1995 par GEO-INVESTIGATIONS. Cette dernière avait au préalable été retravaillée en y intégrant nos observations de terrain de mars 2012. Il a donc été calé sur un régime d'étiage statique. Le niveau piézométrique fixe la limite supérieure de la masse d'eau circulant dans l'aquifère.

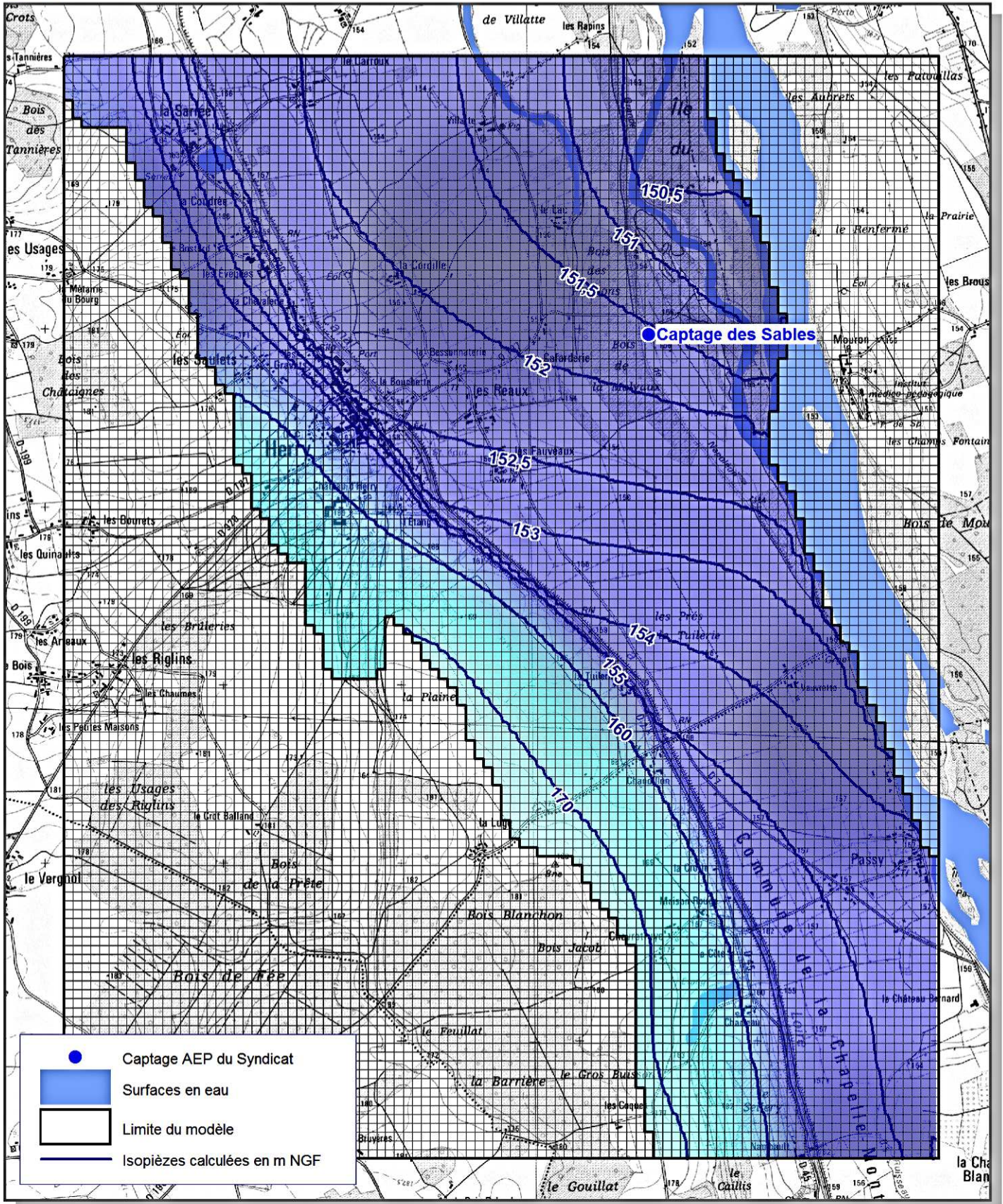
4.2.4 Calage du modèle

Le but du calage du modèle est d'ajuster les différents paramètres hydrodynamiques de l'aquifère pour reproduire au mieux la piézométrie de référence. Nous avons donc fait varier la perméabilité ainsi que le degré de colmatage de la Loire. Le fleuve contrôle en grande partie l'écoulement dans la nappe et c'est l'interaction entre les deux milieux qui détermine la piézométrie.

Pour vérifier le calage, nous avons implanté des points d'observation (puits, piézomètres) dont les cotes avaient été mesurées lors de la campagne piézométrique de référence. La comparaison entre les valeurs piézométriques calculées et mesurées indique la précision du modèle. Une fois que ces valeurs sont identiques ou très proches en tout point de contrôle, le modèle est calé.

Pour le modèle d'Herry, les plus grandes différences sont observées sur les points en amont du modèle ou le long des versants. Dans le périmètre rapproché du captage des Sables, l'écart est de quelques centimètres.

Modèle hydrogéologique
PIEZOMETRIE STATIQUE CALCULEE



4.2.5 Simulations en régime dynamique permanent

4.2.5.1 Exploitation actuelle

Pour vérifier le calage du modèle, nous avons testé le régime actuel de pompage sur le champ captant. Nous avons pris pour référence un débit de $14 \text{ m}^3/\text{h}$ correspondant au débit habituellement pompé sur l'ouvrage du Syndicat. Nous avons simulé ce pompage en régime permanent, c'est-à-dire en pompant 24h/24h.

Cette simulation montre que les rabattements engendrés par le pompage sont faibles (moins de 8 cm au sein du puits) et limités au périmètre immédiat du captage. La limite d'influence du pompage se limite en effet à une cinquantaine de mètres tout au plus autour du puits.

Sur la figure 8, il est possible de se rendre compte de la faible influence d'un tel pompage sur la piézométrie.

4.2.5.2 Exploitation à $100 \text{ m}^3/\text{h}$

Nous avons simulé une exploitation continue à $100 \text{ m}^3/\text{h}$ pour se mettre dans les conditions de pompage au moyen de la pompe du puits des Sables servant à by-passer le réservoir des Bonnins. La figure 9 présente les rabattements provoqués à ce régime de pompage.

Les rabattements calculés par le modèle sont au maximum de 56 cm environ sur le puits des Sables.

Le cône d'appel déduit de cette modélisation s'étend vers les versants au sud-ouest. Son extension maximale au droit du puits est de l'ordre de 300 mètres de diamètre (confirmé par les calculs de Wyssling).

4.2.5.3 Exploitation maximale à $180 \text{ m}^3/\text{h}$

Cette dernière simulation a consisté à tester le débit maximal de pompage autorisé par l'arrêté préfectoral de DUP soit $180 \text{ m}^3/\text{h}$ (moyenne $3000 \text{ m}^3/\text{j}$). La figure 10 présente les rabattements provoqués par ce pompage. Il est de plus de 1 m au sein du puits. C'est d'ailleurs la valeur qui avait été mesurée par SAFEGE lors du pompage d'essai mené à ce débit sur l'ouvrage en 2004. L'influence du pompage se fait ressentir au nord jusqu'au lieu-dit « la Cordille ». Au sud et à l'ouest, le cône d'appel s'ouvre vers les versants. D'après le modèle, le cône ne s'étend pas à l'aval jusqu'à la Loire ; mais nous préférons considérer cette éventualité.

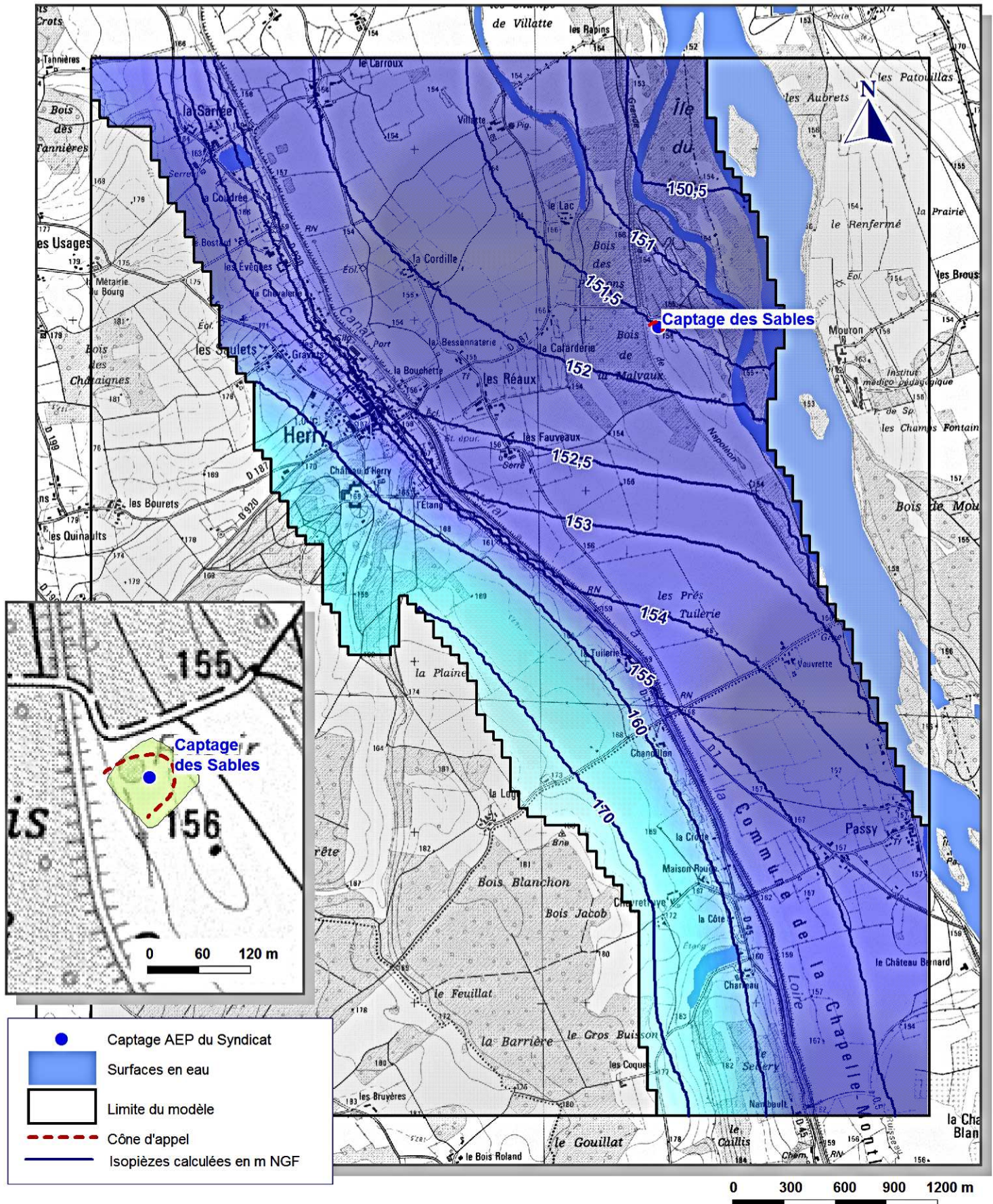
Si à ce débit de pompage, la Loire n'alimente pas le puits, il va donc sans dire que c'est la même chose aux débits inférieurs.

4.2.5.4 Conclusions

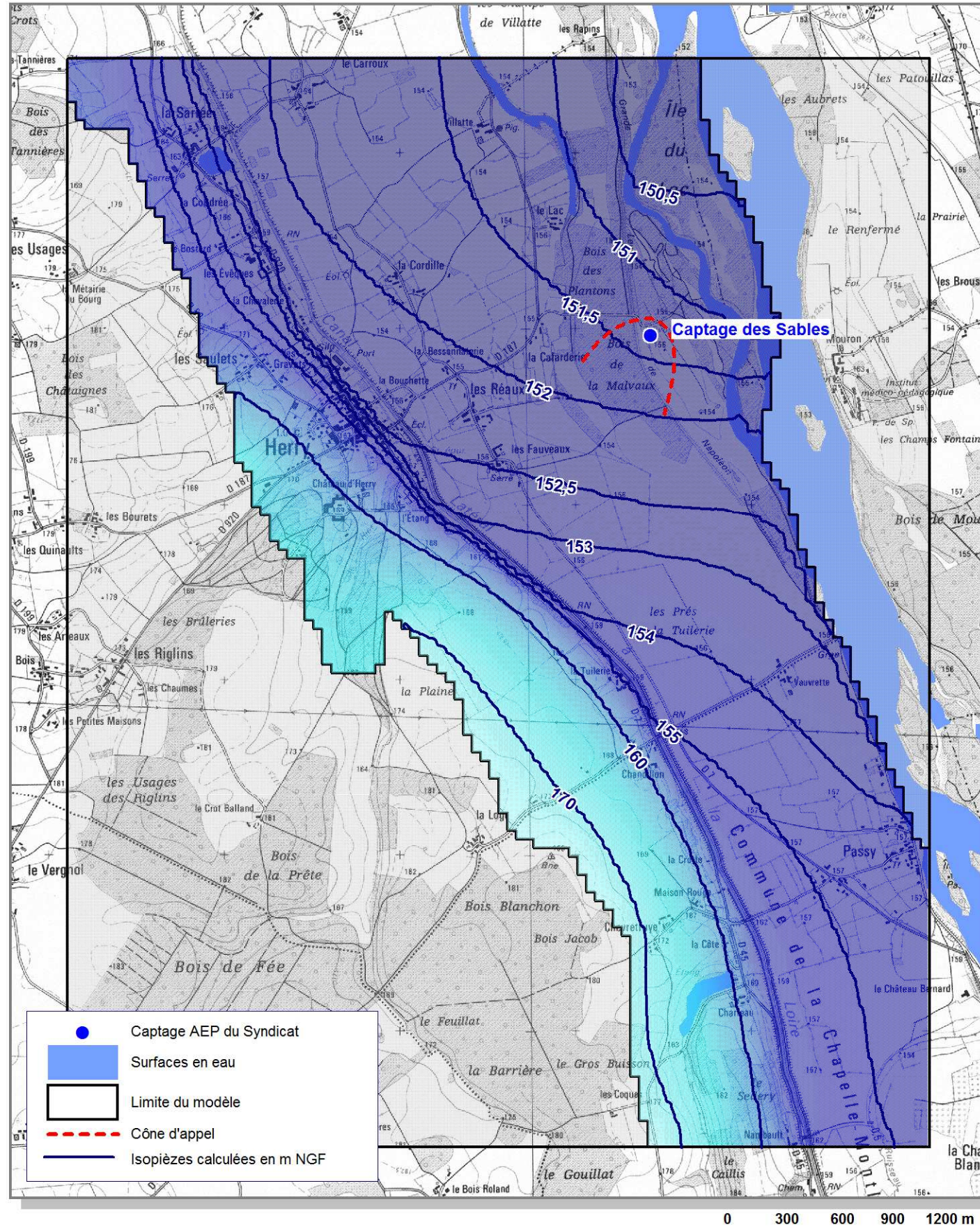
Ces simulations montrent que le captage des Sables est alimenté en grande partie par l'eau du versant et que la participation de la Loire est moins importante, comme le laissait présager la phase 1 de l'étude. Cela s'explique par la distance, mais aussi le colmatage des berges qui réduisent considérablement les échanges nappe-rivière. La proportion de cette alimentation par la rivière sera néanmoins d'autant plus grande que le débit de pompage sera important.



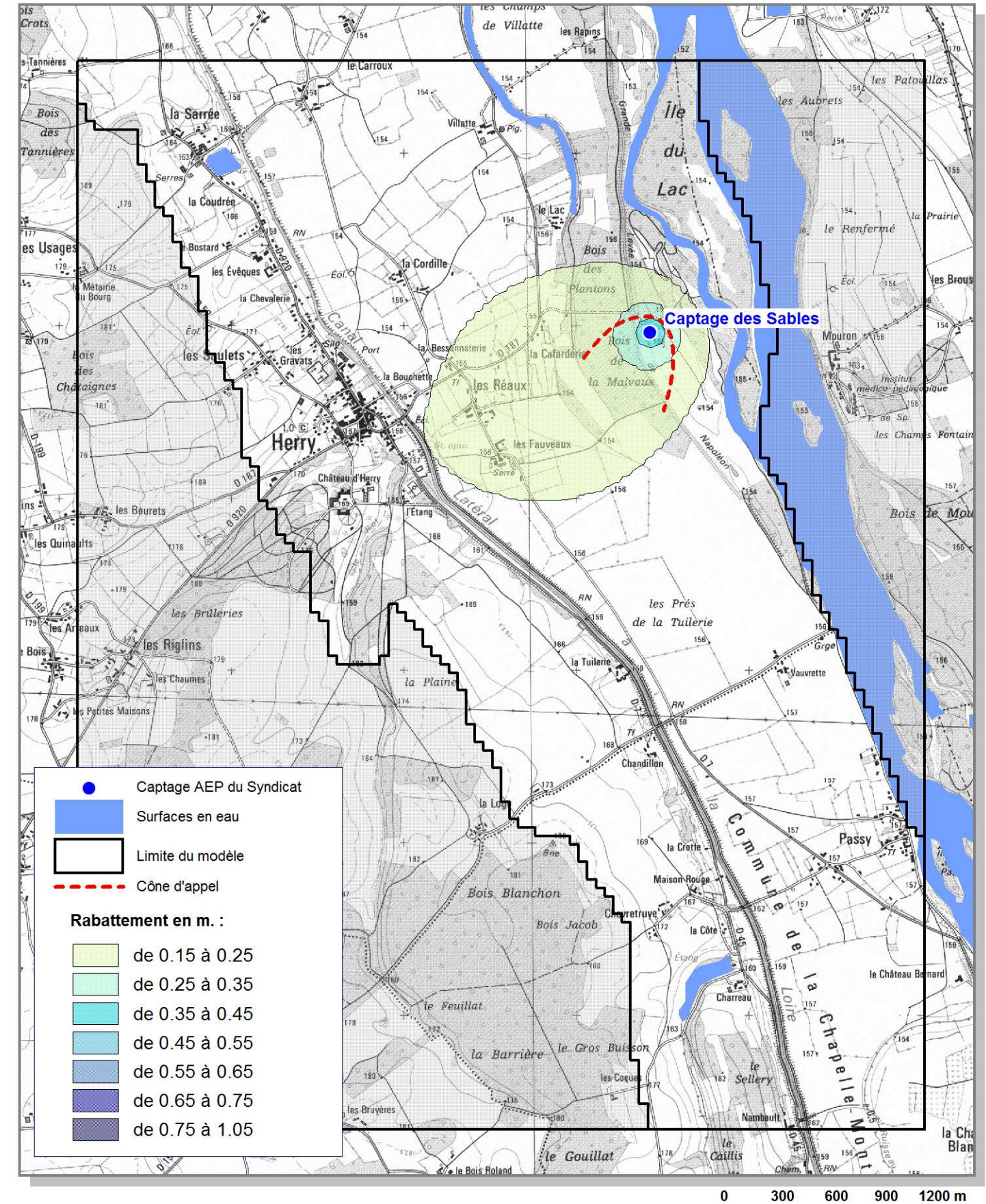
PIEZOMETRIE CALCULEE (en m NGF)



PIEZOMETRIE CALCULEE (en m NGF)



RABATTEMENTS INDUITS (en m)



4.2.6 Délimitation de la PNAC et du BAC

A partir de la piézométrie et de la modélisation mathématique, nous avons pu déterminer l'extension de la portion de nappe alimentant le captage et le bassin d'alimentation de captage.

Pour délimiter ces zones, nous nous sommes basés sur une exploitation au débit maximum autorisé à savoir 180 m³/h. L'extension du BAC est représentée sur la figure 11. Dans la plaine, la forme conique de cette délimitation correspond au cône d'appel élargi aux zones de rabattement significatif.

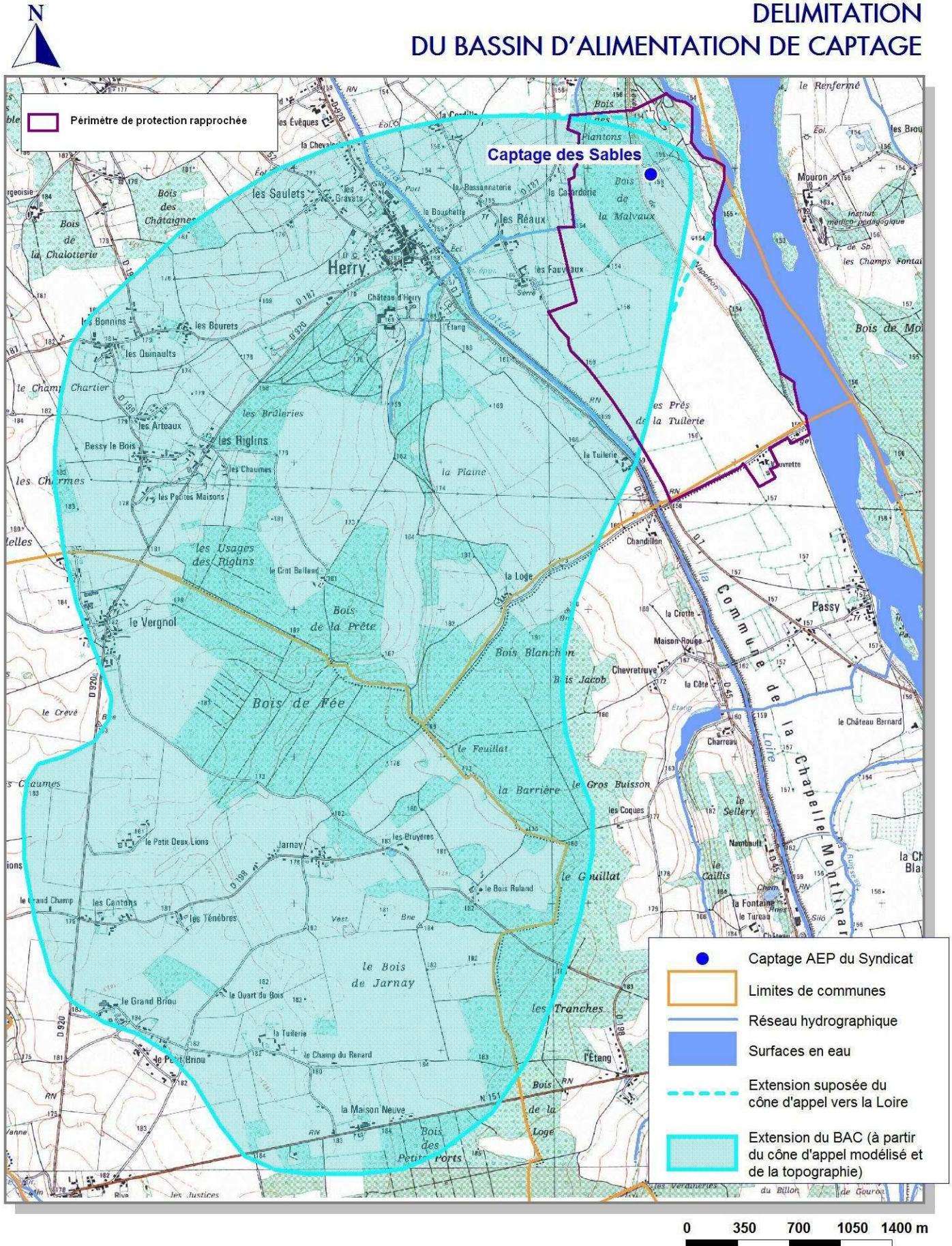
La PNAC englobe au sud et à l'ouest les hameaux de « la Cordille », des « Réaux », des « Fauveaux » ou encore de « la Cafarderie », jusqu'au pied du bourg d'Herry. La PNAC englobe également le Riot sur son tracé dans la plaine. Nous rappelons néanmoins que ce dernier est perché et qu'il n'a de ce fait pas d'interactions avec la nappe. La surface de la PNAC est de près de 3,5 km².

Le Bassin d'Alimentation du Captage des Sables est donc identique dans sa partie aval à la PNAC. Du fait de l'infiltration des eaux sur les coteaux calcaires, l'extension en amont de la PNAC est donc calquée sur le bassin versant du Riot.

En conclusion, l'extension du BAC du captage des Sables est de 24 km².



DELIMITATION DU BASSIN D'ALIMENTATION DE CAPTAGE



5

Phase 3 : Cartographie de la vulnérabilité

5.1 Méthodologie utilisée

La vulnérabilité d'une zone de captage d'eau potable vis-à-vis des pollutions diffuses dépend de plusieurs facteurs liés, d'une part aux caractéristiques du milieu naturel *sensu stricto*, et d'autre part, aux flux engendrés par les activités humaines et agricoles.

Dans le cadre de cette étude, l'objectif est de cartographier la vulnérabilité des eaux souterraines sur l'aire d'alimentation. Dans une seconde étape, un diagnostic des pressions humaines et agricoles (étude des flux) est lancé sur les zones les plus vulnérables.

La cartographie de la vulnérabilité des eaux sur l'aire d'alimentation est le résultat d'une analyse multicritère. Elle se base sur les caractéristiques d'éléments physiques tels que :

- ✓ pluie efficace : P
- ✓ nature des sols : S
- ✓ infiltration efficace : I
- ✓ épaisseur de zone non saturée : H
- ✓ perméabilité dans l'aquifère : K

Selon les indications du guide méthodologique n°RP- 55874-FR BRGM de 2007, les classes ou notes s'échelonnent de 0 (très favorable) à 4 (très défavorable) pour qualifier chaque critère pris en compte.

La vulnérabilité intrinsèque est définie comme étant le terme utilisé pour représenter les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques naturelles qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la contamination par les pollutions diffuses.

C'est une propriété générale, non mesurable et sans dimension.

La finalité de la méthode le calcul de l'indice de vulnérabilité globale V_g , qui se fait selon la formule suivante (*adaptée de la méthode DRASTIC appliquées aux aquifères continus*) :

$$\text{Vulnérabilité globale } V_g = (0,1 \times P) + (0,25 \times S) + (0,3 \times I) + (0,2 \times H) + (0,15 \times K)$$



Les pondérations retenues pour le bassin d'alimentation étudié sont ici présentées :

Tableau 5-a : Pondérations des critères

Critères	Abréviations	Pondérations retenues
Pluie efficace	P	10 %
Nature des sols	S	25 %
Infiltration efficace	I	30 %
Epaisseur Zone Non Saturée	H	20 %
Perméabilité de l'aquifère	K	15 %

A partir du calcul réalisé avec les pondérations ci-dessus, une reclassification des valeurs de V_g est réalisée afin d'obtenir 5 classes de vulnérabilité. Les classes obtenues sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 5-b : Classes de vulnérabilité intrinsèques

Vulnérabilité intrinsèque V_g	
Vg 0 : Très faible	0 – 0,79
Vg 1 : Faible	0,80 – 1,59
Vg 2 : Moyenne	1,60 – 2,39
Vg 3 : Elevée	2,40 – 3,19
Vg 4 : Très élevée	3,20 - 4

5.2 Appréciation des critères sur le bassin d'alimentation

5.2.1 Pluie efficace « P »

La pluie efficace est calculée à partir de la pluviométrie, de l'évapotranspiration (ETP) et de la réserve utile (RU) des sols. Sa discrétisation à l'échelle du bassin d'alimentation de captage étudié demeure complexe (surfaces de plusieurs km^2), essentiellement par manque de connaissances sur les données locales.

Selon le bilan hydro-climatique réalisé, nous pourrions considérer la pluie efficace comme constante sur l'ensemble du bassin d'alimentation, avec une valeur de 5,5 l/s/km² répartie entre ruissellement et infiltration.



5.2.2 Nature des sols « S »

La nature des sols reste un critère prépondérant dans la caractérisation de la vulnérabilité des aquifères vis-à-vis des pollutions diffuses (ou intrants).

L'appréciation de la capacité des sols à retenir (voir dégrader) les pollutions diffuses dépend de plusieurs caractéristiques : épaisseur, texture, teneur en argiles ou limons, teneur en matières organiques.

5.2.2.1 Reconnaissances de terrain

Une campagne de 19 sondages à la tarière et de 5 tests d'infiltration a été conduite par CPGF-HORIZON en août 2012 sur la zone d'étude (plaine alluviale de la Loire, coteaux et plateaux calcaires occidentaux). Les résultats des investigations sont reportés en annexe.

Dans le cadre de cette étude, les sols rencontrés sont variés et dépendent des formations géologiques sous-jacentes. Ils sont classés en plusieurs catégories :

✓ les sols alluvionnaires :

Dans la plaine et les terrasses alluviales de la Loire, les sols sont développés sur des alluvions quaternaires récentes ou anciennes. La texture et la granulométrie des sols restent localement variées, avec des sols argileux lourds, des sols limono-sablo-argileux et des sols plus sableux légers.

En règle générale, les sols apparaissent plus sableux vers le lit mineur de la Loire, où les alluvions sont plus récentes et les crues plus fréquentes. A l'extrémité occidentale de la plaine, les sols sont argileux, lourds, hydro-morphes et plus épais. Ces sols sont peu calcaires et leur épaisseur n'excède pas 1,1 m sur la plaine alluviale.



Sols limono-sableux légers (Fauveaux), sols limoneux (bois de Malvaux)

✓ les sols développés sur les formations calcaires jurassiques :

Sur les coteaux et plateaux calcaires bordant à l'ouest la plaine de la Loire, les sols sont dérivés des formations carbonatées du Jurassique (j6a-b : Oxfordien supérieur : calcaires lités inférieurs et calcaires crayeux de Bourges).

Les calcaires apparaissent essentiellement dans les pentes les plus raides des coteaux et les thalwegs du plateau. Ailleurs, ils sont recouverts par des dépôts épais d'argiles et de sables du Tertiaire (FL(5) : *argiles et sables du Bourbonnais*).

Les sols développés sur les calcaires jurassiques sont des *calcosols* à argiles et cailloutis, dont l'épaisseur varie de 0,4 m à 0,8 m sur la roche mère. Ces sols se décolorent en profondeur allant du brun, à l'ocre-jaune. Au contact de la roche mère calcaire, la fraction de cailloutis devient très majoritaire (roche décomposée).

Ces sols plus ou moins bien drainés selon la fraction d'argile. Globalement, le drainage est facilité par les nombreux cailloutis présents dans ces sols, ainsi que la roche mère très fissurée.

✓ les sols développés sur les formations détritiques du Bourbonnais :

Les formations détritiques fluviales et fluvio-lacustres du Tertiaire (FL(5) : *argiles et sables du Bourbonnais*) recouvrent les terrains calcaires sur les plateaux à l'ouest de la vallée de la Loire. L'épaisseur de ces dépôts détritiques peut atteindre localement plus de 10 mètres.

Les sols développés sur ces formations apparaissent relativement homogènes, avec une texture argilo-limoneuse dominante. La fraction sableuse ou caillouteuse reste assez faible. Ces sols se drainent lentement. Ces sols sont exploités pour les grandes cultures (blé).



Sols argilo-limoneux exploités en grandes cultures, sols argileux en domaine boisé

5.2.2.2 Données fournies par la Chambre d'Agriculture du Cher

La Chambre d'Agriculture du Cher, dans le cadre de cette étude, a communiqué l'ensemble de ses données agro-pédologiques sur les bassins d'alimentation des captages étudiés.

Les données SIG sur la pédologie locale comprennent les critères de « texture de surface », « charge caillouteuse » et « profondeur d'apparition du substrat ». Ces données ont été acquises lors de campagnes de terrain et de sondages à la tarière (jusqu'à 1,2 m de profondeur ou refus, avec densité de 1 sondage/25 ha).

Les données cartographiques et classification des sols (selon Jamage, 1966-1967) ont été éditées à l'échelle du 1/50000^{ème}.

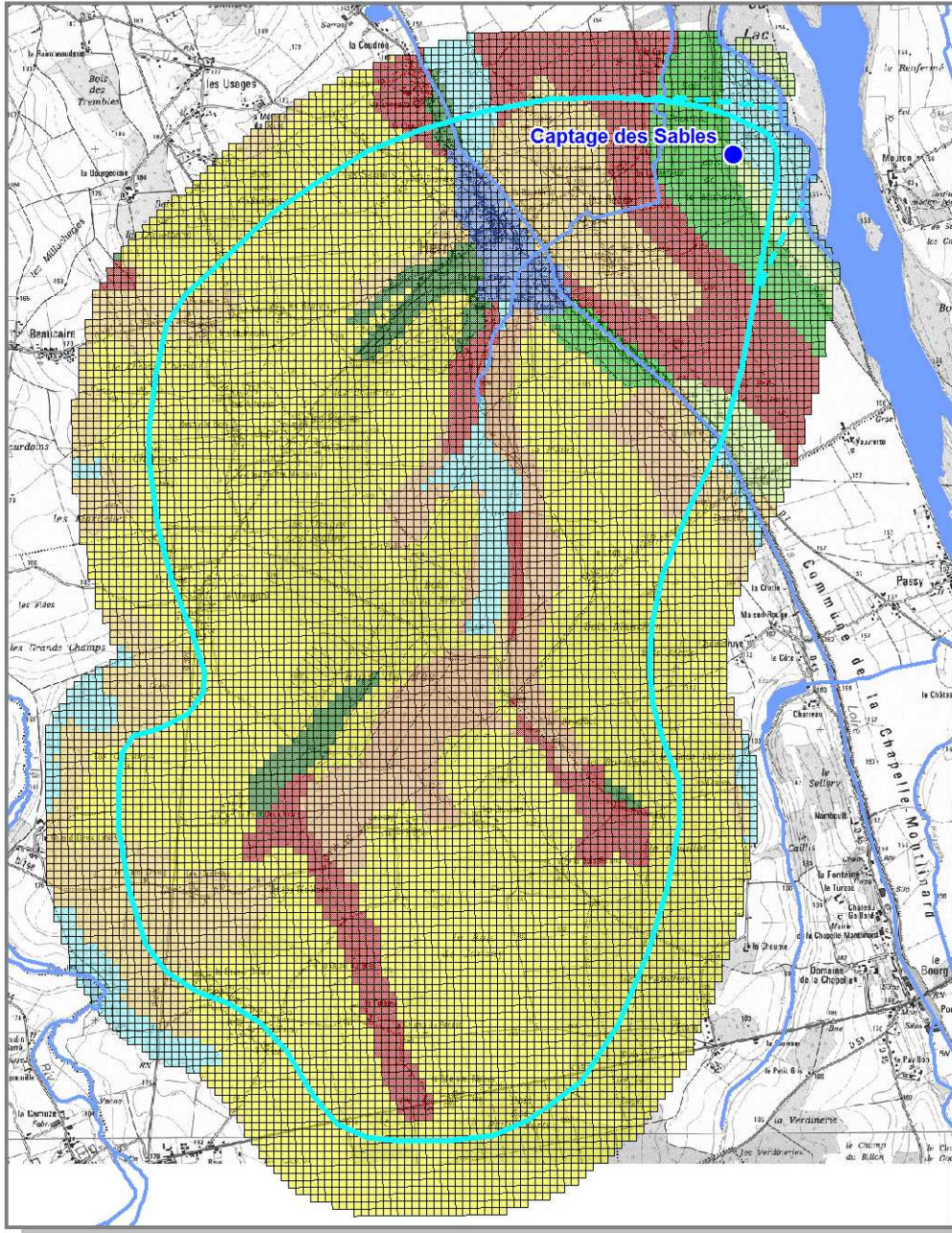
D'autre part, la Chambre d'Agriculture du Cher a réalisé deux études agro-pédologiques au droit des périmètres de protection du puits P2 de Saint-Léger le Petit (décembre 2000 et juillet 2004). Les informations et cartes disponibles sont prises en compte dans l'analyse multicritère.

Les cartes pédologiques fournies par la Chambre d'Agriculture du Cher sont reportées sur la figure page suivante :



DONNÉES PÉDOLOGIQUES DE
LA CHAMBRE D'AGRICULTURE DU CHER

TEXTURE DE SURFACE



- Captage du syndicat
- - - Extension supposée du cône d'appel vers la Loire
- Extension supposée du cône d'appel vers la Loire
- Réseau hydrographique
- Surfaces en eau

TEXTURE DE SURFACE :

- 101 : Limon léger (LL), moyen (LM), et moyen sableux (LMS)
- 102 : Limon léger sableux (LLS) et sableux (LS)
- 103 : Limon argileux (LA) et argilo-sableux (LAS)
- 104 : Limon sablo-argileux (LSA)
- 105 : Sable (S)
- 106 : Sable limoneux (SL)
- 107 : Sable argileux (SA)
- 109 : Argile (A), argile limoneuse (AL)
- 110 : Argile lourde (ALO)
- 111 : Autres

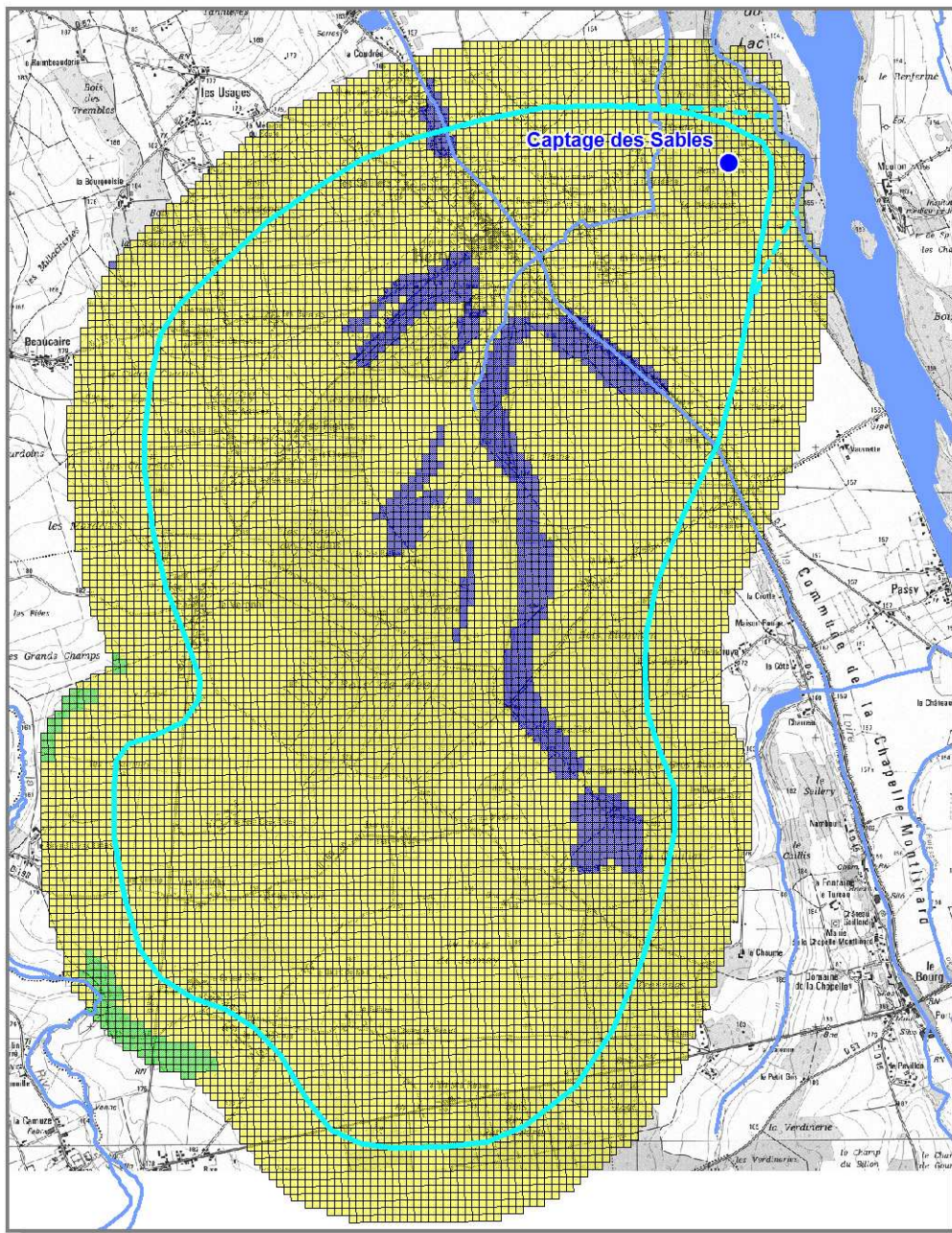
CHARGE CAILLOUTEUSE :

- 300 : pas de charge caillouteuse
- 301 : Fragments calcaires
- 307 : Pierres siliceuses : galets des terrasses

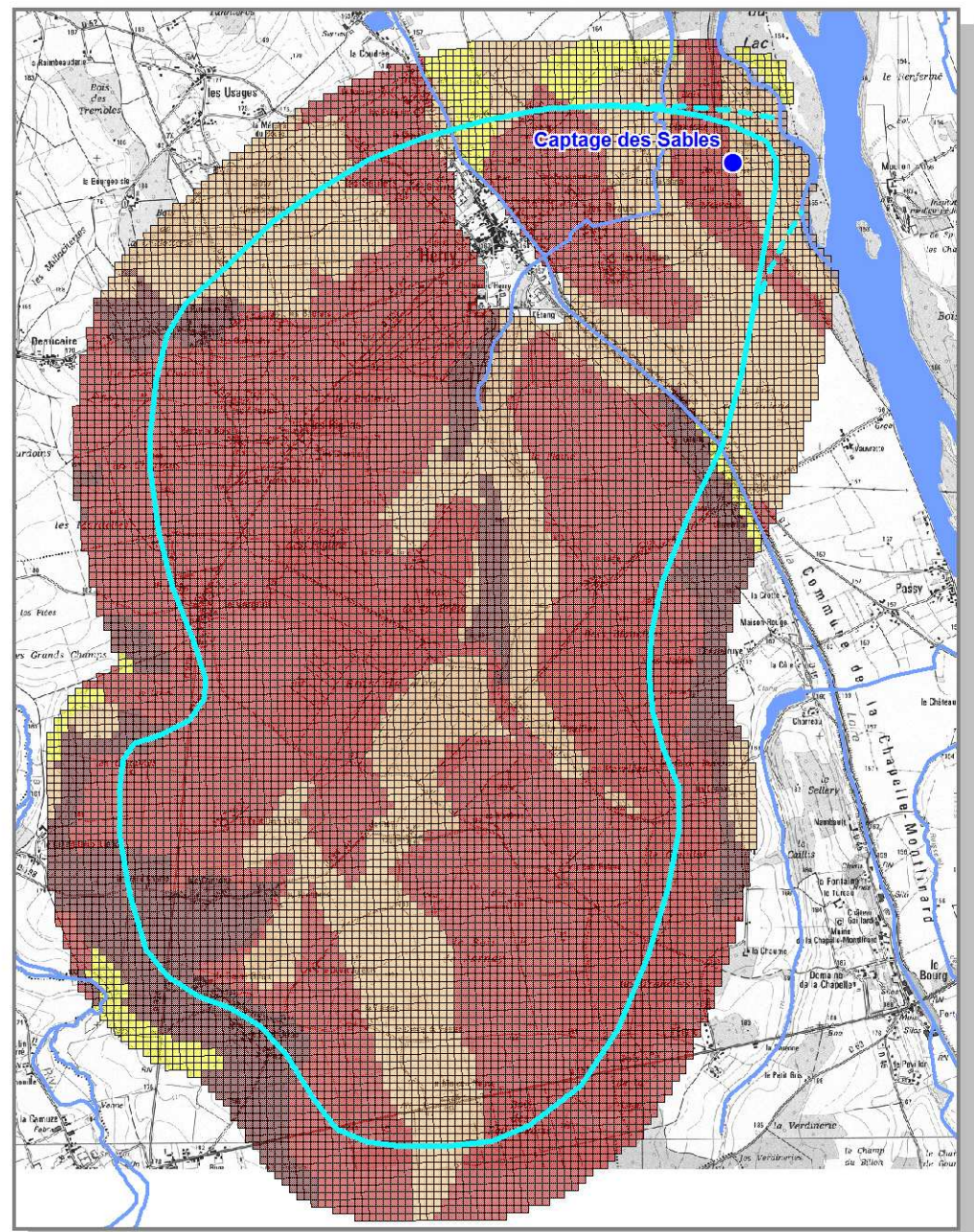
PROFONDEUR D'APPARITION DU SUBSTRAT :

- 1 : Substrat à moins de 40 cm de profondeur
- 2 : Substrat entre 40 et 80 cm
- 3 : Substrat entre 80 et 120 cm
- 4 : Substrat au delà de 1,20 m

CHARGE CAILLOUTEUSE



PROFONDEUR D'APPARITION DU SUBSTRAT :



0 500 1000 1500 2000 m

5.2.3 Infiltration efficace « I »

L'infiltration efficace est directement dépendante de la perméabilité et de la pente des sols. Dans le cadre des bassins étudiés, nous ne notons pas de pertes en domaine calcaire.

Dans le cadre de l'analyse de ce critère, nous utilisons les données du BRGM sur l'Indice de Développement et de Persistance de Réseaux (IDPR) calculé à l'échelle nationale au 1/50000^{ème}. L'IDPR a été créé par le BRGM pour réaliser des cartes nationales ou régionales de vulnérabilité intrinsèque des nappes aux pollutions diffuses. Il résulte du rapport entre la distance au plus proche cours d'eau réel et la distance au plus proche talweg étudié. Il varie entre 0 et 2000, les deux distances sont pondérées à la pente.

Ces données IDPR traduisent l'aptitude des formations du sous-sol à laisser ruisseler ou s'infiltrer les eaux de surface. Elles se fondent sur l'analyse du modèle numérique de terrain (MNT) et des réseaux hydrographiques naturels, conditionnés par la géologie. La densité de drainage est un indicateur révélateur des propriétés des formations géologiques.

L'IDPR devient ainsi le moyen de quantifier ce rôle en comparant un réseau théorique établi selon l'hypothèse d'un milieu parfaitement homogène (*indice de développement ID*), au réseau naturel mis en place sous le contrôle d'un contexte géologique hétérogène (*de persistance des réseaux PR*).

Le BRGM a établi une correspondance entre les valeurs d'IDPR et les phénomènes de ruissellement-infiltration sur les bassins versants.

IDPR < 1000	<i>Infiltration majoritaire par rapport au ruissellement superficiel. L'eau ruisselant sur les terrains naturels rejoint un axe de drainage défini par l'analyse des talwegs sans que celui-ci ne se concrétise par l'apparition d'un axe hydrologique naturel,</i>
IDPR proche 1000	<i>Infiltration et ruissellement superficiel de même importance. Il y a conformité entre la disponibilité des axes de drainage liés au talweg et les écoulements en place,</i>
IDPR > 1000	<i>Ruissellement superficiel majoritaire par rapport à l'infiltration vers le milieu souterrain. L'eau ruisselant sur les terrains naturels rejoint très rapidement un axe hydrologique naturel sans que la présence de celui-ci soit directement justifiée par un talweg,</i>
IDPR proche 2000	<i>Stagnation transitoire ou permanente des eaux, menant à deux interprétations différentes. Si la nappe est proche de la surface des terrains naturels, (cours d'eau et zones humides), le terrain est saturé et l'eau ne s'infiltré pas. Si la nappe est profonde, le caractère ruisselant peut démontrer une imperméabilité des terrains naturels.</i>

Toutefois, dans le cadre de cette étude, les valeurs d'IDPR renseignées sont très importantes en domaine alluvial, ce qui abaisse considérablement la vulnérabilité des sols, avec des terrains à fort pouvoir « ruisselant ». Sur les plateaux occidentaux, l'éloignement de réseaux hydrographiques permanents et les faibles pentes rendent les valeurs d'IDPR très faibles, donc des terrains à forts pouvoir « infiltrant ». Ce critère jouera un rôle important dans la détermination de la vulnérabilité intrinsèque, mais doit toujours être considéré avec précaution.





Valeurs IDPR du pôle « infiltrant » au pôle « ruisselant » (BRGM)

5.2.4 Epaisseur de la zone non saturée « H »

L'épaisseur de la zone non saturée est prise en compte dans la dynamique de transfert de polluants jusqu'aux nappes d'eaux souterraines.

Sur l'étendue du bassin d'alimentation du captage, les épaisseurs apparaissent variables selon la configuration géologique.

Plaine alluviale de la Loire :

Dans la plaine alluviale, l'épaisseur de la zone non saturée est de 3 à 5 m avant d'atteindre la nappe d'accompagnement de la Loire. La zone non saturée est constituée de limons, de sables et de graves. Il s'agit d'une zone très vulnérable vis-à-vis des pollutions diffuses.

Coteaux et plateaux calcaires :

En domaine calcaire, les eaux souterraines sont rencontrées vers 8-10 m de profondeur sur les coteaux au dessus de Herry. La zone non saturée est ici constituée de calcaires Oxfordien fissurés. La nappe des calcaires siège en profondeur et s'écoule en direction de la plaine de la Loire.

Sur les plateaux, des petites nappes perchées ont été identifiées dans l'épaisse formation des argiles et sables du Bourbonnais. Les niveaux piézométriques des puits fermiers sont discontinus et ponctuels. Des eaux souterraines circulent en faible quantité dans ces matériaux peu transmissifs.

Nous considérerons que ces terrains ne contiennent pas de nappe productive et appliquerons sur ces surfaces les valeurs de la zone non saturée des calcaires sous-jacents.

5.2.5 Perméabilité des aquifères « K »

La perméabilité de l'aquifère détermine dans cet analyse multicritères les vitesses de transfert des polluants ayant atteint les nappes d'eaux souterraines.

En domaine alluvial, nous appliquerons les champs de perméabilités utilisés pour l'élaboration et le calage du modèle mathématique de nappe. Elles varient de 1.10^{-4} m/s dans les alluvions anciennes pour atteindre 6.10^{-3} m/s dans les alluvions propres récentes.

En domaine calcaire, nous ne disposons pas de données sur les champs de perméabilité des calcaires Oxfordiens. Ces matériaux fissurés présentent certainement des perméabilités variables, et ponctuellement élevées. Nous appliquerons une valeur moyenne de 5.10^{-4} m/s.

5.2.6 Notation des critères

Les critères permettant de définir le niveau de vulnérabilité des parcelles à l'échelle du bassin d'alimentation du captage ont été classés avec une notation. Pour cette étude, les critères sont appréciés et notés sur les deux entités géologiques principales du BAC : les formations calcaires des coteaux et plateaux occidentaux, les formations alluvionnaires du Val de Loire.

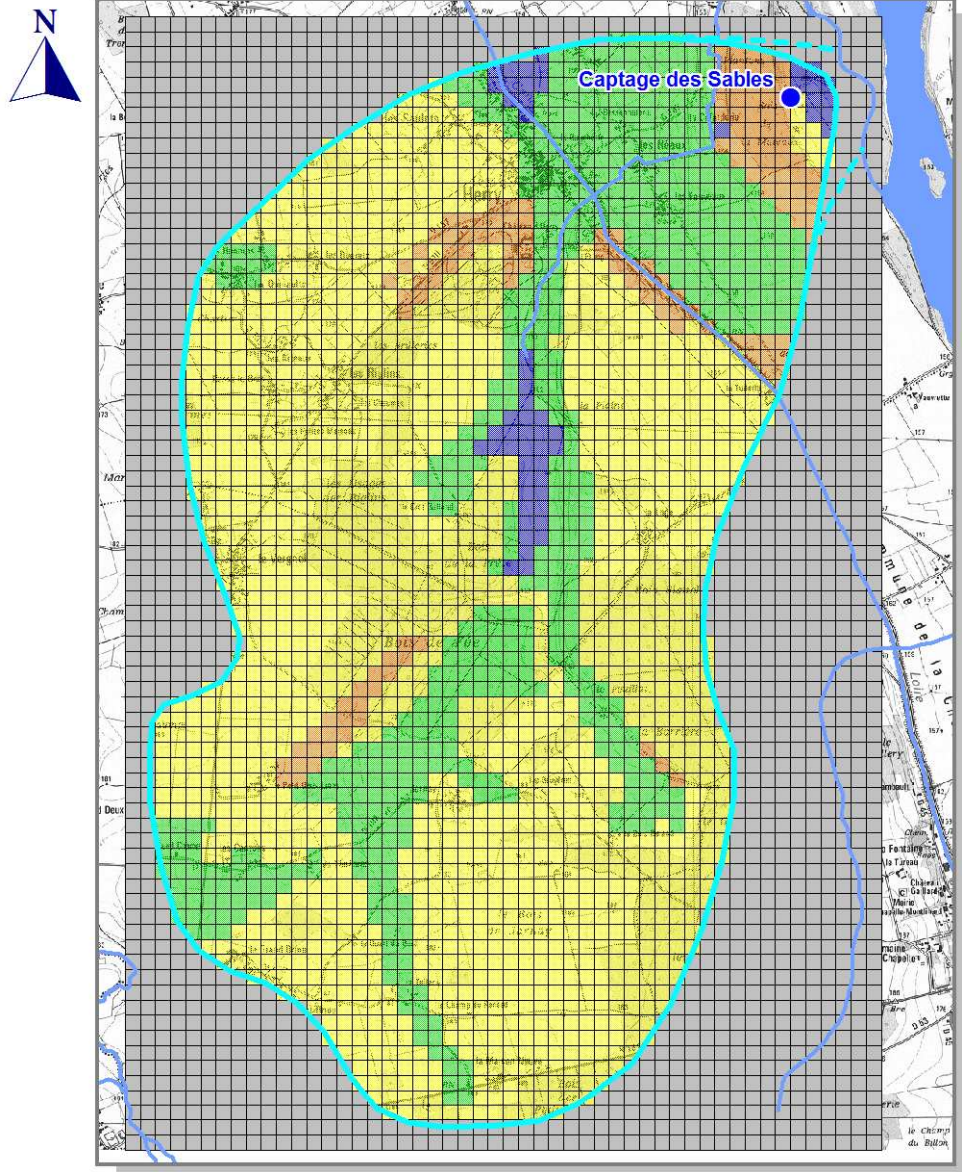
Les critères sont notés selon les recommandations édictées dans le guide méthodologique n°RP-55874-FR BRGM de 2007 (« milieux continus »). Cette appréciation de la vulnérabilité du captage occulte d'autres phénomènes jugés plus minoritaires dans la dynamique de transfert des pollutions diffuses : teneur en matières organiques, pratiques culturales, couverture hivernale des sols,...

Tableau 5-c : Notation des critères dans l'évaluation de la vulnérabilité sur le BAC

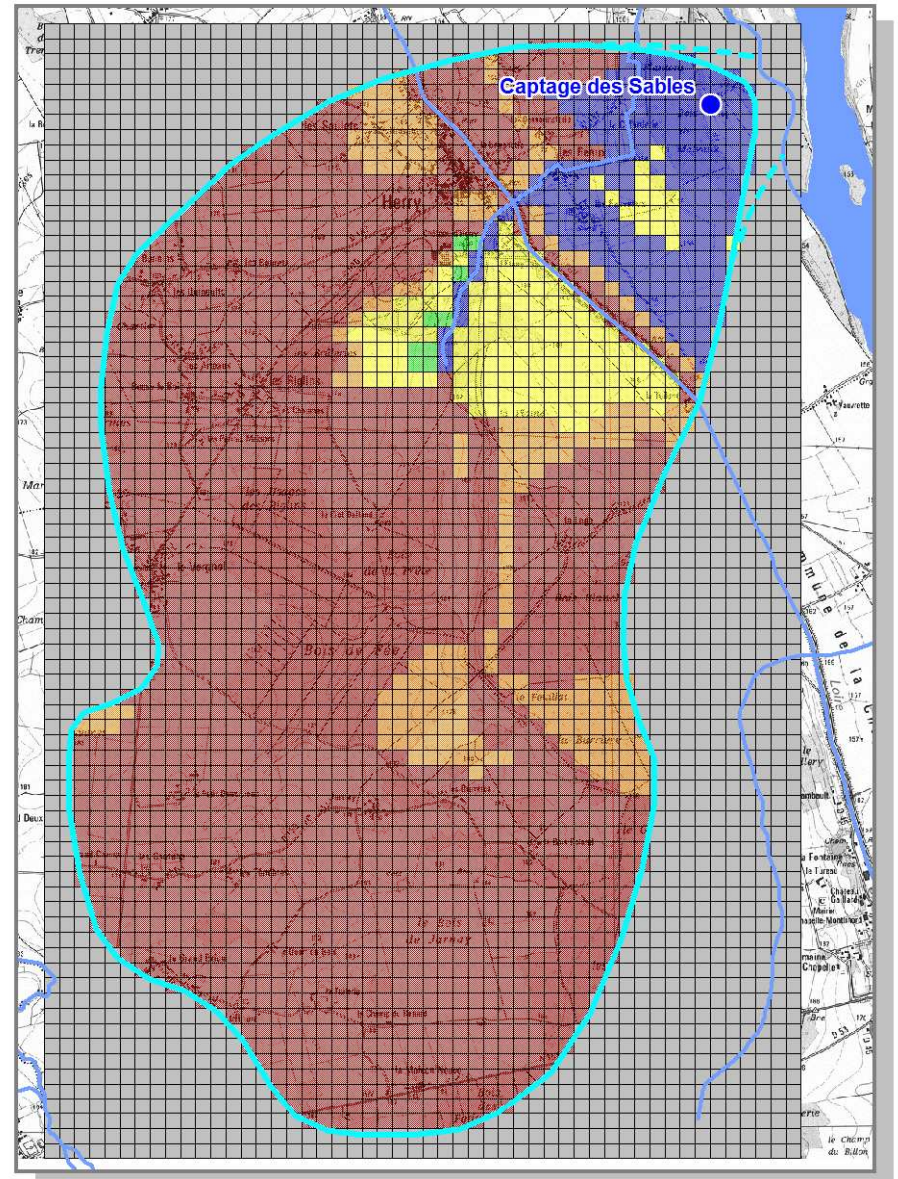
Critères	Caractéristiques	Notes	Pondération
P Pluie efficace	Valeur constante de 5,5 l/s/km ² entre ruissellement et infiltration		10 %
S Nature des sols	Sols argileux, sur calcaires ou alluvions	S 0	25 %
	Sols limoneux, sur calcaires ou alluvions	S 1	
	Sols caillouteux épais sur calcaires ou sableux sur alluvions	S 2	
	Sols caillouteux sur calcaires ou sablo-graveleux sur alluvions	S 3	
	Absence de sols sur calcaires, sols graveleux sur alluvions	S 4	
I Infiltration efficace	Ruissellement très majoritaire – 1600 < valeur IDPR < 2000	I 0	30 %
	Ruissellement majoritaire – 1200 < valeur IDPR < 1600	I 1	
	Infiltration et ruissellement – 800 < valeur IDPR < 1200	I 2	
	Infiltration majoritaire – 400 < valeur IDPR < 800	I 3	
	Infiltration très majoritaire – 0 < valeur IDPR < 400	I 4	
H Epaisseur de zone non saturée	Epaisseur supérieure à 50 m	H 0	20 %
	Epaisseur comprise entre 20 et 50 m	H 1	
	Epaisseur comprise entre 5 et 20 m	H 2	
	Epaisseur comprise entre 2 et 5 m	H 3	
	Epaisseur inférieure à 2 m	H 4	
K Perméabilité de l'aquifère	Calcaires massifs, alluvions très argileuses ($K < 10^{-7}$ m/s)	K 0	15 %
	Calcaires peu fissurés, alluvions argileuses (10^{-7} m/s < $K < 10^{-5}$ m/s)	K 1	
	Calcaires fissurés, alluvions moyennes (10^{-5} m/s < $K < 10^{-4}$ m/s)	K 2	
	Calcaires très fissurés, alluvions moyennes (10^{-4} m/s < $K < 10^{-3}$ m/s)	K 3	
	Calcaires karstifiés, alluvions grossières ($K > 10^{-3}$ m/s)	K 4	

ETUDE DE VULNERABILITE : CARTOGRAPHIE THEMATIQUE

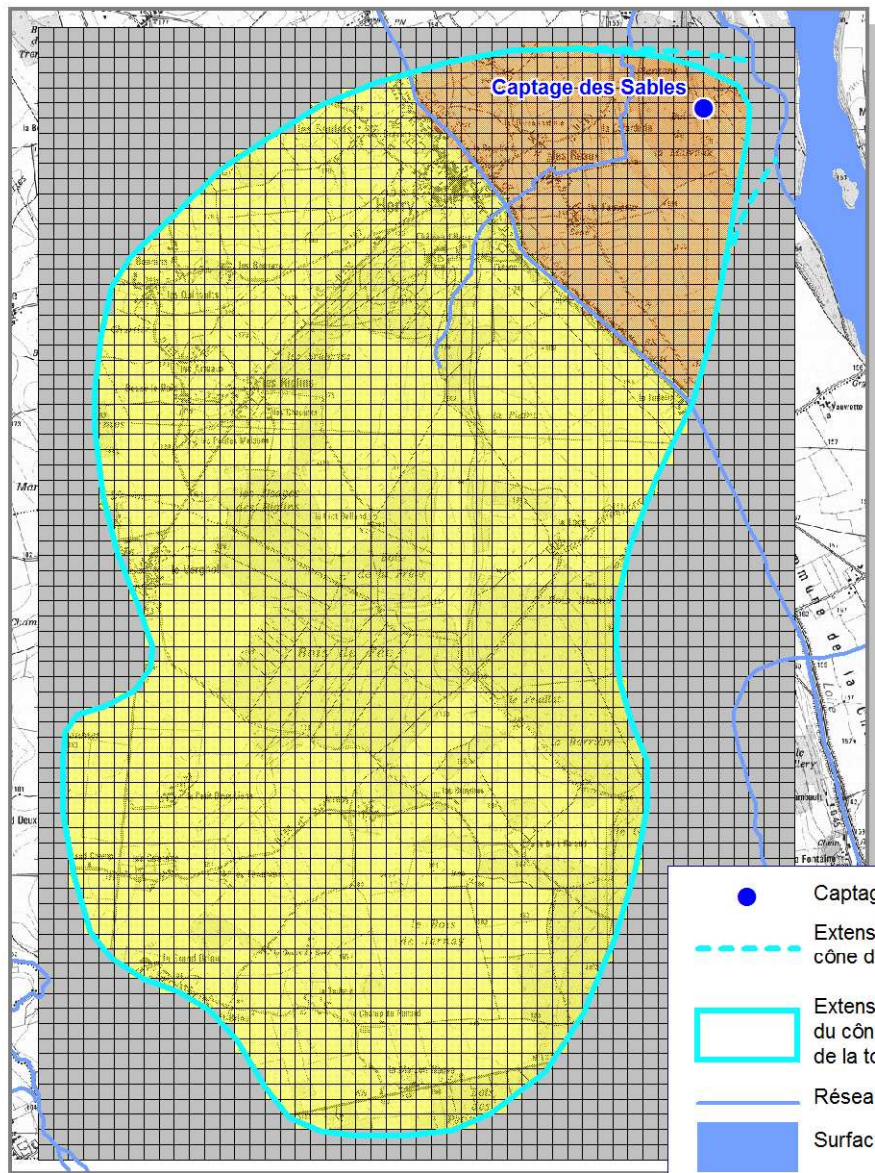
NATURE DES SOLS



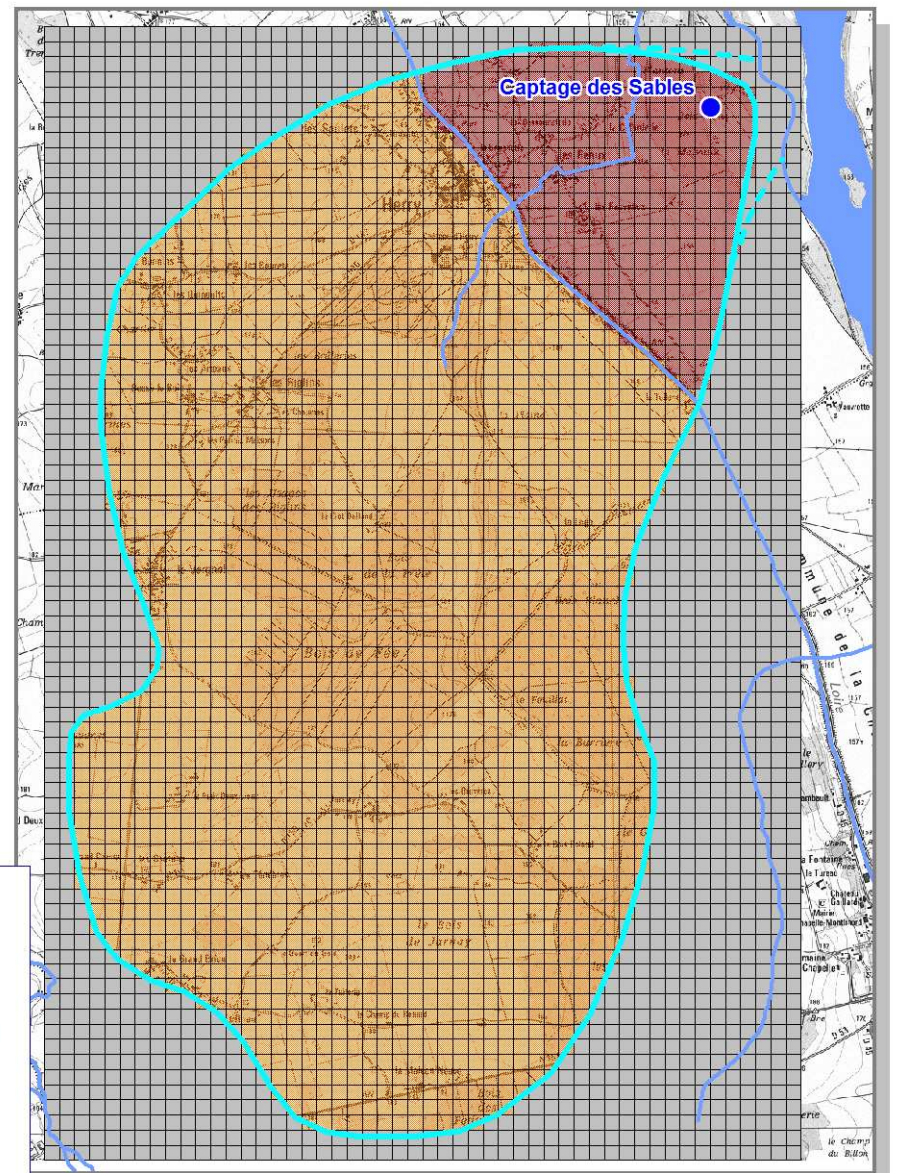
INFILTRATION EFFICACE



EPAISSEUR ZONE NON SATUREE



PERMEABILITE DE L'AQUIFERE



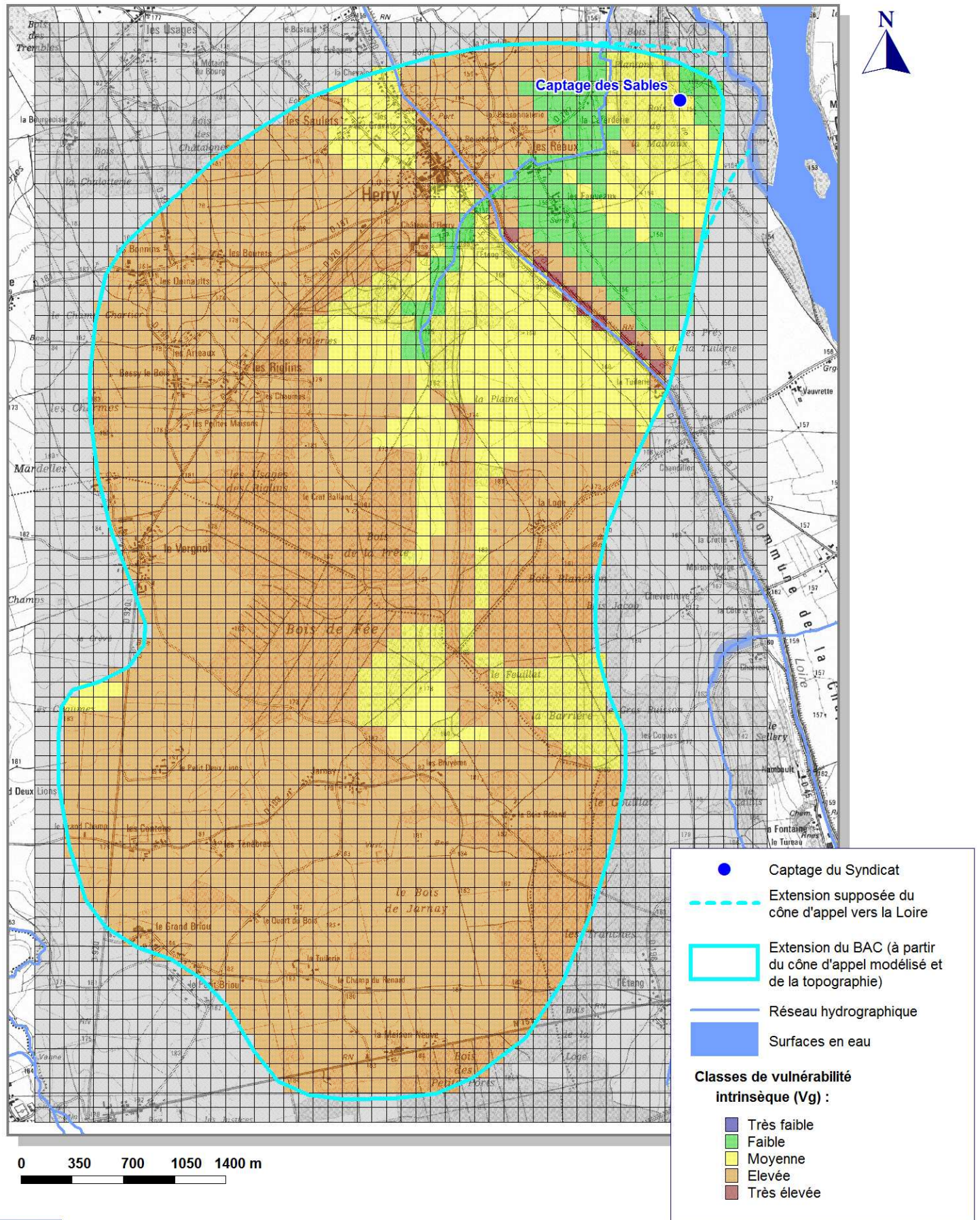
● Captage du Syndicat
 - - - Extension supposée du cône d'appel vers la Loire
 [Cyan line] Extension du BAC (à partir du cône d'appel modélisé et de la topographie)
 [Blue line] Réseau hydrographique
 [Blue area] Surfaces en eau

Classe de qualité :

- [Blue square] Très bonne
- [Green square] Bonne
- [Yellow square] Moyenne
- [Orange square] Mauvaise
- [Red square] Très mauvaise

0 500 1000 1500 2000 m

ETUDE DE VULNERABILITE : ANALYSE MULTICRITERE



5.3 Répartition spatiale des nitrates sur le BAC

La présence et la concentration en nitrates dans les eaux souterraines et superficielles est un indicateur pour étudier les mécanismes de transfert de cette pollution diffuse dans le bassin d'alimentation.

Dans le cadre de la présente étude, une campagne de prélèvements et d'analyses a été conduite en août 2012 sur différents points du bassin d'alimentation (puits, piézomètres, sources et cours d'eau).

Les prélèvements réalisés par CPGF-HORIZON ont été analysés par le laboratoire agréé Cofrac EUROFINs de Saverne.

Tableau 5-a: Résultats de la campagne nitrates sur le BAC

Points de prélèvements	Type	Nitrates (mg/l)
Bessonaterie	Eau souterraine	45,10
Bras Loire	Eau superficielle	1,20
Canal	Eau superficielle	3,14
Fauveaux	Eau souterraine	3,02
Forage château	Eau souterraine	34,00
Le Lac	Eau superficielle	3,14
P4	Eau superficielle	16,50
Pz 6	Eau superficielle	22,80
Riot 1 source	Eau souterraine	46,30
Riot 2 STEP	Eau superficielle	17,60
Riot 3 station	Eau superficielle	4,26
Puits AEP Sables	Eau souterraine	38,50
Forage Sables	Eau souterraine	39,70

Cette campagne apporte les informations suivantes :

- ☞ la concentration en nitrates dans le captage AEP des Sables est de 38,5 mg/l, analogue aux valeurs communiquées par l'ARS. Cette concentration appelle à la vigilance et reste bien supérieure aux concentrations observées dans les eaux de la Loire pourtant proche (1 à 5 mg/l),
- ☞ les eaux superficielles prélevées dans la Loire, les bras mort, les étangs, le ruisseau du Riot et le canal latéral présentent des concentrations relativement faibles en nitrates (< 8 mg/l). Les eaux superficielles sont bien dénitrifiées dans ces milieux en contact avec l'atmosphère. Elles ne constituent donc pas un vecteur de transfert des nitrates dans les eaux souterraines,
- ☞ les eaux souterraines de la nappe alluviale sont fortement atteintes par les nitrates issus des fertilisations régulières sur les cultures. Des concentrations de 39,70 mg/l sont enregistrées sur l'ancien forage des Sables et de 45,10 mg/l sur un puits de la Bessonaterie,
- ☞ un flux azoté provient de la nappe alluviale qui s'écoule sous des terres cultivées et atteint le captage des Sables plus proche de la Loire,



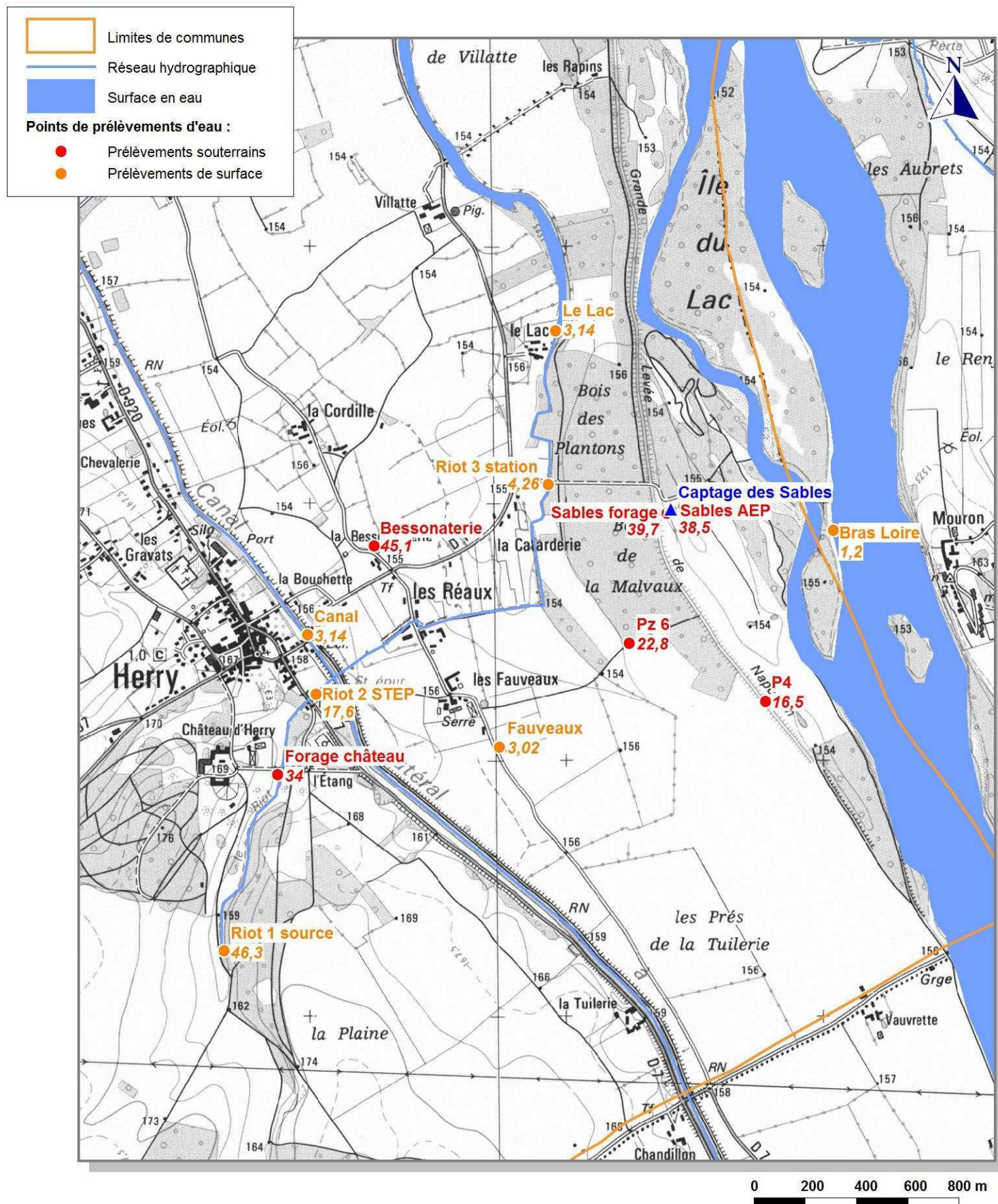
- ☞ sur les coteaux et les plateaux calcaires, les concentrations en nitrates sont élevées à la source du Riot (46,3 mg/l) et au forage du Château d'Herry (34 mg/l). Le réservoir des calcaires de l'Oxfordien est atteint par les nitrates épandus sur les grandes cultures.

L'étude de la répartition spatiale des nitrates dans les eaux souterraines et superficielles du bassin d'alimentation montre une contamination notable de la nappe alluviale et du réservoir des calcaires. La dénitrification est importante dans les milieux superficiels.

Les actions de réduction des nitrates dans les eaux souterraines apparaissent donc prioritaires sur les cultures dans la plaine alluviale et certains thalwegs sensibles des coteaux calcaires.



REPARTITION SPATIALE DES NITRATES SUR LE BAC



5.4 Etude environnementale

5.4.1 Occupation agricole des sols

Un relevé de l'occupation agricole des sols a été effectué le 20 septembre 2012 sur l'étendue du bassin d'alimentation du captage. Il consistait en une reconnaissance de chaque parcelle, afin de définir l'usage agricole des sols : grandes cultures, cultures spécifiques, prairies, bois, zones urbanisées,... L'attention s'est plus particulièrement portée sur les parcelles cultivées en plaine alluviale de la Loire, ainsi que sur les coteaux et plateaux calcaires occidentaux.

Le relevé apporte les informations suivantes :

- ☞ dans la plaine alluviale de la Loire, nous notons un morcellement assez important des parcelles agricoles et des cultures, avec une prédominance de plantations de maïs et de prairies d'élevage bovin. Une importante exploitation de maraîchage est répertoriée au lieu-dit « la Bessonnerie », avec serres et cultures de plein champ. Les autres grandes cultures, principalement du blé-orge ou du colza, ne concernent que quelques parcelles dans la plaine d'Herry. Notons la reconversion totale de l'exploitation agricole de « Vauvrette » située en périmètre de protection rapprochée. Les terrains sont aujourd'hui exploités en prairie d'élevage et en jachère, avec une acquisition partielle par le SIAEP de la région de Sancergues. Enfin, les alentours du puits des Sables sont boisés de ripisylve jusqu'aux rives de la Loire,



Parcelles morcelées sur la plaine au Lac (maïs, élevage) – Jachères sur la ferme de Vauvrette

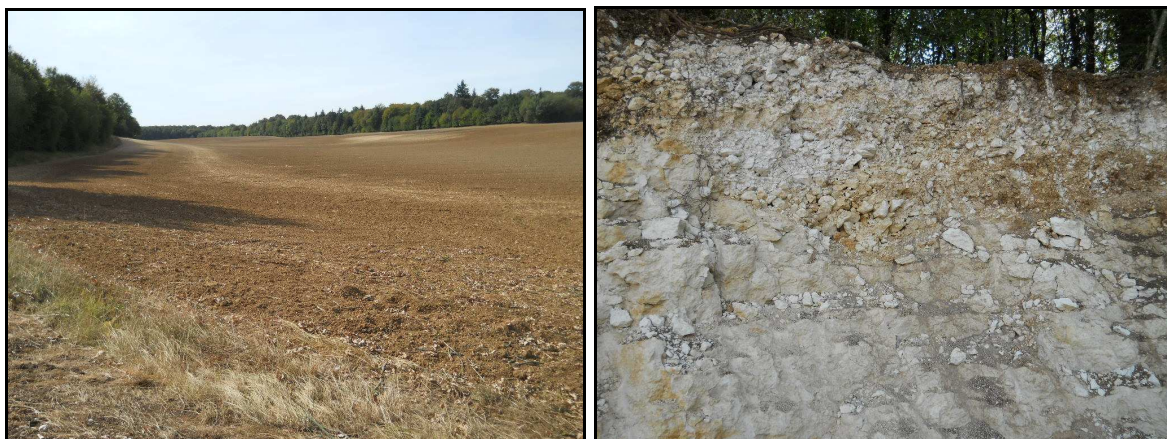
- ☞ sur les coteaux et plateaux calcaires, les grandes cultures et de grands espaces boisés prédominent. Les cultures de blé-orge et de colza sont largement dominantes, avec quelques parcelles exploitées pour le maïs, le tournesol ou la sylviculture. D'une manière générale, les espaces ouverts des plateaux offrent de grandes terres favorables à la culture du blé, de l'orge et du colza.

Dans les vallons, les cultures s'étendent parfois, avec notamment la combe amont de la source de Riot, très sensible en l'absence de couverture sur les calcaires fissurés.

En ce point, nous notions en septembre 2012 une plantation de maïs très étendue et des terres à blé. Les blocs calcaires apparaissaient dans les labours de fin d'été, témoignant de sols peu profonds et peu protecteurs vis-à-vis du transfert des intrants azotés ou phytosanitaires dans la nappe souterraine.



Grandes cultures au « Briou » sur argiles du bourbonnais – Ancien puits agricole



Zone sensible de cultures dans la combe du Riot – Sols peu épais sur calcaires fissurés

5.4.2 Autres sources de pollutions diffuses

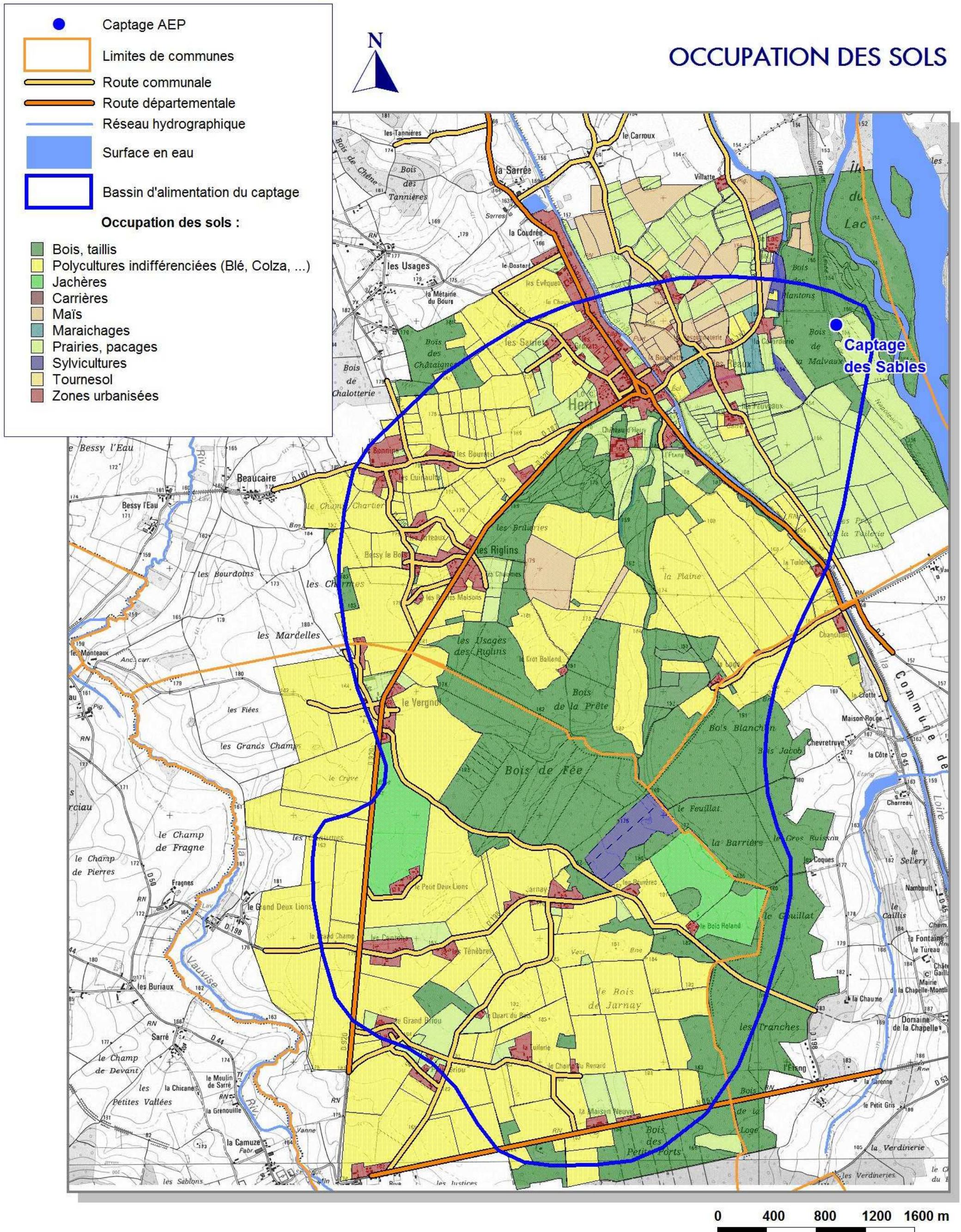
Sur le bassin d'alimentation du captage d'Herry, nous noterons la présence d'autres points potentiels de pollutions diffuses :

- ☞ le bourg d'Herry : les usages de produits phytosanitaires sont réguliers par les agents communaux en charge du désherbage des voiries et installations publiques, ainsi que par les particuliers. Les molécules peuvent être entraînées par ruissellement dans les réseaux pluviaux et vers les fossés dirigés sur la plaine alluviale de la Loire. Les molécules les plus couramment retrouvées proviennent de désherbants (anti-germinatifs ou à action foliaire tels que le glyphosate),

- ☞ le réseau routier départemental : les pratiques de désherbage chimique sont très ponctuelles sur le réseau routier (D7, D920, D187). Les fauchages mécaniques prédominent avec une à deux campagnes annuelles réalisées par le service routes du Conseil Général du Cher et les communes,
- ☞ l'assainissement : les eaux usées du bourg d'Herry sont collectées par un réseau d'assainissement unitaire et séparatif, puis traitées dans une station d'épuration près du pont enjambant le Riot. Le rejet des eaux traitées s'effectue dans le Riot. Les rejets peuvent occasionner des charges organiques et azotées notables dans les eaux du Riot, ainsi que des micropolluants chimiques et métalliques (phytosanitaires, composés de synthèse, métaux,...). Les micropolluants sont présents en quantités très faibles ; ils sont dégradés ou déposés dans le lit du Riot, perché par rapport à la nappe des alluvions.



Habitat dans le bourg d'Herry et près du canal latéral à la Loire



5.5 Hiérarchisation des risques sur le BAC

La hiérarchisation des risques en termes de pollutions diffuses sur l'étendue du bassin d'alimentation de captage s'effectue par croisement des conditions de transferts dans les ensembles géologiques et des pratiques agricoles sur les sols.

La problématique « nitrates » sur les eaux souterraines exploitées pour l'eau potable provient essentiellement des épandages réguliers de fertilisation. Les zones à risques identifiées sur l'étendue du BAC sont ainsi classées par ordre de priorité :

1. Les cultures sur la plaine de la Loire :

Cette zone sensible est classée prioritaire, avec la proximité immédiate de la nappe sous les cultures et la distance au captage des Sables. Le positionnement du puits de captage des Sables dans la ripisylve bordant la Loire montre bien la recherche d'eaux souterraines moins impactées par les nitrates à proximité du fleuve. Les eaux de la Loire ont des teneurs plus faibles en nitrates. Les épandages de fertilisants azotés sur les parcelles provoquent un flux régulier en nitrates dans les eaux de la nappe. Les concentrations dépassent régulièrement 40 mg/l.

2. Les cultures sur coteaux et vallées calcaires :

Cette zone sensible apparaît en seconde priorité, avec un transfert rapide des eaux dans l'aquifère calcaire fissuré et un entrainement des nitrates. Les cultures apparaissant sur des sols calcaires peu épais ou les alluvions anciennes résiduelles sont très sensibles. Les eaux souterraines du substratum calcaire participent directement à l'alimentation de la nappe des alluvions de la Loire.

3. Les cultures sur les plateaux :

Les cultures réalisées sur les plateaux recouverts par la formation des « argiles et sables du Bourbonnais » sont classées dans un contexte moins sensible. La présence d'une couverture (limons, limons-sableux et argiles) plus épaisse sur les calcaires fissurés permet un ralentissement plus important des transferts de nitrates en sous-sol.

Ajoutons que sur l'étendue du BAC, les milieux superficiels tels que ruisseaux, fossés et étangs ne sont pas des vecteurs de pollution par les nitrates. A l'inverse, les écoulements en surface provoquent une dénitrification naturelle jusqu'à un bruit de fond faible en nitrates.

4. Les prairies et jachères :

Ces zones laissées en prairies ou jachères en plaine de la Loire et sur les plateaux présentent de faibles risques. Les fumures sont occasionnelles et peu d'épandage de fertilisants minéraux sont réalisés. Les jachères ne sont pas permanentes et un retour à l'exploitation en cultures est probable sous deux ans.

5. Les espaces boisés :

Les espaces boisés en bordure de Loire ou sur les plateaux occidentaux ne présentent pas de risques, en l'absence d'épandage de fertilisants ou de produits phytosanitaires.



6

Conclusions, recommandations

Le puits de captage des Sables à Herry est exploité pour l'alimentation en eau potable du Syndicat des Eaux de la région de Sancergues (Cher). Il a été classé « captage prioritaire » dans le Cher vis-à-vis de la réduction des pollutions diffuses, en particulier les nitrates.

Les concentrations en nitrates dans les eaux captées sont aujourd'hui voisines de 38 mg/l. Une baisse est constatée depuis 2007, où elles atteignaient près de 50 mg/l.

L'étude hydrogéologique de délimitation du bassin d'alimentation du captage montre un bassin étendu à une portion de la plaine alluviale (PNAC) et au bassin topographique du domaine calcaire amont. La portion de nappe alluviale alimentant le captage a été délimité par étude piézométrique et modélisation hydrodynamique en pompage. Sur les plateaux et coteaux calcaires, le BAC s'étend sur le bassin versant topographique, considérant que les eaux superficielles ruissellent majoritairement et s'infiltrent en aval dans les calcaires sub-affleurant.

Le BAC défini pour le captage s'étend sur 24 km², dont 3,5 km² en plaine alluviale.

L'étude de vulnérabilité a été conduite par analyse géo-pédologique, cartographie et croisement de critères (pluie efficace, nature des sols, infiltration efficace, épaisseur de zone non saturée, perméabilité de l'aquifère). Elle concernait les deux entités géologiques du secteur d'étude : alluvions de la Loire, formations calcaires et sédimentaires des plateaux. Notons que la carte de vulnérabilité intrinsèque aux pollutions diffuses, obtenue par le croisement de critères couramment utilisés dans les études BAC, résulte d'un calcul mathématique avec une pondération.

Les zones les plus vulnérables sont identifiées dans le BAC sur la plaine alluviale de la Loire, ainsi que dans les thalwegs et cuestas des plateaux :

- ✓ dans la plaine alluviale, la couverture dominante limono-sableuse des alluvions et la proximité de la nappe expliquent cette vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. Les nitrates régulièrement épandus migrent directement dans la nappe,
- ✓ sur les plateaux et coteaux, les zones à calcaires sub-affleurant demeurent vulnérables, bien qu'éloignées du captage. Les intrants azotés migrent assez facilement en profondeur et ne se dégradent pas dans le trajet souterrain des eaux.

Les milieux hydrauliques superficiels sur le BAC ne se comportent pas comme des vecteurs de la pollution azotée. Une dénitrification est observée dans la plupart des eaux prélevées.



Les cultures réalisées et les exploitations localisées dans les zones vulnérables apparaissent donc prioritaires pour le diagnostic des pressions agricoles. Ce diagnostic interviendra en second volet de cette démarche BAC, après cette première étude.

La hiérarchisation des risques vis-à-vis des pollutions diffuses permet d'orienter la prochaine étude diagnostic des pressions agricoles sur la plaine de la Loire, puis sur les plateaux calcaires. Le diagnostic permettra de disposer d'informations précises sur les conditions d'exploitation des parcelles, les pratiques de fertilisations et de désherbages associés aux différentes cultures. Il débouchera sur une synthèse technique et un programme d'actions visant, notamment, à initier des démarches agro-environnementales territorialisées (MAET) auprès des exploitants agricoles.

En parallèle du diagnostic des pressions agricoles, un diagnostic et une démarche de bonne pratique de l'utilisation des produits phytosanitaires se justifient pour la municipalité d'Herry dans l'entretien des espaces publics et paysagers communaux.

En outre, un suivi mensuel des nitrates dans les eaux souterraines pompées au captage des Sables est conseillé car peu coûteux et très utile dans cette démarche BAC. Disposer d'un suivi et de données régulières permettra aux techniciens de compléter leur diagnostic sur le paramètre nitrates et de disposer d'indicateur sur les futurs programmes d'action.



Annexe :

Campagne de sondages pédologiques et tests d'infiltration



Observations pédologiques de terrain – Campagne de sondages à la tarière

Point	Topographie	Lieux-dits	Prof. (m)	Observations
1	Plaine alluviale	Sables	0,3	Terre végétale sableuse
2	Plaine alluviale	Station chloration	0,3	Terre végétal sableuse et éclats calcaires (< 5 cm)
3	Plaine alluviale	Près Pz 6	0,7	Terre végétale sableuse de plus en plus compacte et limoneuse
4	Plaine alluviale	Champ Pz 6	0,7	Cf. 3
5	Plaine alluviale	Champ Pz 6	0,4	Cf. 3 ; avec résistance à 40 cm
6a	Plaine alluviale	Vers les Fauveaux	0,3	Terre végétale très sableuse ; résistance à 30 cm
6b	Plaine alluviale	Vers les Fauveaux	0,3	Cf. 6a
7	Plaine alluviale	Près digue	0,9	Terre végétale sableuse de plus en plus argileuse (50-50 à la fin) ; humide, marron foncé
8	Plaine alluviale	Vers Loire	0,7	20 cm de terre végétale grise-marron ; 50 cm d'un horizon sablo-organique beige
9	Plaine alluviale	Cordille	0,5	Terre végétale assez humide, marron ; de plus en plus grumeleux ; éclats de terre cuite à la fin
10	Plaine alluviale	Entre les Fauveaux et Vauvrette	0,4	Terrain sableux très sec ; couleur légèrement ocre vers la fin
11	Plaine alluviale	Vauvrette	0,3	Très sec ; horizon organo-minéral sablo-limoneux
12	Coteaux calcaires	Près carrière Fx	0,3	Sec ; terre végétale sableuse avec beaucoup de cailloutis (< 5 cm) non calcaires
13	Coteaux calcaires	Près Riot	0,7	Assez meuble ; 3 teintes de terre végétale : marron gris pour les 10 premiers cm, ocre sur les 50 cm suivants, beige à la fin ; de plus en plus argileux
14	Coteaux calcaires	Calcaires près dépotoir	0,3	Sec ; beaucoup d'éclats calcaires
15	Coteaux calcaires	Vers la Loge	0,3	Terre végétale limoneuse ; rapide résistance avec éclats rocheux
16	Coteaux calcaires	Bois Blanchon	0,3	Terre végétale sur quelques cm puis argiles ocres très compactes
17	Coteaux calcaires	Bas de pente	0,7	Terre végétale argileuse marron foncé avec quelques cailloutis
18	Coteaux calcaires	Crot Balland	0,3	Horizon organo-minéral avec beaucoup de débris végétaux ; puis formations sablo-argileuses avec éclats calcaires
19*	Coteaux calcaires	Bois de la Prête	0,7	Argiles de beige à ocre

Essais d'infiltration et perméabilité calculées

Point	Perméabilité en m/s	Perméabilité en mm/h
3	$7,7 \cdot 10^{-6}$	28
7	$7,5 \cdot 10^{-6}$	27
13	$3,8 \cdot 10^{-6}$	14
17	$8,6 \cdot 10^{-6}$	31
9	$3,8 \cdot 10^{-7}$	1