



*** ICERE ***

Impact des Changements Environnementaux sur la Ressource en Eau

CONSTRUCTION D'UN MODELE HYDROGEOLOGIQUE D'ETIAGE SUR LE VAL D'ORLEANS

Rapport final suite au financement d'une bourse post-doctorale du Conseil Général du 45 à l'Institut des Sciences de Terre d'Orléans

Auteurs:

Stéphane Binet, enseignant-chercheur

Chrystelle Auterives, post-doctorante

Jean-Baptiste Charlier, post-doctorant

Financement :



Financement et déroulement du projet

Ce travail est le fruit de deux années d'études post-doctorales intégralement financées par le Conseil Général du Loiret, dans le cadre de l'appel d'offre pour l'attribution de Bourse Post-Doctorale 2009. La CLE (Commission Locale de l'Eau) et la Lyonnaise des eaux, structures associées à ce projet, furent les interfaces entre la gestion de la ressource et les utilisateurs de l'eau. En collaboration avec la Lyonnaise des eaux, la CLE a participé à l'élaboration d'un cahier des charges et au suivi de ce projet, ainsi qu'à la synthèse des données existantes. Le travail a été réalisé par Chrystelle Auterives et Jean-Baptiste Charlier à l'Institut des Sciences de la Terre d'Orléans, encadrés par Stéphane Binet et Patrick Albéric. Les deux post-doctorants ont trouvé un contrat en CDI à la suite de ce projet.

Le rendu final consiste en une description des résultats obtenus durant l'étude. La base de données mise en place sur le Val d'Orléans sera mise en ligne sur le site de l'Observatoire des Sciences de l'Univers en Région Centre (OSUC). Le Val du Loiret fait partie d'un projet national de bases de données sur les systèmes Karstiques, soutenu par le CNRS/INSU.

Au cours des deux années du projet, l'ensemble des acteurs s'est réuni officiellement 6 fois :

- Le 8 octobre 2009, réunion de lancement. Etaient représentés la CLE, la Lyonnaise des eaux, l'ISTO, la ville d'Orléans et la Chambre d'agriculture.
- Le 6 novembre 2009 et le 22 janvier 2010, réunion devant la CLE et mise en place d'un comité scientifique de pilotage.
- Le 17 mai 2011, rencontre avec les différents acteurs de l'hydrogéologie locale. Etaient présents Alexis Gutierrez (BRGM), Dominique Chigot (Eau et Industrie), Bruno Leclerc (EDREE).
- Le 4 mai 2011, réunion du comité de pilotage. Etaient présents Blandine Martel (CLE), Chrystelle Auterives (BRGM), Nevila Jozja (CETRAHE), Alexis Gutierrez (BRGM), Patrick Albéric (ISTO), Myriam Dedewanou (ISTO/GEO-HYD), Emmanuelle Joigneaux (ISTO), Duzan Alexandre (Lyonnaise des Eaux).
- Le 18 mai 2011, réunion de présentation de l'état d'avancement à la CLE.
- Mai 2011 : Vulgarisation du Projet : Présentation au Parc Floral du Projet par S. BINET et P. ALBERIC durant les animations "Sens dessus dessous". Conférences ouvertes au public à la Serre aux Papillons.
- Septembre 2011, fin du financement.

Les résultats de la modélisation présentés dans ce rapport ont fait l'objet de publications dans deux congrès de karstologie (Malaga (2010) et Besançon (2011)). Ils sont la base de deux publications dans des revues scientifiques soumises à ce jour (Voir références)

Sommaire :

Synthèse en langage vulgarisé et Objectifs du projet.....P3

1. *Introduction.....P5*

2. *Hydrogéologie du Val d'Orléans: synthèse des études existantes.....P7*

2.1. *Interrelation entre les milieux superficiels et souterrains*

2.2. *Caractérisation du fonctionnement hydraulique du système Loiret*

2.3. *Hydrologie du Loiret et données disponibles*

2.4. *Essai de bilan*

2.5. *Piézométrie du système karstique du Val d'Orléans*

2.6. *Les essais de traçages*

2.7. *Spécificité du Val d'Orléans*

2.8. *Modélisations antérieures réalisées sur le Val d'Orléans*

3. *Méthodologie :P21*

3.1. *Construction du modèle géologique*

3.2. *Analyse de la structure des réseaux karstiques*

3.3. *Construction du modèle hydrogéologique 3D*

4. *Résultats.....P28*

4.1. *Géologie du Val d'Orléans et réseau karstique probable*

4.2. *Calage du modèle hydrogéologique simplifié*

4.3. *Modèle hydrogéologique 3D du Val d'Orléans*

5. *Discussions.....P39*

5.1. *Bilan des apports latéraux (Sologne, Beauce, Forêt d'Orléans)*

5.2. *Impact de l'enfoncement de la Loire sur les débits du Loiret*

5.3. *Effet du pompage du Val sur la piézométrie d'étiage*

5.4. *Impact de la gestion des biefs sur les écoulements souterrains*

5.5. *Réflexion sur un programme d'instrumentation*

Conclusion et perspectives.....P44

Synthèse en langage vulgarisé

Depuis quelques années, les débits du Loiret semblent diminuer. La recherche des causes de cette diminution se confronte à un problème multifactoriel. Au cours des 30 dernières années le Val d'Orléans a subi de nombreuses modifications qui peuvent potentiellement impacter les débits de la rivière. Les pompages, l'urbanisation, l'enfoncement du lit de la Loire, la gestion des écluses... sont autant de facteurs qui influencent les écoulements. Afin de hiérarchiser ces causes de la plus probable à la moins probable, un modèle hydro-géologique a été mis en place sur le Val d'Orléans. Ce modèle a été l'occasion de réaliser une importante synthèse des données existantes sur le Val. Les cartes présentées dans ce rapport présentant le modèle géologique et hydrogéologique sont la base de la réflexion sur les écoulements souterrains.

La modélisation a permis d'estimer les propriétés des conduits et de la matrice ainsi que de reproduire la carte piézométrique en basse eaux. Il en ressort que même en très basse eaux, le Loiret est soutenu par la Loire à 86%. L'eau provenant de la Beauce et de la Sologne correspond à $1 \text{ m}^3/\text{s}$ soit environ 12% du flux, le reste correspond à l'eau qui s'infiltré sur le Val.

Si l'on fait varier un à un les paramètres de ce modèle, il est possible de discuter l'effet du paramètre en question sur le système. Cette méthode a permis d'apporter des informations sur le fonctionnement de la rivière du Loiret. Les débits du Loiret sont un mélange d'eau de ruissellement (ex : le Dhuy) et d'eau souterraine débordant dans le Loiret. Parmi les causes possibles qui modifient les débits souterrains débordant dans le Loiret, 3 ont été étudiées. D'après les calculs réalisés dans ce rapport, une baisse de 1 mètre du fil d'eau de la Loire à la pointe de Courpain provoquerait une baisse des apports d'eau souterraine vers le Loiret de 50%. Ce calcul montre que malgré le rôle important de l'enfoncement du lit de la Loire sur les débits d'eau souterraine dans le Loiret, les effets de pompage A.E.P. ne sont pas négligeables en période de basses eaux puisque le pompage peut diminuer les débits d'eau souterraine arrivant au Loiret de 10 % environ. La gestion des biefs semble avoir un impact sur les écoulements. Modifier le niveau d'eau dans le Loiret de 10 cm peut diminuer de 5% les débits de débordement. En régime stationnaire, maintenir le niveau d'eau le plus bas possible permet une meilleure vidange de l'aquifère. Les débits de soutien d'étiage s'en trouvent ainsi augmentés, mais la hauteur d'eau sera minimale.

Introduction

Dans le cadre du Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux du Val Dhuy-Loiret, la Commission Locale de l'Eau (CLE) souhaitait mener une étude pour quantifier le volume de la réserve en eau souterraine présente sous le val d'Orléans. Cette ressource en eau concerne directement les 105 000 habitants du Val et alimente une grande partie des 200 000 habitants de l'agglomération d'Orléans. Suite au constat d'une diminution des débits dans la rivière du Loiret, observée par les riverains, la quantification du volume de cette réserve s'impose afin de doter le Val d'Orléans d'un outil de gestion durable de la ressource.

La rivière du Loiret est intimement liée aux eaux souterraines du Val d'Orléans qui s'infiltrent en grande partie par le biais de pertes en Loire. De nombreux changements environnementaux, comme le surcreusement récent (observé depuis un siècle) du lit du fleuve Loire ou l'augmentation des prélèvements pour l'irrigation et l'alimentation en eau potable de l'agglomération Orléanaise sont susceptibles d'influencer la réserve disponible et le régime du Loiret. Comprendre cette dynamique nécessite d'analyser le système hydrologique Loire / Loiret sur une longue échelle de temps (le siècle voire plus) afin d'identifier l'évolution sur le long terme de la réserve en eau.

Évaluer l'impact des changements environnementaux (climatiques mais aussi anthropiques, géologiques...) sur la qualité et la quantité des eaux est l'une des thématiques de l'Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO) (ex sur le val d'Orléans, Joigneaux, 2011).

Dans ce contexte, Le travail consiste à reconstituer les débits du Loiret (modélisation hydrogéologique à l'étiage). Cette analyse est rendue difficile par la très grande variabilité des vitesses dans le milieu (système de drains karstiques). La richesse des observations hydrologiques (un siècle de mesures) permet cependant de développer et de valider des modélisations hydrogéologiques. La notion de changement est abordée ici par une approche fondée sur un protocole de test de réponses du modèle hydrodynamique à différents scénarii plausibles de changement hydrologique et climatique.

Ce rapport présente les étapes de construction d'un modèle hydrogéologique sur le Val d'Orléans et les étapes pour sa calibration. Une attention particulière est portée sur l'étude de la localisation des volumes montrant une forte probabilité de contenir un ou plusieurs conduits karstiques.

Quatre questions particulières, liées au fonctionnement du Loiret à l'étiage sont ressorties des concertations avec la CLE (Réunion du 4 mai 2011) et sont en lien direct avec la problématique des

changements environnementaux. Ce rapport présentera donc une évaluation par la modélisation hydrodynamique :

- de la contribution des unités périphériques, comme la forêt de Sologne ou la Beauce sur les débits d'étiage du Loiret.
- de l'impact d'une variation de la cote de Loire à l'étiage sur les débits du Loiret.
- de l'impact des pompages du Val sur les débits du Loiret en basses eaux.
- de l'impact de la gestion des biefs (ouverture ou fermeture des vannes) sur les écoulements souterrains.

A partir de cette modélisation et des différents tests présentés ici, une tentative de hiérarchisation des phénomènes qui influencent les débits du Loiret sera proposée dans la conclusion.

2. Hydrogéologie du Val d'Orléans: synthèse des études existantes (*Mise à jour après A. Joodi 2009*)

Le Val d'Orléans (Fig. 1) est considéré comme une vaste dépression est - ouest du lit majeur de la Loire. Il s'étend sur une longueur de 33 km, depuis Sigloy, à l'est, jusqu'à la confluence de la Loire - Loiret, à l'Ouest. Sa largeur en moyenne de 6 km peut atteindre 8 km à Sandillon. En plus de la Loire qui délimite la partie nord du val, les eaux de surface du Val d'Orléans sont drainées par deux cours d'eau principaux, le Dhuy affluent du Loiret, et ce dernier qui se jette dans la Loire à la pointe de Courpain.



Fig. 1 : carte hydrogéologique du val d'Orléans. Les auteurs sont cités dans la légende. Les bassins versants sont représentés en figures 9.

Le Dhuy, long de 34,2 km, draine un bassin versant de 206 km² (Géo-Hyd, 2004). Il s'écoule au pied du plateau de Sologne et se jette dans le Loiret 1000 m à l'aval de la source du Bouillon. Le Dhuy présente de grandes variations de débits. Durant les périodes de hautes eaux, il peut présenter des débits de l'ordre de 15 m³/sec. Par contre, au cours de la période d'étiage, son débit est presque nul (Albéric et Lepiller, 1998 ; Albéric, 2003). Le Loiret est long de 11,6 km. Il draine directement un bassin versant topographique de 75,5 km². Une part importante de l'eau du Loiret provient du drainage des eaux souterraines. Les sources du Loiret situées dans le parc floral d'Orléans, le Bouillon et l'Abîme sont considérées comme les deux émergences principales des pertes de la Loire. En a des sources du Bouillon et de l'Abîme, les sources les plus importantes car permanentes sont: les sources des Béchets, la source du Clouseau, la source du pont Saint-Nicolas, la source de la Pie, les sources de Bellevue la Chapelle sur la Loire. Le Loiret reçoit en rive droite trois affluents : le bras de Bou, le bras des Montées et le bras du Couason.

Situé au sud du bassin de Paris, la géologie du Val d'Orléans présente des formations marines puis lacustres déposées durant les régressions successives cénozoïques. Ces faciès sont en grande partie recouverts par des alluvions fluviales quaternaires.

Dans le lit mineur de la Loire, les alluvions modernes sont représentées également par des sables et des graviers. Dans le lit majeur, ce sont des limons de crue, sablonneux et micacés. A l'exception de quelques zones d'extension limitées, l'épaisseur des alluvions dans le Val ne dépasse pas 10 m (Desprez, 1976 ; Martin et Noyer, 2003).

Les alluvions récentes (fy) se localisent dans le lit majeur de la Loire sous les limons de crues. Ils sont représentés par des sables (quartz, feldspath et éléments accessoires des roches cristallines) et des graviers. A l'aval d'une ligne Jargeau - Saint-Cyr-en-Val, ils reposent directement sur le calcaire de Beauce. A l'amont de cette ligne, ils reposent sur les marnes de l'Orléanais.

Les alluvions anciennes (fx) constituent les terrasses qui recouvrent les sables de Sologne.

Les sables et argiles de Sologne (Fig.2) à dominante d'argiles et de sables argileux, n'affleurent qu'en dehors des limites du Val. Ils constituent le sous-sol de la Sologne et de la forêt d'Orléans (Martin et Noyer, 2003).

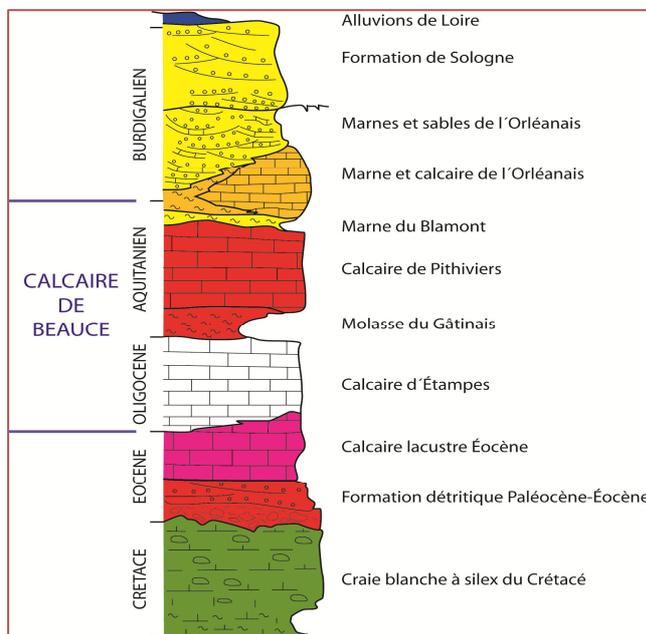


Fig. 2 : Les formations hydrogéologiques du Val d'Orléans (Modifié, d'après Martin 2007)

Les Marnes de l'Orléanais sont représentées par des argiles vertes, compactes, parfois graveleuses au pied et généralement accompagnées de marne blanche. Ils sont absents à l'ouest d'une ligne Jargeau - Saint-Cyr-en-Val, leur épaisseur est variable, et augmente progressivement en direction de Tigy.

Les calcaires de Beauce constituent un des aquifères les plus étendus de France. Il alimente une grande partie du bassin parisien. Ces formations aquifères d'origine lacustre (calcaires du Tertiaire), étendus sur près de 9000 km² renferment une nappe libre au nord de la Loire et captive sous le recouvrement argilo - sableux du Burdigalien de la Sologne, au sud du département (Gigout, 1973 ; Lorain, 1973). La nappe des calcaires de Beauce sous le Val d'Orléans est plus étendue que la nappe alluviale (Fig. 1). Elle s'étend de part et d'autre sous la forêt d'Orléans, sous la Sologne et sous le Val d'Orléans. Elle est captive dans la partie est et sud du Val et sous la forêt. L'ensemble des calcaires de Beauce est constitué principalement des niveaux perméables des calcaires de Pithiviers sur sa partie supérieure, et des calcaires d'Etampes sur sa partie inférieure. Ces deux niveaux sont séparés par les formations moins perméables de la molasse du Gâtinais.

La communication entre la nappe alluviale et la nappe de Beauce est effective dans la partie ouest du Val. Dans la partie est, la formation des argiles de Sologne s'intercale entre ces deux aquifères, rendant la nappe des calcaires localement captive (Martin et Noyer, 2003).

2.1. Interrelation entre les milieux superficiels et souterrains

Les interrelations entre les différents milieux sont nombreuses et complexes, du fait notamment de la karstification des calcaires de Beauce.

- L'infiltration des eaux de la Loire à Jargeau : les pertes de la Loire dans le lit du fleuve à Jargeau sont de l'ordre de 10 à 20 m³/sec (Zunino, 1979; Chéry, 1983; Livrozet, 1984 ; Lepiller et Mondain, 1986; Le Borgne et al., 2005). L'eau qui s'infiltré (Fig. 3) alimente la nappe des calcaires de Beauce sous le Val d'Orléans, cette eau étant prélevée et destinée à la consommation d'une partie de l'agglomération orléanaise. Schématiquement, les eaux de la Loire infiltrées contribuent à environ 70% de l'eau qui est prélevée aux captages du Val et au moins à 80% des eaux qui émergent aux différents résurgences du Loiret (Helsens, 1981 ; Lelong et Lepiller, 1981 ; Albéric et Lepiller, 1998).
- Infiltration au nord de la Loire : Une circulation karstique a été démontrée à l'ouest de Châteauneuf-sur-Loire (rive droite de la Loire) vers les sources du Loiret. La Loire n'est donc pas une limite pour les écoulements souterrains. Une partie de l'eau émergeant dans le Loiret au sud, provient du nord et passe sous la Loire. Par endroit, la Loire est perchée au-dessus de l'aquifère du Val (Lepiller, 2006).
- Perte à la limite des sables et argiles de Sologne (ex : Limère) : illustre la relation entre les eaux de surface qui ruissellent au nord de la forêt de Sologne et l'aquifère du Val d'Orléans.



Fig. 3 : Vue des pertes de la Loire à Jargeau. Elles sont de l'ordre de 10 à 20 m³ en basse eaux.

Les conduits principaux qui alimentent l'aquifère karstique du Val d'Orléans sont localisés entre Jargeau et les sources du Loiret d'une part et entre Sandillon et ces sources d'autre part (Desprez, 1976 ; Chatelain et al., 1981 ; Chéry et Lepiller, 1981 et 1986). Les conduits karstiques du Val d'Orléans sont très développés en raison de la circulation des eaux souterraines qui peut être rapide entre la zone de recharge sur la Loire et les exutoires du Loiret. Ces circulations causent des effondrements de la voûte calcaire par dissolution, et par conséquent un élargissement des conduits. Ils font classiquement plusieurs mètres de diamètre (Fig. 4) et la vitesse d'écoulement peut être identique à celle observée dans les fleuves. Les essais de traçages réalisés entre les pertes de la Loire et les exutoires du Loiret montrent que les vitesses de transit entre la Loire et la source du Bouillon sont de l'ordre de 100 à 130 m/h, mais elles peuvent atteindre 200 m/h à l'aval de la source du Bouillon (Caudron et Albinet, 1965 ; Zunino, 1979 ; Chéry, 1983 ; Le Borgne et al., 2005). L'existence d'un conduit karstique développé sous le plan d'eau de l'île Charlemagne ne semble pas être en relation directe avec les eaux de la Loire ou celles des sources du Loiret. Cet axe de drainage est indépendant de l'axe Jargeau - Loiret. Ce conduit se dirige vers les sources de Bellevue la Chapelle sur la Loire (Lepiller, 1996 et 2006).



Fig. 4 : Les conduits principaux dans le système karstique du Val d'Orléans

2.2. Caractérisation du fonctionnement hydraulique du système Loiret

La rivière du Loiret est en interaction permanente avec l'aquifère des calcaires de Beauce sous-jacent. La ligne d'eau du Loiret est jalonnée par différents exutoires (Fig. 5). Le Loiret s'écoule sur un lit à pente très faible de l'ordre 0,07‰. Ce n'est qu'entre les moulins de Saint-Samson et Saint-Santin que la pente augmente un peu (0,6‰) (Martin et Noyer, 2003). En période de hautes eaux, plusieurs résurgences karstiques viennent rejoindre le cours du Loiret (Fig. 6). En cette période, les circulations karstiques entre les pertes de la Loire et les émergences du Loiret sont rapides en raison du fort débit de la Loire. La quantité des apports du Dhuy et les affluents du Loiret est importante pendant la période pluviale.

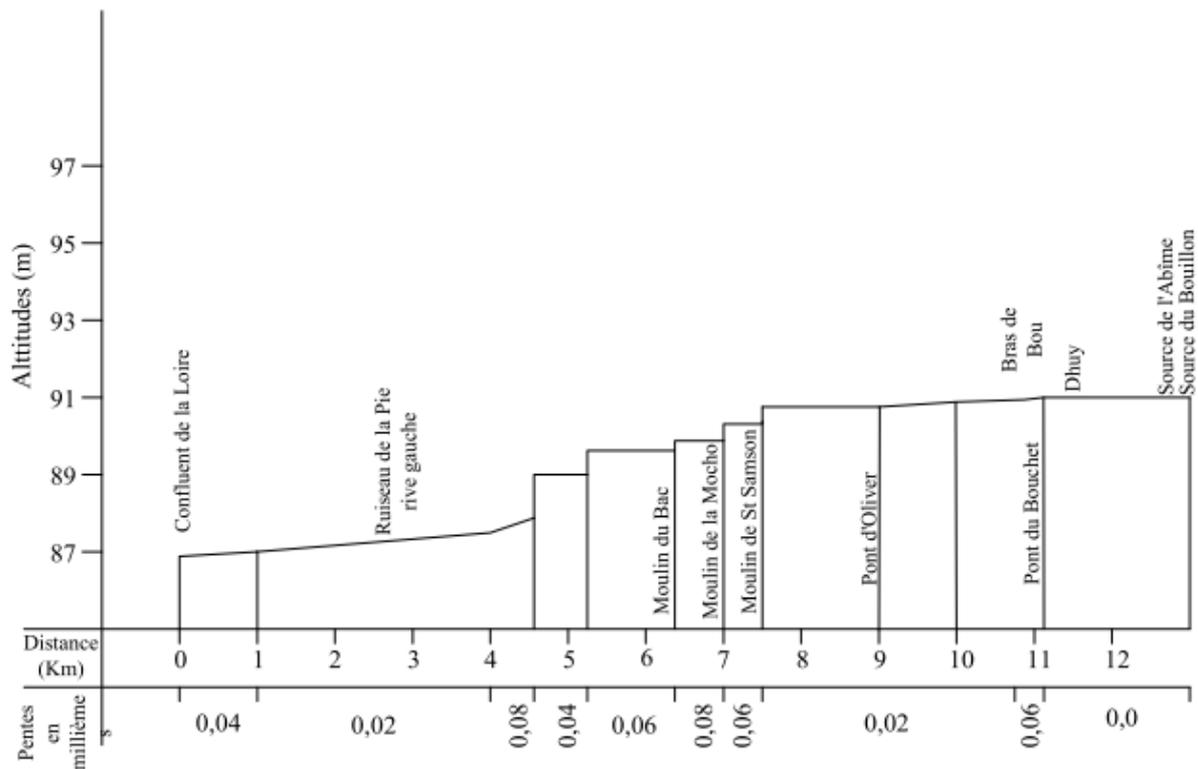


Fig.5 : Profil en long de la rivière du Loiret (Lepiller, 1996)

En période de basses eaux, l'influence des apports souterrains est déterminante puisque les débits des affluents et notamment ceux du Dhuy peuvent être quasi nuls (Fig. 6). En conditions de basses eaux du Dhuy, la surface piézométrique de l'aquifère karstique est située au-dessus de la ligne d'eau du Loiret : les orifices amont le long du Loiret fonctionnent en exutoires. En condition de hautes eaux du Dhuy et de basses eaux de l'aquifère karstique, la ligne d'eau du Loiret s'établit au-dessus de la surface piézométrique : les orifices fonctionnent en pertes. Ces périodes, appelées inversacs, peuvent affecter les sources du Bouillon et de l'Abîme (Albéric, 2001 et 2008).

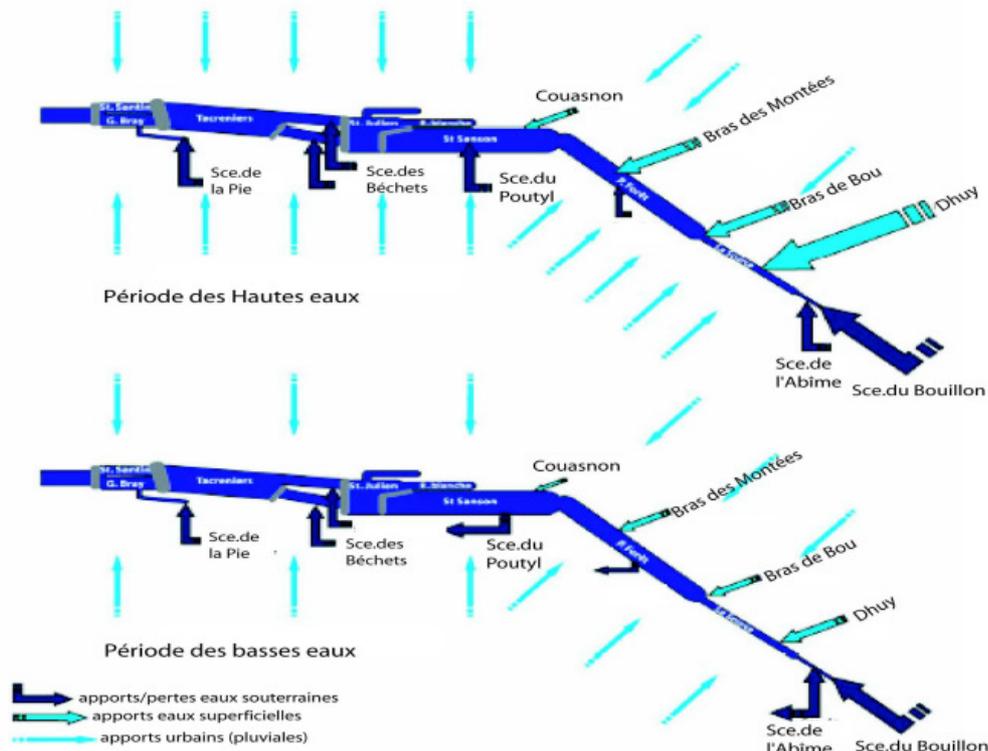


Fig.6 : Le système hydraulique de la rivière du Loiret (Géo-Hyd, 2004)

2.3. Hydrologie du système karstique du Val d'Orléans et données disponibles.

La Loire aux environs de Châteauneuf-sur-Loire - Jargeau abandonne une partie de ses débits à des circulations souterraines et ces débits perdus dans la zone amont du Val d'Orléans sont restitués à l'aval, notamment par le Loiret et ses sources. Sainjon (1859) notait qu'après Bouteille, le débit de la Loire diminuait progressivement jusqu'à Orléans. Le 5 octobre 1859, en période d'étiage, il donnait un profil en long des débits de la Loire (Tableau 1).

Point de jaugeage	Débit de la Loire (m ³ /sec)
Bouteille	42,3
Jargeau	34,8
100 m en amont de la confluence Loire-Loiret	30,8
400 m en aval de la confluence	45

Tableau 1 : Résultats des jaugeages en Loire par Sainjon le 5/10/1859

Les jaugeages effectués entre le 25 août et le 20 octobre 1859, en condition de basses eaux de la Loire, montraient que le débit perdu entre Jargeau et Orléans était de 5 et 7,5 m³/s (Janet, 1901 ;

Marboutin, 1901 et 1902). En 1865, Sainjon démontrait que la Loire subissait des pertes progressives entre Guilly et Orléans de 20 à 25 m³/s, et que le fleuve retrouvait le débit observé à Guilly à l'aval de la confluence avec le Loiret. Plus récemment, la figure 7 présente le débit de la Loire à Orléans, Gien (70 km à l'amont d'Orléans) et Blois (62 km à l'aval d'Orléans). On voit clairement que le débit à Orléans est inférieur à celui à Gien et Blois, en raison des pertes de la Loire à Châteauneuf-sur-Loire, Jargeau et à Sandillon. Par contre, le débit de la Loire à Blois montre que la Loire se recharge par la confluence Loire - Loiret, la nappe de Beauce et les formations de Sologne. Les débits d'exhaure du système karstique du Loiret (Tableau 2) ne sont connus qu'à partir des évaluations du débit des exutoires par tronçon de cours d'eau obtenues par la différence entre les jaugeages du Loiret au pont du Bouchet ou à la confluence avec la Loire et ceux du Dhuy.

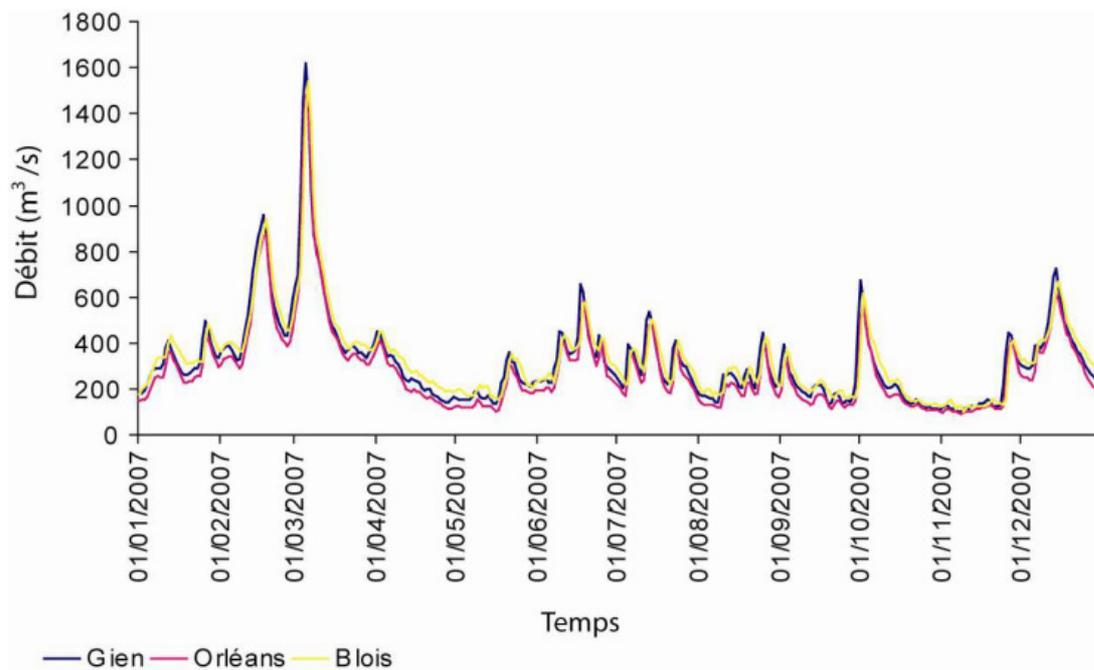


Fig. 7 : Débit moyen journalier de la Loire à Gien, Orléans et Blois (2007)

	De la source du Bouillon au Pont du Bouchet	De la source du Bouillon au Pont du Bouchet	De la source du Bouillon au Pont du St- Nicolas	De la source du Bouillon à la confluence avec la Loire	Loiret à la confluence (débit du Dhuy inclus)
Période	De 12/1936 à ?/1945	De 09/1965 à 12/1987	De 10/1965 à 12/1988	De 09/1966 à 08/1988	De 06/1859 à 08/1900
Débites extrêmes	$0,4 < Q < 5,7$	$0,124 < Q < 2,83$	$1,633 < Q < 16$	$2,77 < Q < 8,75$	$9,7 < Q < 18,3$
Débit moyen en (m ³ /sec)	$Q_{\text{moyen}}=2,4$	$Q_{\text{moyen}}=1,47$	$Q_{\text{moyen}}=6,61$	$Q_{\text{moyen}}=5,39$	$Q_{\text{moyen}}=14$

Tableau 2 Débit des exutoires par tronçons de cours du Loiret (Sainjon, 1888 ; Guillard, 1946 ; Lepiller, 2006)

2.4. Essai de bilan (d'après Gutierrez et Binet 2010)

L'eau de la rivière et des conduits karstiques souterrains du Loiret provient de diverses origines. De nombreux essais de bilan ont déjà été proposés pour ce site [Lepiller (2006), Lelong et Jozja (2008)]. Les débits du Loiret (surface et souterrain) varient de 315 à 500.10⁶ m³ /an, selon les auteurs, soulignant la complexité du système. Ce nouvel essai de bilan hydrologique vise à hiérarchiser les différentes contributions à l'écoulement total du Loiret afin d'identifier les plus importantes sources d'incertitudes et d'orienter les études à venir.

En entrée, une partie de l'eau provient de la pluie et du ruissellement sur le bassin versant. En s'appuyant sur une pluviométrie moyenne dans le Val (Marcilly-en-Villette) de 730 mm et d'une évapotranspiration potentielle de 695 mm (station Météo-France de Bricy) pour la période 1966–2009, la modélisation des relations entre la pluie et les débits du Dhuy au Gobson [Joigneaux et al. (2008)] permet d'évaluer une pluie efficace de l'ordre de 191 mm. Pour le bilan, cette pluie doit être appliquée sur le bassin versant du Loiret. Celui-ci doit être préalablement défini :

- Le bassin versant topographique (s.s.) du Loiret, défini par le Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux incluse le Val d'Orléans de 284 km². Il déborde sur le coteau de Sologne pour atteindre une superficie totale de 330 km². À cette surface peuvent être ajoutés les 60 km² du bassin versant de l'Anche dont les pertes alimentent le Loiret. Une pluie efficace de 191 mm sur cette surface génère une contribution au système de l'ordre de 65,2.10⁶ m³/an.

- Le bassin versant géologique du Loiret peut être évalué grâce à la carte piézométrique de la nappe de Beauce (Fig. 8). Comme indiqué précédemment, dans le Val d'Orléans la Loire est partiellement déconnectée de la nappe. Perchée, elle ne joue plus son rôle de drain. Les lignes de crêtes piézométriques suggèrent un bassin versant du Loiret de plus de 700 km², soit environ 356 km² de

bassin supplémentaires s'étendant largement sous la forêt d'Orléans et la Sologne. Dans cette extension, les calcaires sont recouverts de sables et argiles du Burdigalien à travers desquels les vitesses d'infiltration sont de l'ordre d'un mètre en 350 ans (Maget et Olive, 2006) soit une contribution aux eaux souterraines de $10^6 \text{ m}^3/\text{an}$.

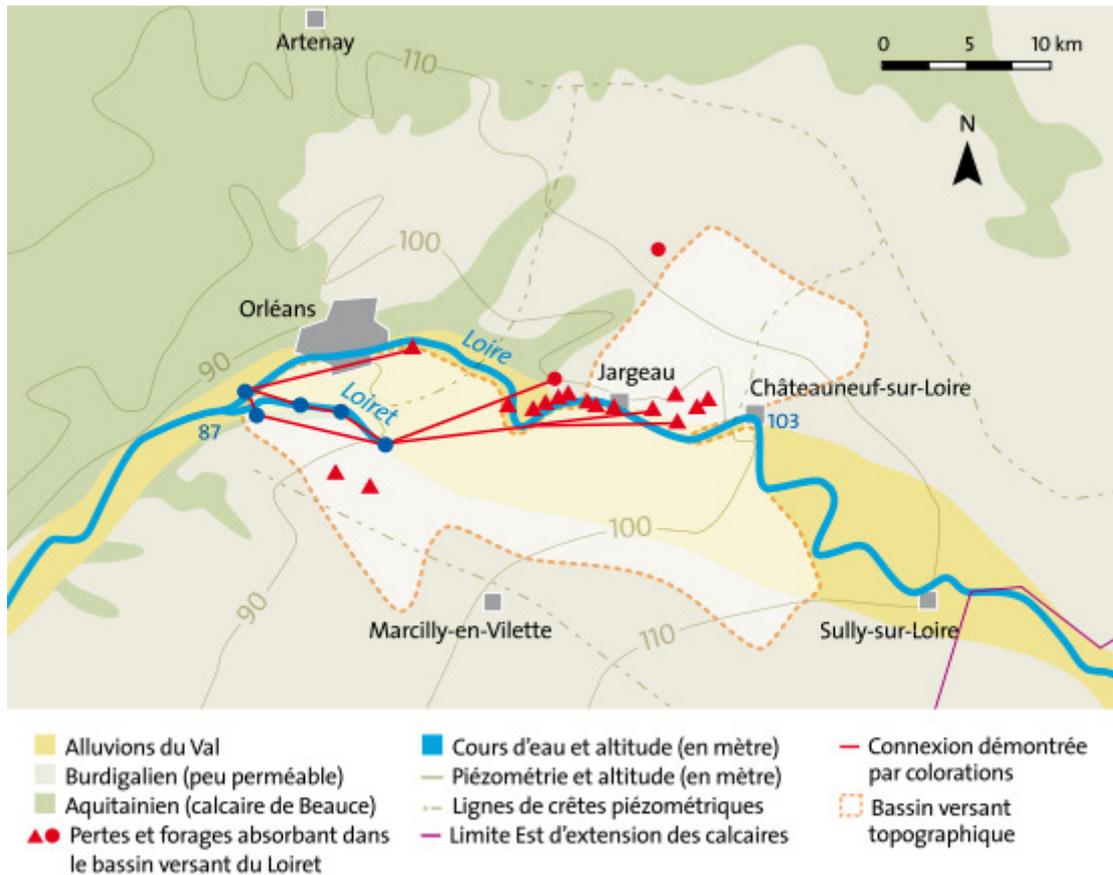


Fig. 8 : Plan de situation montrant le Val d'Orléans, le Bassin versant topographique et hydrogéologique du système pertes-résurgences de la Loire.

Quantifier les pertes de Loire est un exercice difficile. L'analyse des débits moyens mensuels de la Loire aux stations de Gien et d'Orléans et de l'évaporation entre les deux stations (Martin, 2003) met en évidence des pertes vers l'aquifère comprises entre 5 et $15 \text{ m}^3/\text{s}$ pour des débits de la Loire inférieurs à $500 \text{ m}^3/\text{s}$ environ. En hiver, l'incertitude sur la mesure des forts débits est telle (5 à 10 %) qu'elle ne permet pas de quantifier les volumes d'eau s'infiltrant (l'incertitude sur la mesure devenant supérieure à la valeur probable des pertes).

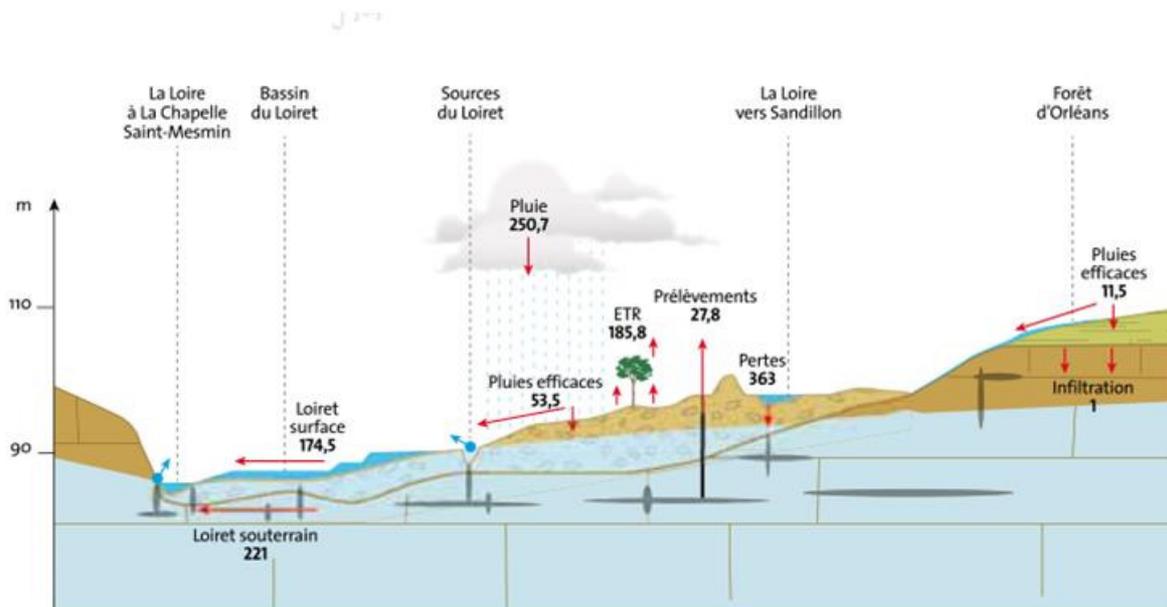


Fig.9 : Coupe hydrogéologique et bilan de flux d'eau (en millions de mètres cube par an), d'après Gutierrez et Binet 2010.

En étudiant la crue de la Loire de juin 1992 ayant atteint $600 \text{ m}^3/\text{s}$, une modélisation hydrodynamique (Joodi, 2009) calcule un débit de perte de $25 \text{ m}^3/\text{s}$. Ce résultat suggère que la relation entre le débit de la Loire et le débit des pertes n'est pas linéaire. En revanche, une relation linéaire s'établit entre le carré du débit des pertes et les débits de la Loire. Sur la base de cette relation, le débit moyen de $349 \text{ m}^3/\text{s}$, mesuré à Orléans sur 46 ans, nous permet d'évaluer le débit moyen de pertes en Loire à $11,5 \text{ m}^3/\text{s}$, soit $363 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$. De cette façon, les entrées dans le système représentent $429 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$.

La partie visible des débits sortant du Loiret à la pointe de Courpain est de $174,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ (1965-1988). Si l'on admet que les débits souterrains sont proportionnels aux débits de surface, la valeur moyenne des débits souterrains annuels serait de l'ordre de $221 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$. Enfin, il faut ajouter les volumes prélevés par l'alimentation en eau potable dans le Val d'Orléans ($14,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$), l'irrigation ($10,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$) et l'industrie ($3 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$) (données de l'Agence de l'eau pour la période 1998-2007) pour aboutir à un débit sortant du système de l'ordre de $423 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$. Dans ces termes, le bilan du Val d'Orléans s'équilibre (Fig. 9). Les pluies efficaces sur l'impluvium du Val représenteraient ainsi 16 % des écoulements du système Loiret (surface et souterrain). Néanmoins, une incertitude importante persiste. Elle est moins liée à la méconnaissance du bassin contributeur qu'à l'incertitude sur les débits, en particulier ceux de la Loire qui jouent sur le débit des pertes (et donc des résurgences). Les pertes et les résurgences étant chacune de part et d'autre du bilan, les flux souterrains dans le Val d'Orléans pendant les périodes de hautes eaux sont encore très

approximatifs. Maintenant que la mesure des débits du Loiret s'affine, les efforts doivent se porter sur ceux de la Loire.

2.5. Piézométrie du système karstique du Val d'Orléans

Une carte piézométrique du Val d'Orléans a été réalisée à partir des mesures de septembre - octobre 1966 (sur 712 puits) en période de basses eaux, et de novembre 1966 en période de hautes eaux. Cette étude concernait le secteur situé entre Châteauneuf-sur-Loire et la confluence Loire - Loiret. La Figure 10 a et b présente les cartes piézométriques des calcaires de Beauce pendant l'étiage et pendant la crue. Plus récemment, pour évaluer les hauteurs d'eau, une nouvelle carte a été réalisée sur 100 points en 2008. Elle ne montre pas de différences significatives. La carte réalisée en période de hautes eaux concernait le secteur situé entre Châteauneuf-sur-Loire et la confluence Loire - Loiret.

L'examen de la surface piézométrique appelle les remarques suivantes (fig. 10) :

- Présence des axes de drainage (karst) de Châteauneuf-sur-Loire en direction de Vienne-en-Val, et de Jargeau à Sandillon où les deux axes confluent.
- Convergence des axes de drainage vers les sources du Loiret.
- Axe de drainage à partir de l'île Charlemagne qui se dirige vers les sources de Bellevue la Chapelle sur la Loire.
- Présence des axes karstiques en rive droite de la Loire : le premier entre Checy et Combleux et le deuxième axe à l'aplomb de Bou.
- Les axes de drainages confluent vers Sandillon, Saint-Cyr-en-Val et les sources du Loiret (Bouillon et Abîme).

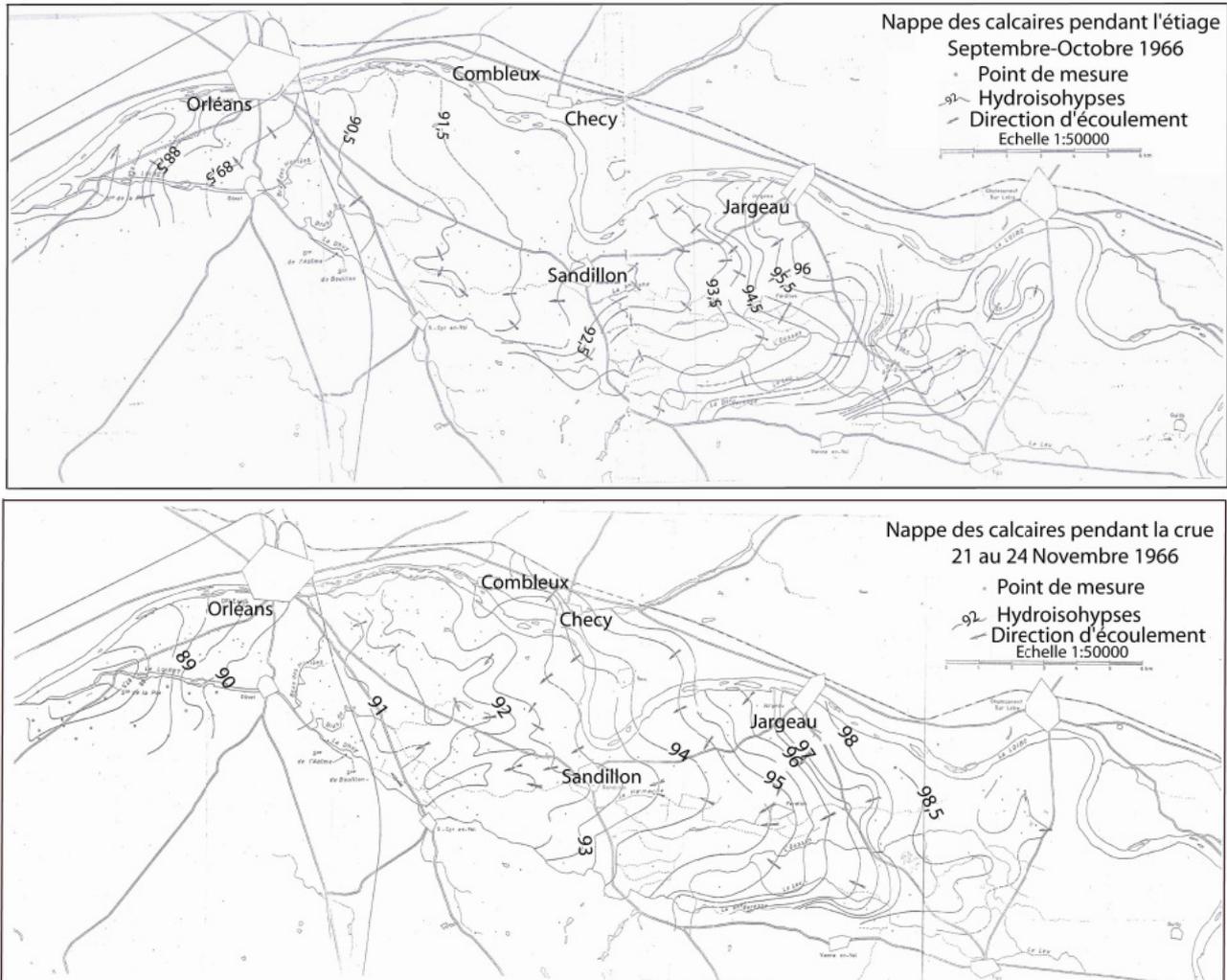


Fig.10 : Cartes piézométriques du Val d'Orléans (Deprez 1966) a) basses eaux, b) hautes eaux

2.6. Les essais de traçages

De nombreux essais de traçages ont été réalisés dans le système karstique du Val d'Orléans (Albinet et Brossier, 1973 ; Chéry et al., 1982 ; Chéry, 1983) pour confirmer les circulations des eaux de la Loire depuis les pertes jusqu'aux résurgences. En 1901, Marboutin démontrait définitivement le phénomène à la suite d'expériences d'injection de fluorescéine. De ces expériences, Marboutin déduisait la vitesse de circulation de l'eau dans les calcaires, de l'ordre de 130 à 190 m/h. Plus récemment, de nombreux essais ont été réalisés à Jargeau par le Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université d'Orléans, l'Institut des Sciences de la Terre d'Orléans et le BRGM.

date	Distance	T moyen (h)	v d(m/h)	Q Loire (m ³ /s)	Q Bouillon (L/s)	h Bouillon (m)	h Sandillon (m)	Δh/L
20/02/1998	13500	115	2.0	200	/	90.7	91.7	0.00015
20/04/2000	6810	46	2.5	30	250	90.3	92.4	0.00031
25/05/2001	13500	100	2.3	560	832	90.8	92.0	0.00018
16/11/2006	13500	107	2.1	99	400	90.7		
16/10/2007	13500	84.7	2.7	169	450	90.6	92.3	0.00025
13/10/2008	13500	86	2.6	153	458	90.5	92.2	0.00025
17/10/2009	13500	103	2.2	62	380	90.4	91.4	0.00015

Tableau 3 : Les principaux paramètres obtenus à la source du Bouillon par les essais de traçages comparés aux conditions hydrologiques au moment de l'expérience. (Données compilées d'après Le Borgne 2001, Lepiller 2006, Joodi 2009)

Les paramètres hydrodynamiques et de transport peuvent être estimés à l'aide des essais de traçages (Tableau 3). Les essais de traçages effectués à Jargeau sont utilisés pour étudier le système karstique du Val d'Orléans. Ces essais ont contribué à montrer la relation entre le point de perte et celui d'émergence du système. Les vitesses de transit mesurées entre la Loire et la source du Bouillon sont de l'ordre de 100 à 130 m/h, mais elles peuvent atteindre 200 m/h à l'aval du Bouillon (Caudron et Albinet, 1965 ; Zunino, 1979 ; Chéry, 1983 ; Le Borgne et al., 2005). De ces résultats, il apparaît que la perméabilité du conduit est très élevée. Le taux de restitution du traceur aux sources est fortement variable selon les conditions hydrologiques, la masse de traceur injectée et le débit. Le taux de restitution augmente à la source en condition de basses eaux, et avec l'augmentation de la masse injectée.

Les traçages réalisés ont mis en évidence une forte accélération du transit vers l'aval du système. Trois expériences ont été faites en période de hautes eaux (essais du 6/02/1973, 16/11/2006 et 14/11/2007). Une forte restitution du traceur a été remarquée à la source du Bouillon pour l'essai du 6/02/1973 par rapport aux essais du 16/11/2006 et 14/11/2007. Le tableau 4 présente les paramètres obtenus à la source du Bouillon par les essais de traçages réalisés à Jargeau.

Le système karstique du Val d'Orléans est très développé en raison de la circulation des eaux souterraines qui peut être rapide entre la zone de recharge sur la Loire et les exutoires du Loiret. La plupart des expériences de traçages artificiels réalisés dans ce karst indiquent des temps moyens de séjour inférieurs à 4 jours (Chéry et al., 1982 ; Chatelain et Livrozet, 1982 ; Livrozet, 1984 ; Chéry et Lepiller, 1986, Joodi, 2009). La forte connexion avec les pertes de la Loire, rend l'aquifère karstique extrêmement vulnérable à une pollution chronique ou accidentelle en surface. Dans le cas d'une utilisation de la ressource pour l'AEP (alimentation en eau potable), un système d'alerte de pollution a été installé en amont des zones de pertes sur la Loire et un dispositif permettant l'arrêt des pompages a été mis en place. Les autres solutions pour minimiser la vulnérabilité vis-à-vis d'une

pollution sont limitées dans cet aquifère karstique car les pertes de la Loire sont distribuées dans son lit à l'amont du val.

La forte proximité géochimique entre les eaux des sources du Loiret et les eaux de la Loire (Helsens, 1981 ; Lelong et Lepiller, 1981 ; Chéry, 1983 ; Albéric et Lepiller, 1998) rend l'aquifère karstique très vulnérable, car tout polluant injecté aux pertes transite rapidement jusqu'aux sources.

2.7. Les spécificités du système karstique du Val d'Orléans

Ce système est considéré comme un système binaire du à sa manière d'alimentation. La Loire contribue à plus de 80% à l'alimentation du système aquifère du Val d'Orléans. L'apport prévu de la Loire dans les pertes localisées proches de Jargeau varie de 15 à 20 m³/s.

Deux types d'écoulement existent dans ce système : un écoulement lent dans la matrice et un autre rapide dans les conduits. Le système d'écoulement dans cet aquifère karstique est compliqué par une combinaison et une interaction entre ces deux écoulements. L'étude de ces phénomènes est indispensable pour comprendre le transport de soluté dans l'aquifère. La plupart des pertes d'eau en surface rejoignent l'écoulement du conduit et traverse l'aquifère rapidement pour émerger aux sources du Loiret.

La quantité de données disponibles sur ce site autorise de tester la mise en place d'une modélisation hydrogéologique en milieu discontinu. Elles font de ce site, un site pilote à l'échelle nationale, pour comprendre les écoulements dans les milieux karstifiés.

2.8. Modélisations antérieures réalisées sur le système karstique du Val d'Orléans

Un modèle mathématique de simulation des écoulements souterrains a été établi par Zunino (1979) à partir de Châteauneuf-sur-Loire jusqu'à la confluence Loire - Loiret. Le système était considéré comme un aquifère unique à double couche (alluviale et calcaire de Beauce). L'approche double perméabilité – continue a été utilisée en employant la loi de Darcy dans la matrice et les conduits karstiques. L'équation différentielle partielle a été résolue par la méthode de différence finie. L'espace a été découpé en mailles de 635 m de côté. Pour résumer, les résultats obtenus par ce modèle ont montré que les valeurs de transmissivité hors conduits varient de 0,01 à 0,1 m²/s dans la partie aval où l'aquifère des calcaires est en contact direct avec les alluvions. Elles sont 10 à 100 fois plus faibles dans la partie amont où cet aquifère est captif.

Plus récemment, Martin et Noyer (2003) ont établi un modèle hydrodynamique des écoulements d'eau dans le système karstique du Val d'Orléans. Le modèle numérique a traité le système entre la Loire au nord, le Loiret, le Dhuy et les coteaux de Sologne au sud, soit environ 40 km de long sur une largeur moyenne de 6 km. Le code utilisé dans ce modèle est le progiciel MARTHE du BRGM, qui est un outil de modélisation aux différences finies, applicable aux milieux poreux équivalents. Les résultats indiquaient que la conductivité hydraulique varie de 5 à 200.10⁻⁴ m/s hors des conduits et 6 m/s dans les conduits.

En 2009, Ali Joodi soutenait une thèse sur la modélisation des écoulements autour d'un conduit karstique, calibré sur le Val d'Orléans. A l'aide du code de calcul Comsol et d'une approche discrète continue (utilisation d'une loi spécifique pour d'écrire les écoulements dans les conduits), ses travaux proposent une analyse en 2 dimensions du transport dans les conduits karstiques du Val qui constitue le point de départ des modélisations présentées ici.

3. Méthodologie

Ce rapport propose d'étudier la faisabilité d'une modélisation hydrogéologique 3D, incluant des conduits dans un système où les vitesses d'écoulement sont très variables. Un des facteurs clé de la réussite de ce projet consiste à définir les propriétés caractéristiques du réseau de conduits.

Les questions soulevées en introduction (contribution des unités périphériques, impact des pompages du Val sur les débits du Loiret, impact de la gestion des biefs sur les écoulements souterrains) concernent essentiellement les basses eaux. Le calcul présenté ici réalise un bilan hydrologique souterrain pour les basses eaux. La méthodologie adoptée met en place un modèle des écoulements souterrains en milieu saturé, cherchant à reproduire à l'état stationnaire les écoulements en basses eaux circulant soit dans les conduits karstiques, soit dans la matrice poreuse (calcaire et alluvions) qui l'entoure.

Le logiciel choisi est Feflow[®]. C'est un logiciel aux éléments finis développé par les universités suisses et allemandes (<http://www.feflow.info/>). Il permet de discrétiser des conduits karstiques dans une matrice poreuse afin de prendre en compte la grande variabilité des vitesses observées sur ce site. L'utilisation d'une loi de Manning Strickler pour décrire les écoulements dans le réseau de conduit permet de prendre en compte les pertes de charges non linéaires des écoulements dans les conduits. Les conduits modélisés sont immergés dans une matrice poreuse, dont les écoulements sont décrits par la Loi de Darcy. Une telle configuration permet de prendre en compte les mélanges d'eau possibles entre conduits et matrice (Diersch, H.J.G.,2009).

Vu la rareté dans la littérature des modèles existant sur de tels contextes karstiques, la méthode choisie consiste à mettre en place le modèle le plus simple possible. Ce premier modèle permet de reproduire les vitesses d'écoulements et le bilan hydrogéologique entre Loire et Loiret. Puis étape par étape, ce modèle va être complexifié afin d'arriver aux objectifs du projet : modéliser la carte piézométrique en basses eaux grâce à un réseau de conduits. Tous les calculs sont réalisés à l'équilibre pour des écoulements saturés.

Le travail se décompose en trois parties : la réalisation d'un modèle géologique 3D du site, la calibration d'un modèle hydrogéologique discontinu simplifié et la combinaison de ces deux approches pour évaluer la validité d'un modèle hydrogéologique 3D dans un milieu discontinu. Pour les lecteurs experts, ces chapitres font l'objet de publications scientifiques (Binet et al. 2010 ; Auterives et al. 2011) qui contiennent la totalité des choix techniques réalisés. Pour faciliter la lecture de ce rapport, toute la démarche entreprise n'est pas discutée ici.

3.1. Réalisation d'un modèle géologique 3D

Les données géologiques qui ont servi à construire le modèle géométrique en 3D du Val d'Orléans sont extraites de la BSS du BRGM via le site Infoterre (<http://infoterre.brgm.fr/>).

Les épaisseurs d'alluvions, des argiles, de marnes ainsi que celle des calcaires sont déduites des descriptions de forages disponibles. Cette synthèse de données présente des regroupements de type lithologique (et non stratigraphique). L'objectif est de regrouper les faciès en familles de perméabilités et de s'affranchir des possibles confusions ou erreurs d'interprétation des âges géologiques par le foreur.

L'analyse des vides dans les données de forages BSS permet de discuter de la position des zones de localisation des conduits karstiques. Croisées avec les données de traçage, ce travail nous donne la possibilité de proposer une carte des zones à forte probabilité de présence d'un conduit. La méthodologie scientifique est détaillée dans un numéro spécial de « Advances in Karst research » (Binet et al. 2010).

L'ensemble de cette analyse synthétise les informations sur notre connaissance actuelle de la géométrie du système.

Le passage des données de forages aux cartes est réalisé par la méthode de krigeage. Les coupes géologiques n'étant pas toujours cohérentes, l'interprétation géologique de nombreux forages a été revue. Les épaisseurs de chaque niveau ont été interpolées par une méthode de géostatistique (calcul de variogramme, ajustement d'un modèle sur le variogramme, validation croisée des données et interpolation sur le domaine d'étude par krigeage). Plusieurs points « fictifs » ont été ajoutés pour délimiter les couches qui ne couvrent pas toute la surface de la zone modélisée. Les points pour une distance inférieure à 50 m sont fusionnés par moyenne. Le maillage final est carré, de 250m de côté.

3.2. Réalisation et calibration d'un modèle hydrogéologique simplifié (modèle conceptuel)

Le premier travail présenté ici consiste à évaluer les grandeurs caractéristiques du système en utilisant un modèle hydrogéologique en deux dimensions de forme rectangulaire, composé d'une matrice calcaire et d'un seul conduit, aux dimensions moyennes du Val d'Orléans. Il permet d'estimer les propriétés principales du système comme le diamètre moyen des conduits, la perméabilité des matériaux, le coefficient de frottement des drains, la valeur des conditions aux limites.

Ces valeurs seront argumentées en comparant les résultats du modèle avec les données observées sur le terrain. Les données de traçages réalisées dans des contextes hydrologiques bien définies

(tableau 4) permettent de caler le modèle pour différentes conditions hydrologiques. Les valeurs de conductivité hydraulique proviennent de Martin 2003.

3.3. Réalisation d'un modèle 3D spatialisé, intégrant les résultats des deux précédentes étapes.

A partir des grandeurs définies précédemment et du modèle géologique, un modèle 3D des écoulements dans le système est mis en place. Sa validité sera discutée en le comparant à la carte piézométrique en basses eaux de Deprez 1966. C'est à partir de ce modèle que seront estimées les différentes contributions des unités avoisinantes ainsi que l'effet du pompage sur les débits du Loiret. Grâce à la différenciation entre les différentes couches, cette configuration de modèle permet d'estimer des flux verticaux entre les calcaires et la rivière du Loiret.

Les hauteurs d'eau de la Loire proviennent du suivi de la DREAL Centre et des profils de lignes d'eau réalisé depuis 1970. La relation entre hauteur de Loire et hauteur d'eau dans l'aquifère a été estimée à partir des données de Le Borgne 2001 et de Deprez 1966. La recharge a été calculée par Emmanuelle Joigneaux (2011). Les données de pompages sont des valeurs moyennes à l'étiage fournies par la DREAL pour les prélèvements AEP et la chambre d'agriculture pour l'irrigation. Elles sont disponibles pour les années 1998-2007.

Les prélèvements AEP sont individualisées dans le modèle, pompage par pompage. Seuls six pompages AEP sont inclus dans la zone modélisée. Les forages d'Olivet et de la Saussaye sont extérieurs à la zone étudiée ou trop profonds. Leur effet est indirectement pris en compte via le choix des conditions aux limites définies à proximité. Les inclure nécessiterait d'agrandir la zone géographique du modèle sous la Sologne.

Pour des raisons de temps de calcul, les prélèvements pour l'irrigation sont distribués uniformément sur la couche des calcaires.

A l'étiage, la somme des prélèvements dans les calcaires est de $37\,260\text{ m}^3/\text{jour}$. La surface du bassin versant est de 330 km^2 , soit un prélèvement dans les calcaires l'ordre de $-0.12\text{ mm}/\text{jour}$. De la même façon les quantités prélevées à l'étiage dans les alluvions sont de $3300\text{ m}^3/\text{jour}$, ou rapporté à un mètre carré $-0.01\text{ mm}/\text{j}$. La recharge dans les alluvions est évaluée à $3.1\text{ mm}/\text{an}$ (Joigneaux, 2011 ; Gutierrez et Binet 2012).

Les détails techniques de la construction du modèle spatialisé peuvent être retrouvés dans l'article des actes du colloque d'hydrologie en pays calcaire: H2karst (Auterives et al. 2011).

4. Résultats :

4.1. Géologie du Val d'Orléans et réseau karstique

Plus de 4500 forages ont été extraits de la BSS du BRGM pour une réinterprétation des lithologies. La succession stratigraphique totale dans le val contient les alluvions, le Burdigalien, le Pithiviers, la molasse puis le calcaire d'Etampes (Fig. 2). Mais les 5 niveaux stratigraphiques ne sont pas présents partout. Le modèle développe donc 5 couches d'extension variable au travers du Val d'Orléans.

2037 forages renseignent sur la géologie (Fig. 11) et sont situés dans la zone du modèle. Ces forages seront utilisés pour la construction de la géométrie 3D du Val d'Orléans.

La Figure 12 synthétise les résultats des interpolations de couches. Les alluvions présentent une épaisseur qui varie de 0,2 à 26 m.

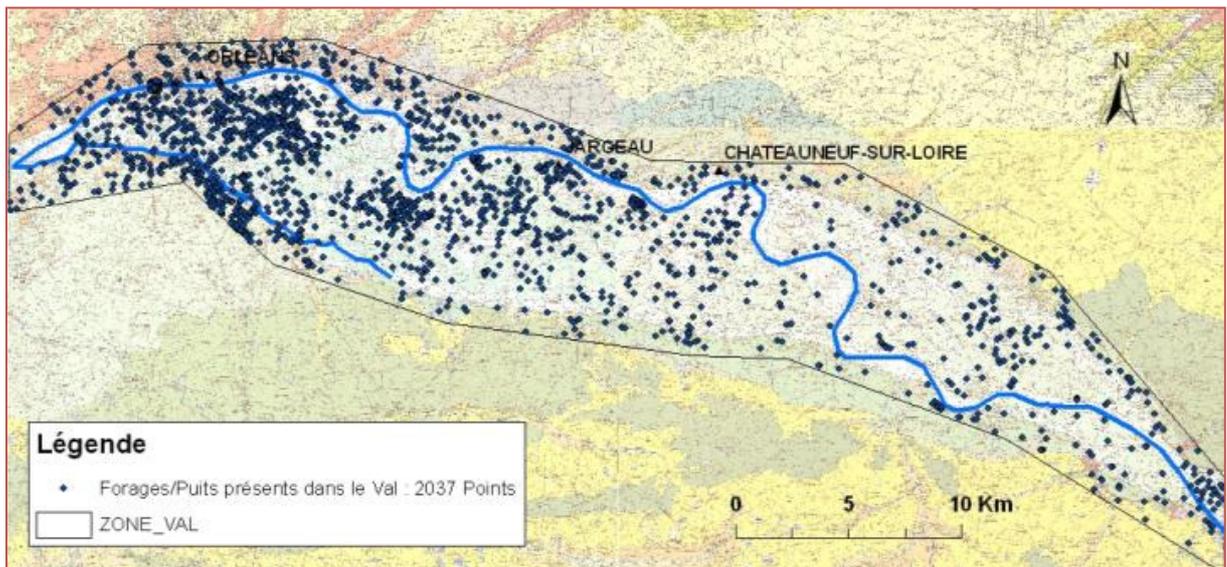


Fig.11 : Localisation des forages exploités pour réaliser le modèle géologique du Val. 2037 forages/puits présents dans la zone d'étude

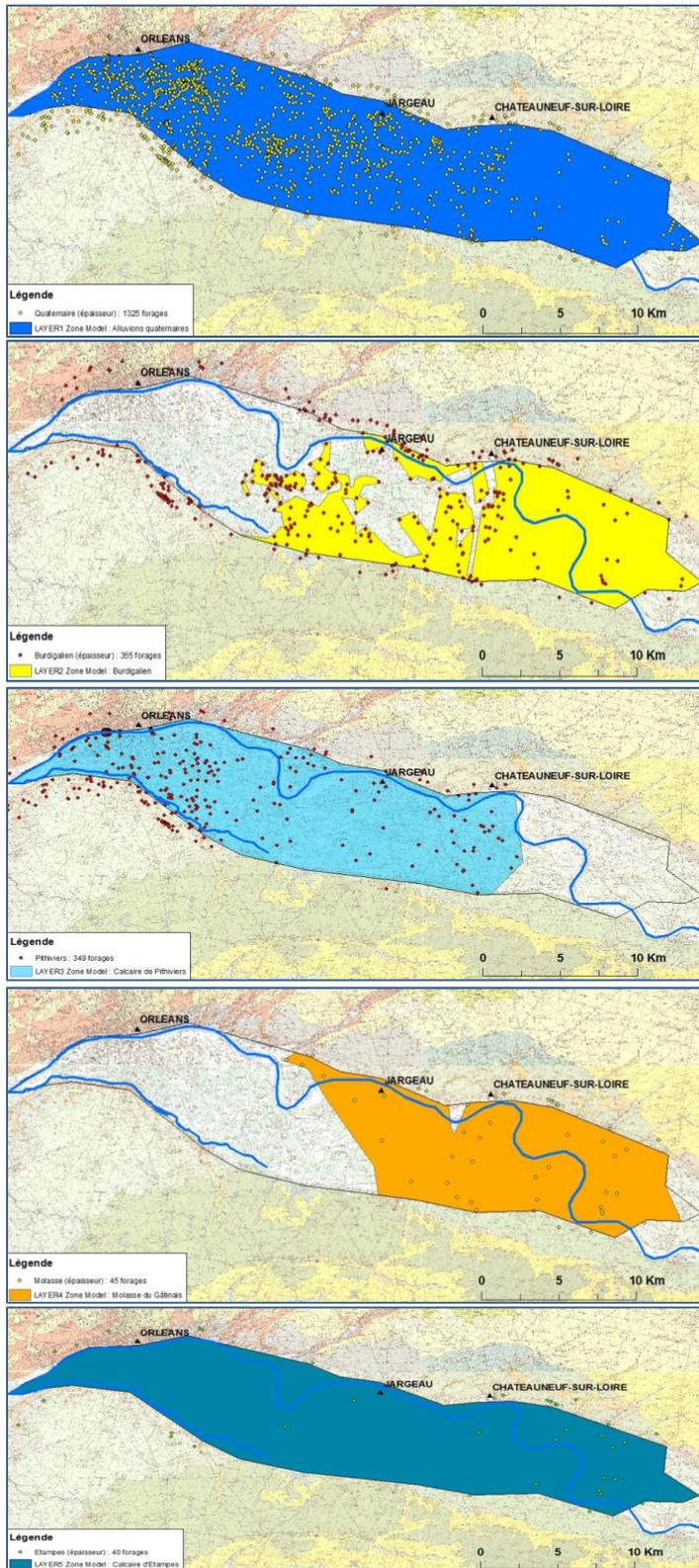


Fig. 12 : Points d'observations et spatialisation des différentes couches géologiques sur le Val d'Orléans, représentation du haut vers le bas, du plus vieux au plus jeune.

1325 forages traversent les alluvions quaternaires pour une épaisseur moyenne de 7 mètres, s'étalant de 0 à 26 mètres.

355 forages traversent la couverture burdigalienne. La limite entre la formation de Sologne, les Marnes et Sables de l'Orléanais et les Marnes et Calcaires de l'Orléanais est difficile à identifier. Ces niveaux aux propriétés hydrauliques similaires ont été regroupés au sein d'un même horizon peu perméable nommé couverture burdigalienne. Les lentilles de Burdigalien au niveau de Jargeau sont argumentées par la présence, mais aussi l'absence de niveau imperméable de certains forages. L'épaisseur de la couverture burdigalienne varie de 0,6 à 51,2 m d'ouest en est.

349 forages traversent les Calcaires de Pithiviers pour une épaisseur allant jusqu'à 24 mètres.

45 forages traversent la Molasse du Gâtinais. Son épaisseur est très variable (de 0 à 23m). Elle disparaît en allant vers l'est.

Les Calcaires d'Etampes sont présents sur l'ensemble de la zone étudiée. 40 forages les traversent. Vers l'est, les calcaires d'Etampes s'estompent puis disparaissent (limite est), alors qu'ils se prolongent nettement plus loin que la zone d'étude au sud (Calcaire captif de Sologne) et qu'ils atteignent 60 mètres sous Orléans, au nord (Calcaire de Beauce s.s.) du modèle.

L'ensemble de ces observations (position et épaisseur des couches) permet de construire le modèle géologique en 3D présentés en Figure 13.

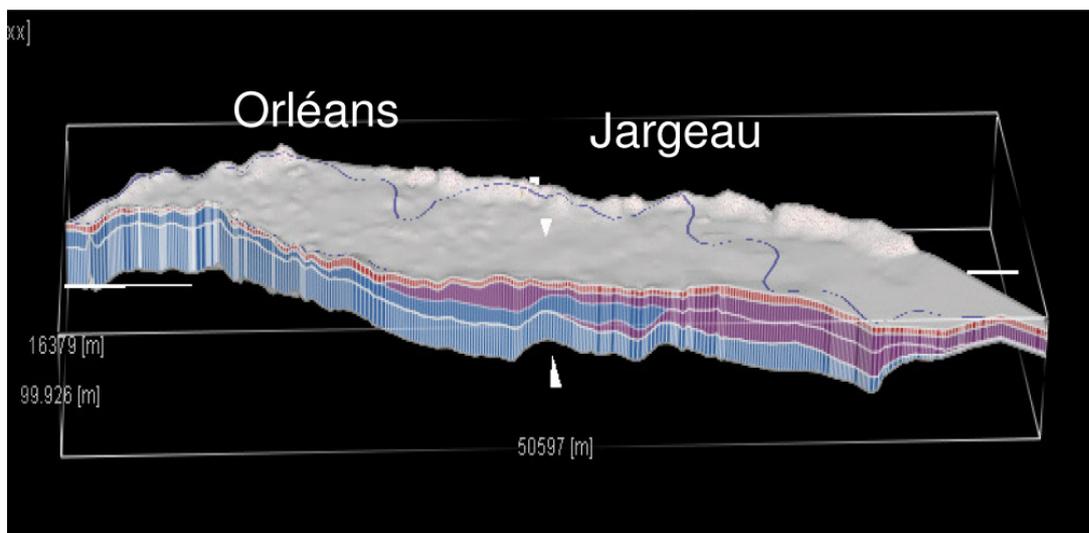


Fig.13 : Représentation 3D de la géologie du Val. Rouge= Alluvions, Bleu= Calcaire, violet = Marnes

A partir de la même base de données, les vides décrits dans les logs de forages ont été considérés comme des endroits où le forage traverse un conduit karstique ou une zone très perméable proche d'un conduit, souvent décrite par les foreurs comme une zone fracturée, où la réponse du niveau piézométrique au pompage d'essai est très faible. La figure 14 présente les vides de plus de 2 mètres. Ils sont comparés aux effondrements connus en surface et au trajet probable des traceurs entre la Loire et le Loiret. Leur distribution ne montre pas une organisation claire. On retrouve cependant l'axe Jargeau-Bouillon ainsi que des effondrements sur le trajet Sandillon-Loiret. Le système de l'île Charlemagne est bien identifié. Un maximum de points d'observation peut être relié en réalisant un conduit principal est ouest, sur lequel viennent se connecter des conduits NE-SO, partant de la rive droite de la Loire jusqu'au Loiret (Fig.14). Les données suggèrent un axe de drainage allant de Saint Jean le Blanc vers les Béchets.

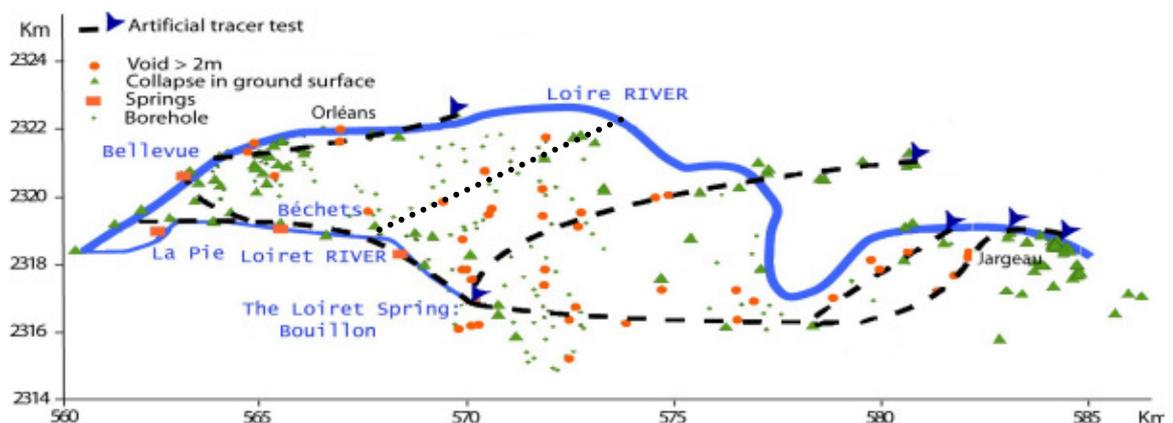


Fig.14 : Carte des vides et effondrements recensés dans le Val d'Orléans. Les traits tiretés représentent les connections démontrées par traçage artificiel. Les ronds noirs, un conduit suggéré par les données mais méconnu des traçages.

Le traitement statistique de ces observations suggère des conduits localisés à une profondeur d'environ 80 mètres, présentant une épaisseur de 3.5 mètres en moyenne (Fig. 15).

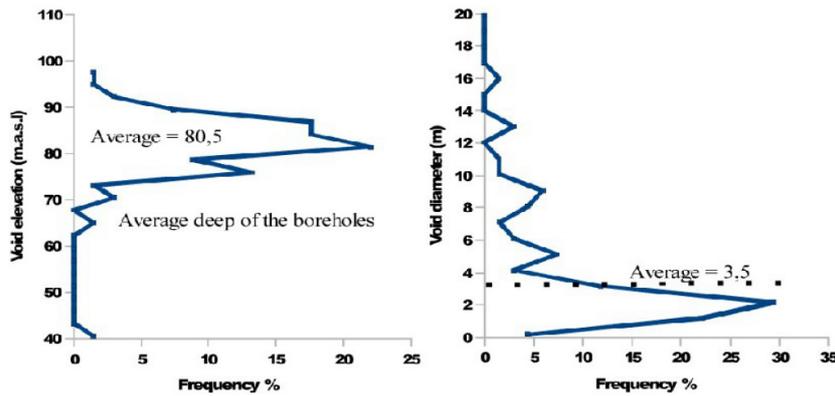


Fig. 15 : Représentation statistique des vides observés dans les forages du val d'Orléans. Le diamètre vertical moyen est de 3.5 mètres, l'altitude moyenne du réseau est de 80,5 mètres

A partir de ce traitement, le réseau karstique utilisé pour la modélisation hydraulique est composé d'un conduit principal et de quatre conduits latéraux. La valeur moyenne de 3.5 m sera appliquée en conduit en tout point du système. Même si les observations de plongées constatent l'existence de salles beaucoup plus grandes, le rayon hydraulique est particulièrement contrôlé par les zones de restriction qui limite les débits et doit plus probablement s'approcher d'une section minimum et pas moyenne ou maximum. Le réseau est volontairement simplifié car la connaissance de sa structure réelle est illusoire (Fig.16)

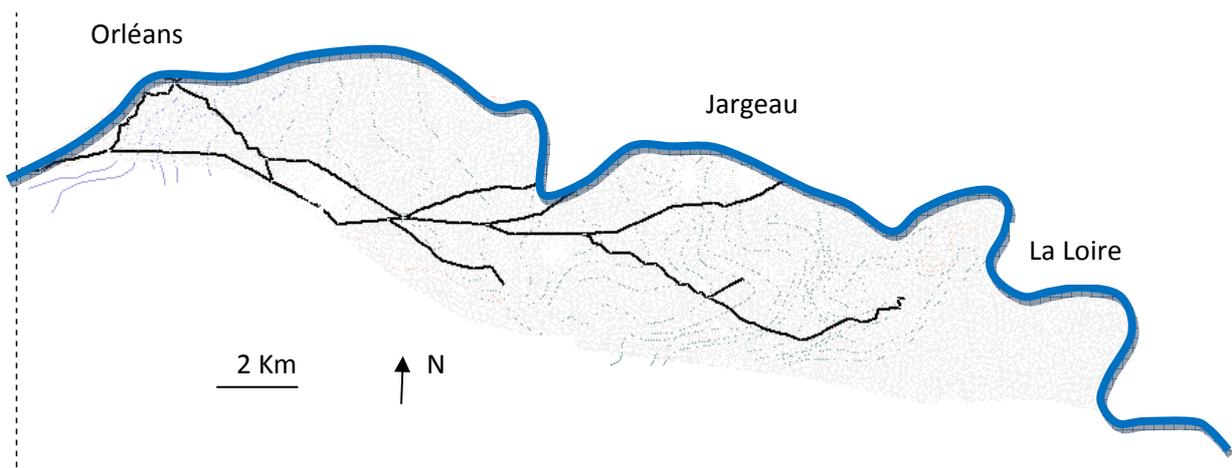


Fig.16 : Carte du réseau karstique retenu pour la modélisation.

4.2. Modèle conceptuel des écoulements et calibration.

Afin de définir les ordres de grandeurs des propriétés du système, un premier modèle conceptuel a été réalisé. Il réduit le Val d'Orléans à un aquifère poreux libre de conductivité hydraulique $2.5 \cdot 10^{-3}$ m/s (qui englobe alluvions et calcaires en accord avec Martin, 2003) traversé par un conduit rectiligne allant de la Loire au Loiret (Fig.17).

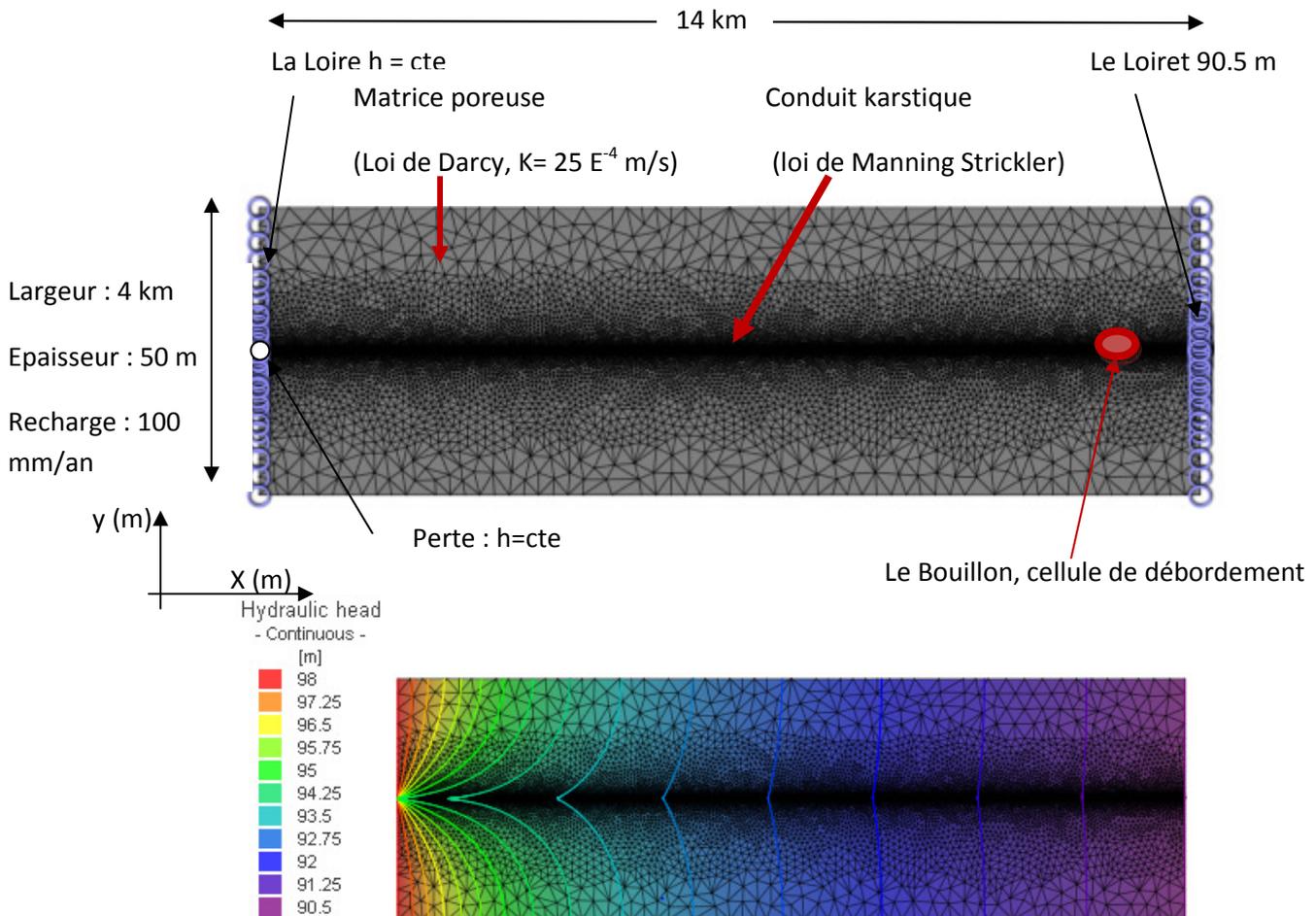


Fig.17 : Modèle conceptuel des écoulements en nappe saturée libre entre Loire et Loiret réalisé pour identifier les paramètres du modèle hydrogéologique A) maillage, conditions aux limites et paramètres fixe du modèle. Les valeurs de x et de y sont exprimés en Lambert 2 étendues. b) exemple de piézométrie calculée.

La Loire est considérée comme une charge constante à l'amont, et le Loiret une charge constante aval à 90.5 mètres. Le Bouillon est une cellule de débordement fixée à 90.3 mètres située à 1 km du premier bassin du Loiret. Les dimensions du modèle proviennent

des moyennes estimées précédemment : largeur du Val d'environ 4 km; distance entre la Loire à Jargeau et les bassins du Loiret 14 km, et une épaisseur de l'aquifère de 50 mètres.

Pour représenter les pertes de Loire, la charge hydraulique à l'entrée du conduit peut être variable et sera adaptée pour optimiser la solution.

Le coefficient de frottement dans les conduits:

Si l'on augmente la charge dans le conduit, le gradient hydraulique et la vitesse des écoulements augmentent. D'après la Loi de Manning Strickler, il existe une relation linéaire entre la vitesse et la racine carrée du gradient. La figure 18 compare des résultats expérimentaux obtenus sur le Val pendant les expériences de traçage aux courbes théoriques du modèle. La loi de Manning-Strickler apparaît un choix approprié pour décrire les écoulements dans le conduit si l'on choisi un coefficient de frottement de $15 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$.

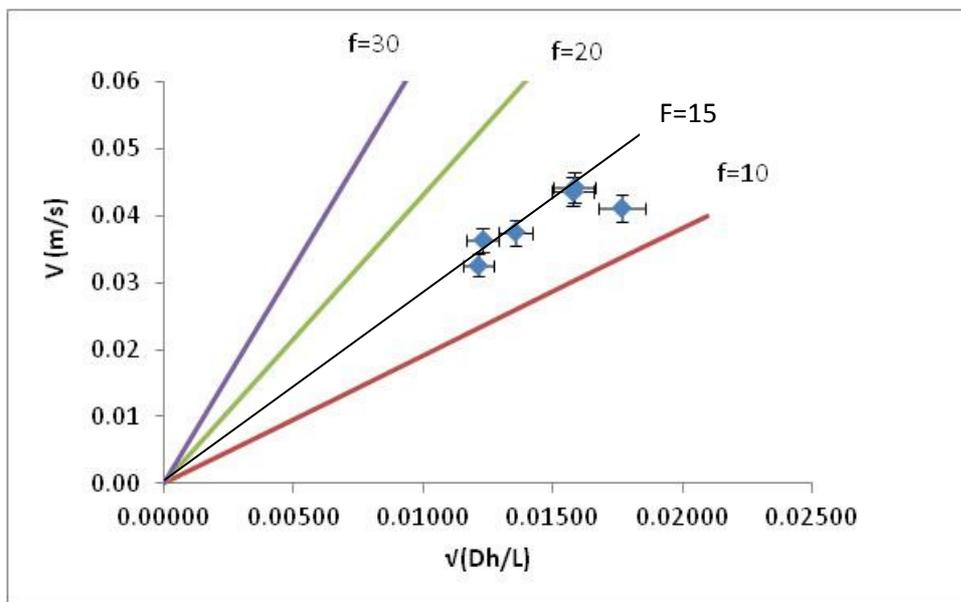


Fig.18 : Relation entre les vitesses d'écoulements et la racine du gradient hydraulique (Loi de Manning Strickler). En bleu, les données de terrain. Les lignes continues sont des résultats du modèle pour différents coefficients de frottement.

Section des conduits karstiques :

Une fois le coefficient de frottement défini, la vitesse dans le conduit est fixée. Pour satisfaire le bilan hydrologique (débit qui traverse le système), nous pouvons estimer la surface du conduit permettant de laisser passer $11.5 \text{ m}^3/\text{s}$ (données du bilan hydrique). La

figure 19 montre les débits qui traversent le modèle pour différentes sections de conduit et différents coefficients de frottement. En utilisant ce graphique et la valeur du coefficient de frottement défini précédemment, nous pouvons estimer une section totale des conduits dans le Val de l'ordre de 40 m². Les traçages (Joodi et al. 2009) suggèrent plutôt des sections de l'ordre de 10 m². Les observations spéléologiques (communication personnel de P. Boismoreau) sont de l'ordre de 20 m². On peut donc supposer que le Val d'Orléans n'est pas composé d'un seul conduit mais de 3 ou 4 conduits parallèles de sections plus petites dont la somme s'approcherait de 40 m². Cette remarque permet d'accorder les résultats de la modélisation (Fig.19) aux données du terrain (Fig. 16B)

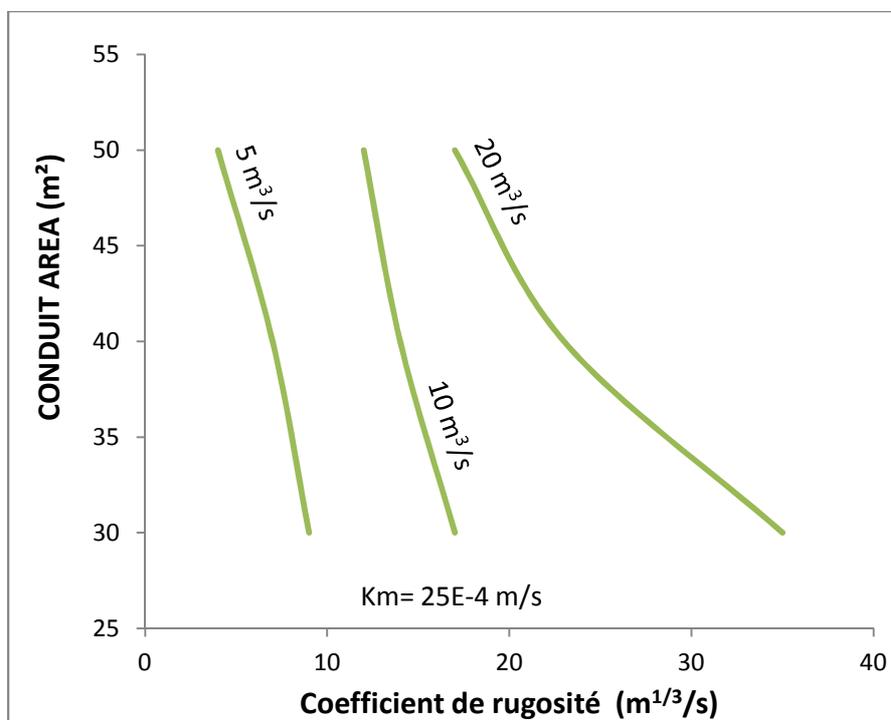


Fig. 19 : Relation entre le coefficient de frottement et la surface total des conduits karstiques. La conductivité hydraulique de la matrice est fixée à 25 10⁻⁴ m/s. Les lignes continues représentent les résultats du modèle pour différents débits de sorties. On estime à 10 m³/s les écoulements dans le Val, soit un coefficient de frottement entre 15 et 20 m^{1/3}/s

Pertes de charges :

Nous pouvons maintenant modifier la condition aux limites amont afin de reproduire au mieux les mesures piézométriques réalisées en 1966 par Deprez. En choisissant une hauteur d'eau sous la Loire (conditions aux limites amont) de 97 mètres dans la matrice et de 92.5

mètres dans le conduit, le profil piézométrique suivant un axe est ouest peut-être calculé et comparé aux données du Val (Fig. 20).

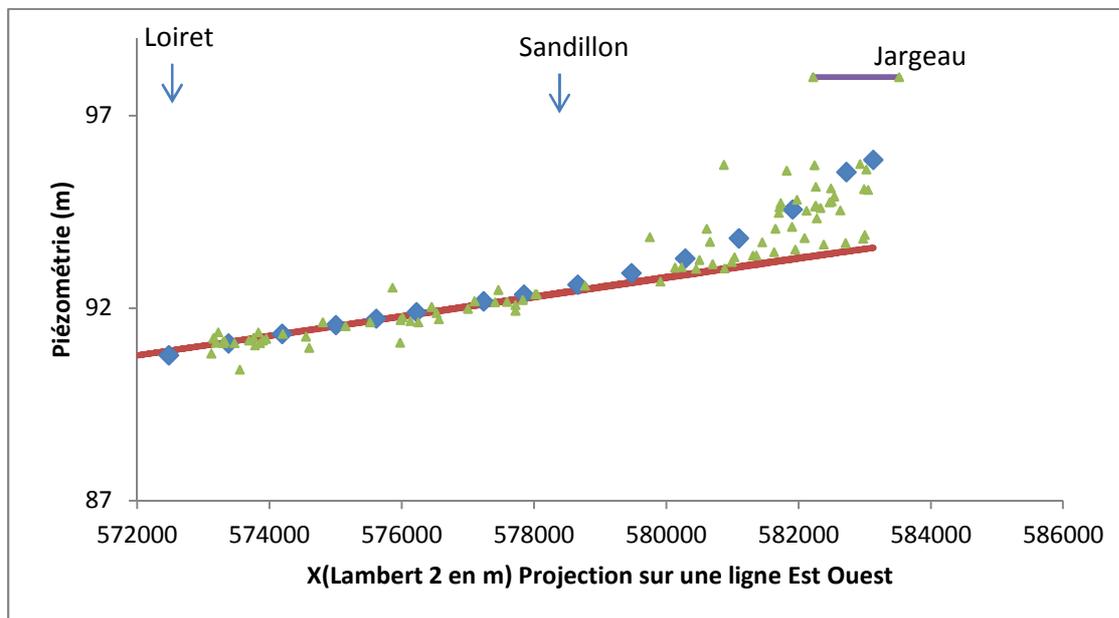


Fig. 20 : Comparaison entre la piézométrie mesurée et la piézométrie calculée projetées sur un axe est-ouest. Les points verts (Deprez 1966) sont des projections de toutes les valeurs mesurées entre Jargeau et le Loiret ($x = 57200$ et $x = 58500$) sur un axe est-ouest. Les points bleus sont le résultat du modèle pour $y = 4000\text{m}$ dans la matrice calcaire. La ligne rouge représente le conduit karstique ($y=0$).

Les pertes de charges calculées dans le conduit (ligne rouge) et dans la matrice (points bleus) couvrent bien l'ensemble de la variabilité des points mesurés (points verts). Ce profil met en évidence le rôle fondamental du choix des conditions aux limites, car il permet de reproduire la piézométrie dans les conduits par rapport à la matrice, et donc par extension, les mélanges d'eau possibles entre ces deux compartiments. On constate (Fig. 17 et 20) qu'en basses eaux, la Loire ne semble pas recharger l'aquifère via le réseau karstique. Même si des quantités d'eau importantes s'infiltrèrent dans les pertes, elles traversent le système uniquement grâce au conduit. Le conduit draine la matrice en partie amont du système (piézométrie supérieure dans la matrice) ce qui provoque une dilution des eaux de Loire et explique la dispersion des points de mesures. A l'aval, les deux compartiments semblent à l'équilibre, la surface piézométrique semble plus régulière, et les deux systèmes évoluent indépendamment.

4.3. Modèle hydrogéologique 3D du Val d'Orléans

Spatialiser le modèle conceptuel hydrogéologique du Val consiste à produire une géométrie la plus exacte possible en s'appuyant sur le modèle géologie 3D. Cette étape permet de prendre en compte l'effet de perturbation locale comme un pompage sur les écoulements dans le Val. La géométrie du modèle est présentée en figure 21. Elle correspond à la rive gauche de la Loire.

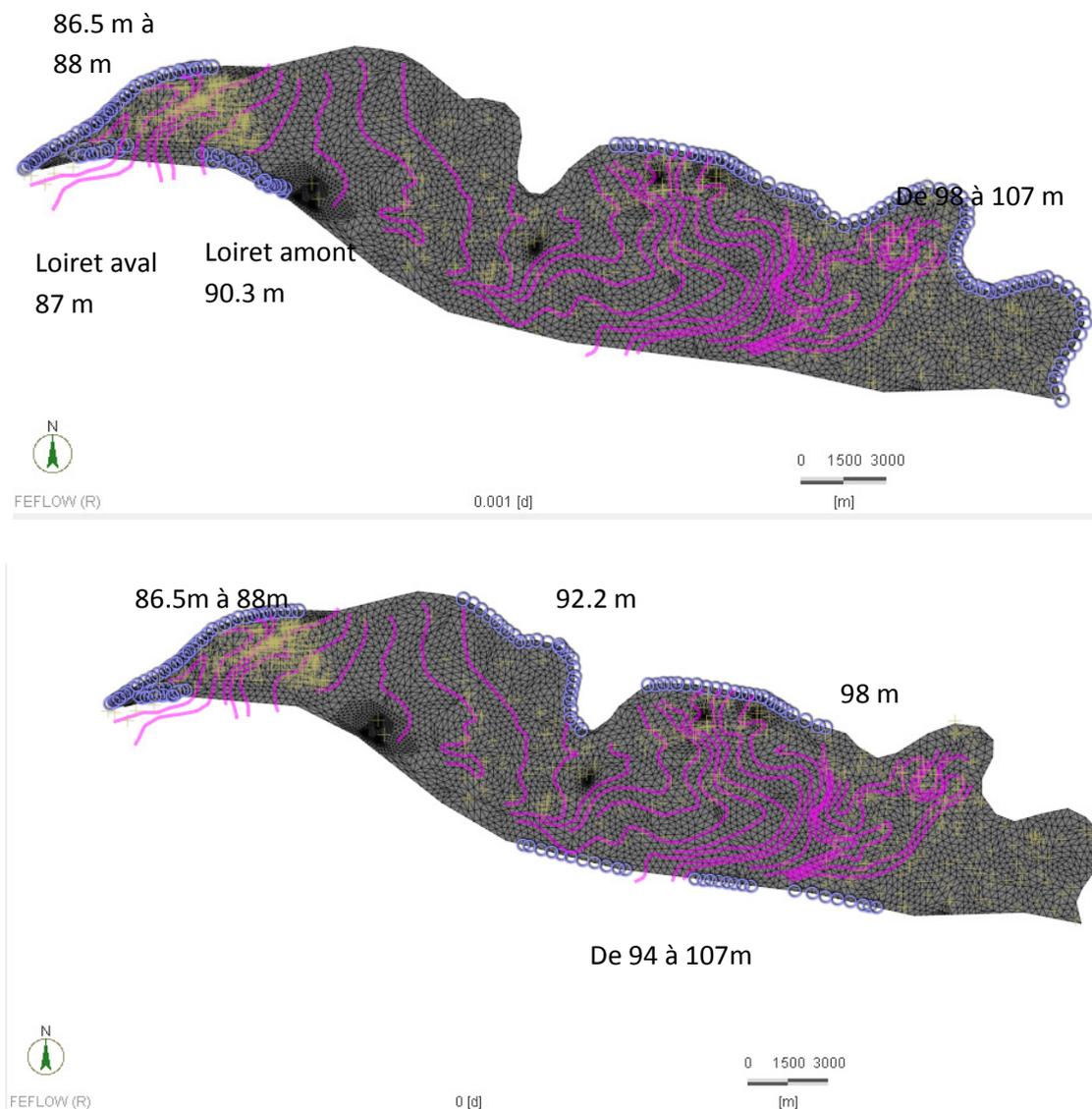


Fig. 21 : Spatialisation du modèle hydrogéologique. Maillage (gris) conditions aux limites de charges constantes (cercles bleus) pour la couche des alluvions en haut et des calcaires en bas.

Les cercles bleus représentent les conditions aux limites (zones où l'eau peut entrer ou sortir du modèle). Dans ces zones, la hauteur d'eau est fixée pour tout le calcul, l'eau qui s'écoule étant soit compensée par l'eau de surface (vers la Loire), soit par apport d'un autre aquifère (Sologne). Les résultats du modèle sont présentés sur la figure 22. Cette figure compare la piézométrie mesurée (ligne violette) et la piézométrie calculée. L'écart entre le modèle et les mesures est de l'ordre de 50 cm, ce qui est acceptable au regard des possibles erreurs qui peuvent exister sur la carte piézométrique elle-même. C'est donc à partir de cette configuration que nous allons étudier les facteurs qui contrôlent les débits d'eau souterraine arrivant au Loiret.

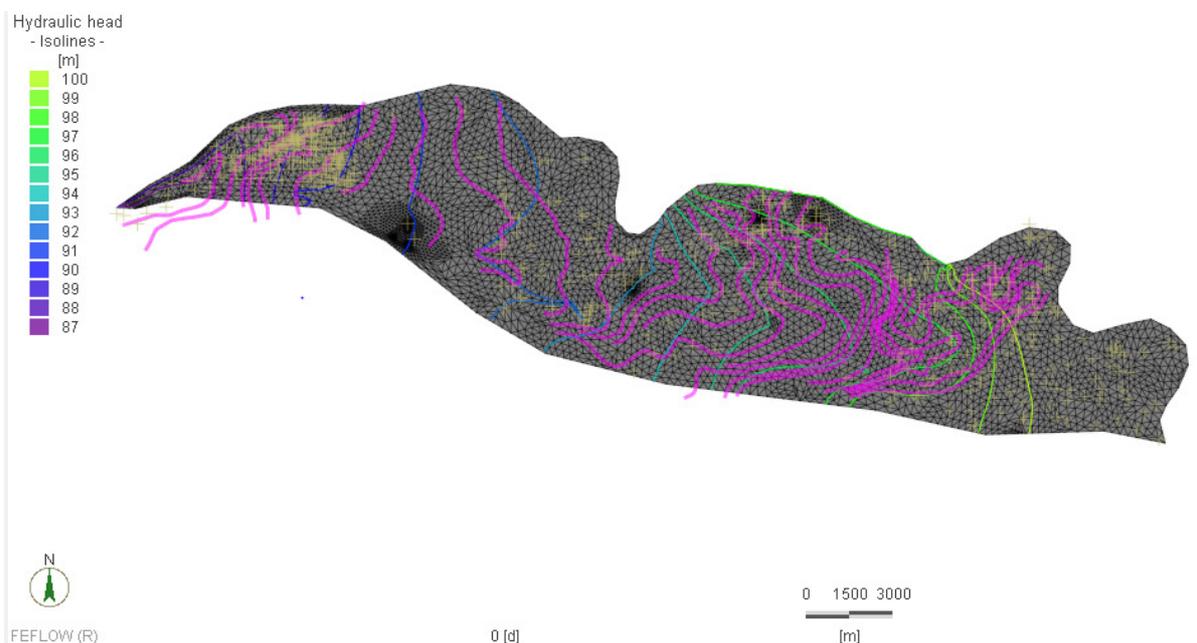
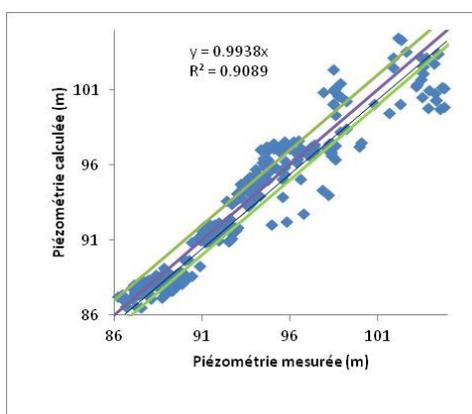


Fig.22 : Comparaison entre la piézométrie mesurée et la piézométrie calculée, a)



représentation cartographique, les isopièzes violettes sont mesurées, celles avec le dégradé de couleur sont calculées. Les croix blanches sont des forages d'observation. b) Comparaison entre les forages d'observation et le calcul. Coefficient de corrélation et pente entre les données calculées et mesurées.

5. Discussion

Le modèle calcule des débits d'eau souterraine qui alimentent la rivière du Loiret dans le bassin amont en fonction des conditions hydrologiques de la Loire, de la météo locale et de la charge hydraulique dans les aquifères adjacents. Il permet de discuter l'origine de l'eau souterraine qui aboutit au Loiret en réalisant des bilans hydriques aux entrées et sorties du système.

5.1. Bilan des apports latéraux (Sologne, Beauce, forêt d'Orléans) au soutien d'étiage du Loiret.

En acceptant les hypothèses présentées ci-dessus, $8.4 \text{ m}^3/\text{s}$ traverse l'aquifère, ce qui correspond à un étiage important. Sur ce flux, $7 \text{ m}^3/\text{s}$ proviennent des pertes de la Loire et $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$ de la Beauce et de la Sologne. En sortie du système, $3.7 \text{ m}^3/\text{s}$ arrivent du milieu souterrain vers le Loiret et $4.7 \text{ m}^3/\text{s}$ retourneraient directement à la Loire via les sources de la Chapelle Saint Mesmin ou directement dans les alluvions (Tableau 4).

Bilan des différentes contributions aux débits du Loiret à l'étiage	(m^3/s)	(%)
Débit circulant dans le secteur du Loiret (souterrain)	8.4	100
dont venant de la Loire	7.2	86
venant de la Beauce	1.0	12
venant de la Sologne	0.2	2
venant de l'infiltration	0.7	8
Contribution souterraine au Loiret	3.0	
Contribution souterraine à la Loire	5.4	

Tableau 4: Termes du bilan aux conditions aux limites du système

Ces résultats sont du même ordre de grandeur de ceux déjà avancés par les observations de terrain (Gutierrez et Binet 2010)

5.2. Impact de l'enfoncement de la Loire sur le soutien d'étiage du Loiret

La seconde question étudiée ici consiste à simuler l'impact d'une variation du niveau de la Loire sur les débits souterrains qui alimentent le Loiret. La figure 23 montre l'impact qu'aurait l'enfoncement d'un mètre du lit de la Loire vers Orléans sur les débits d'eau souterraine débordant dans le Loiret.

La quantité d'eau qui traverse l'aquifère est contrôlée par l'amont. La modification de la hauteur d'eau en Loire aval n'impacte pas les débits globaux qui traversent l'aquifère. Cependant la baisse de charge en Loire limite les débordements dans le Loiret. Une variation de 1 mètre entraîne dans le modèle une diminution de l'ordre de $2 \text{ m}^3/\text{s}$ de l'eau qui arrive via le karst vers le Loiret soit 50%. L'importance de ce chiffre en pourcentage du flux total, montrent que les diminutions de débits du Loiret peuvent être liées en grande partie aux variations du niveau de la Loire en basses eaux.

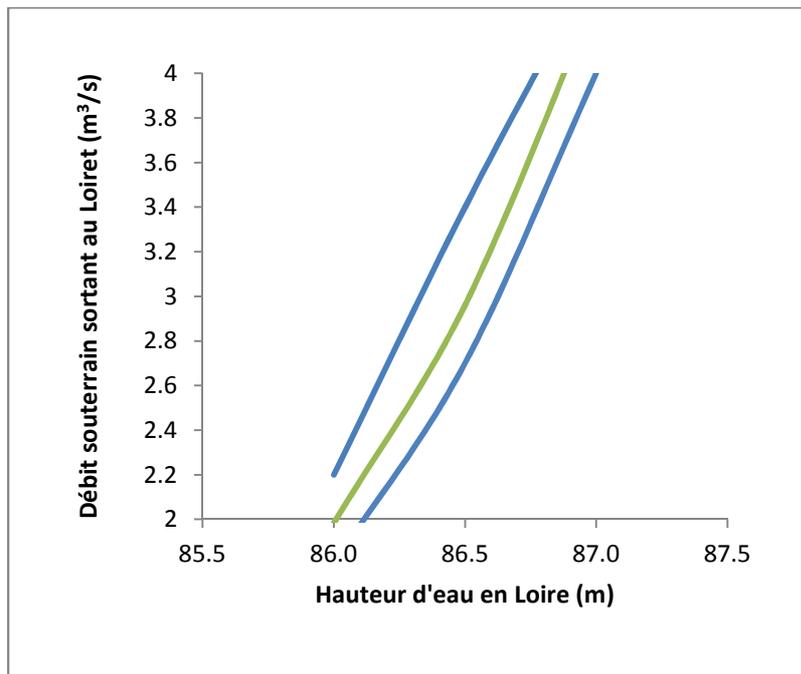


Fig. 23 : Relation entre les volumes d'eau souterraine qui alimentent le Loiret et la hauteur d'eau en Loire (en vert). Les lignes bleues représentent l'incertitude du modèle.

5.3. Effet du pompage A.E.P. du Val sur le soutien d'étiage du Loiret

Ce chapitre présente la sensibilité du modèle aux pompages du Val. En fixant tous les paramètres du modèle constants, sauf la valeur des débits pompés qui augmentent progressivement de 0 à 1 m³/s par seconde (valeur maximale autorisée), il est possible de discuter de l'effet des pompages sur les débits d'exhaure dans le Loiret. Faire varier de façon théorique les débits pompés ne modifie pas fortement la piézométrie autour des puits, celle-ci étant contrôlée par les conduits karstiques très présents dans cette zone. La Figure 24 présente les débits souterrains participant aux écoulements du Loiret en fonction des différents débits de pompages. On remarque que les pompages diminuent les quantités d'eau qui débordent vers le Loiret de surface. De façon générale, 30% de l'eau pompée est soustraite au Loiret de surface et 70% aux eaux souterraines. Au maximum les pompages du Val semblent diminuer les débits de débordement vers le Loiret de 10%.

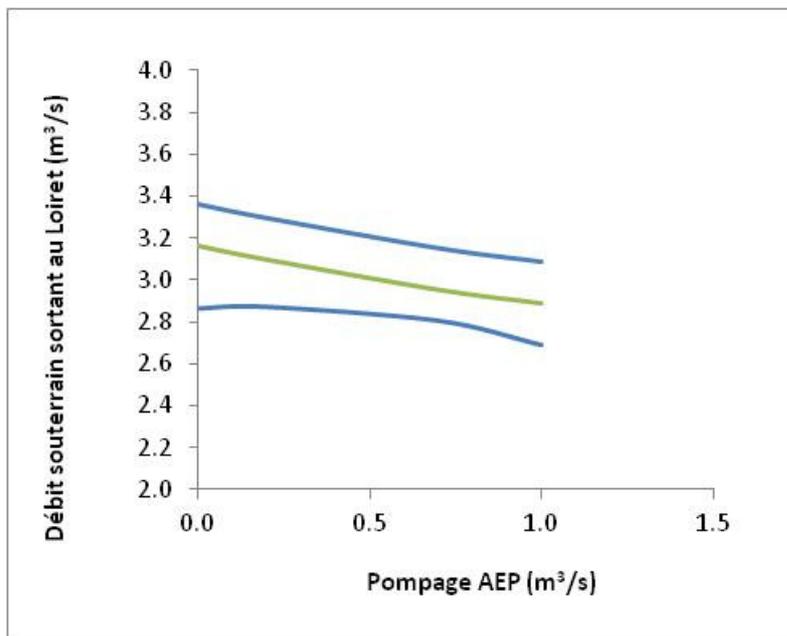


Fig. 24 : Débits d'eau souterraine qui alimente le Loiret à l'étiage en fonction des débits de prélèvements aux captages du Val (en vert). Les lignes bleues représentent l'incertitude du modèle.

5.4. Impact de la gestion des biefs (ouverture fermeture des écluses) sur le soutien d'étiage du Loiret.

Il apparaît clairement dans les discussions précédentes que les hauteurs d'eau dans le bief amont sont fortement liées au système souterrain. Une petite variation du niveau dans ce plan d'eau peut inverser les écoulements, le système étant très sensible. La partie amont peut recevoir de l'eau qui se réinfiltrera à l'aval du bassin. Il est donc difficile de parler d'une alimentation de la rivière.

Pour une période de basses eaux où la nappe à proximité est à 90.7 mètres, si l'on regarde la différence entre les sources et les pertes lorsque la hauteur d'eau dans le bief amont augmente d'une cinquantaine de centimètres, on constate que les débits souterrains arrivant en surface diminuent. Plus le niveau d'eau est haut dans le Loiret, plus les débits de débordement sont faibles. La figure 24 montre qu'une augmentation du niveau du Loiret de 10 cm provoque une baisse des débits de l'ordre de $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$. Modifier de 10 cm la hauteur d'eau dans le bief amont impacte de 5% les débits de débordement.

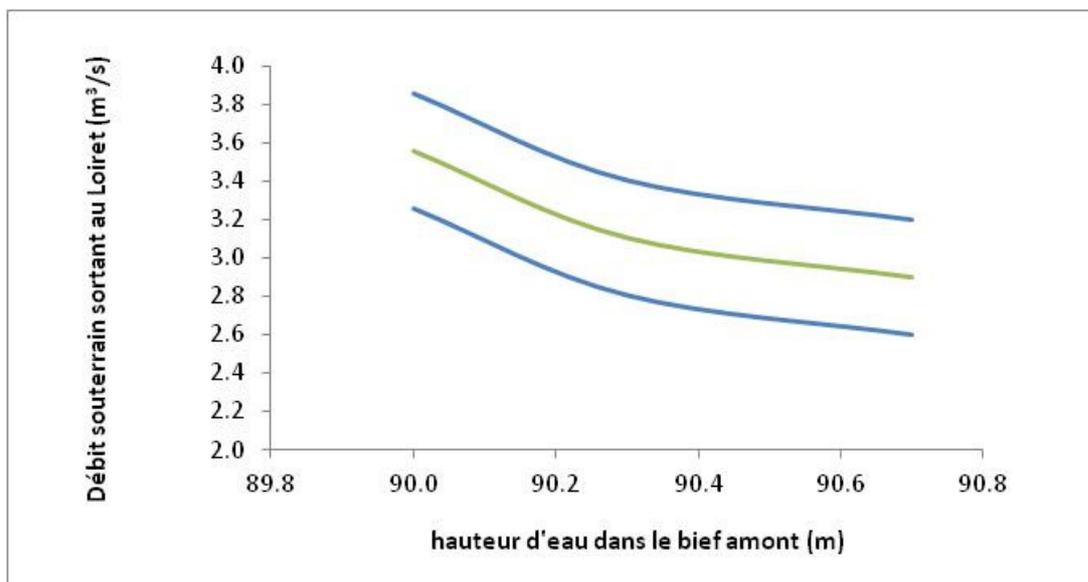


Fig.25 Débits d'eau souterraine qui alimentent le bief amont du Loiret en fonction de la hauteur d'eau dans le Loiret (en vert). Les lignes bleues représentent l'incertitude du modèle.

5.5. Réflexion sur un programme d'instrumentation

Les modélisations sont des outils de synthèse des observations de terrain. Un modèle sans données n'a que peu d'intérêt pour la gestion de la ressource en eau.

Le Loiret aval joue le rôle de charges constantes pour le système souterrain. Dans ce modèle les tests paramétriques montrent que la charge constante aval est primordiale pour décrire l'ensemble des écoulements dans les conduits du système. Ceci met en évidence la nécessité de suivre les variations du niveau d'eau dans les bassins avals du Loiret.

Etant donné que 80% des eaux passent par le conduit, un suivi piézométrique, de vitesse et de qualité de l'eau pourrait-être réalisé sur un drain à l'amont de la station de pompage. Il apporterait des données fondamentales pour améliorer le calage de la modélisation.

Enfin, tout ou presque des conclusions hydrogéologiques données sur le Val se base sur la carte piézométrique de 1966. Dans un contexte de changements environnementaux, nous n'avons pas la certitude que cette carte soit encore valide. Une carte piézométrique récente du Val d'Orléans apparaît comme très importante pour renouveler notre réflexion sur ce site. Il existe des cartes de 1994 et 2008, cependant le nombre de forages mesurés est faible, devant la complexité du système (environ 100). Vu les discontinuités présentes sur ce secteur, une carte exploitable devrait comporter un millier de points, comme celle de 1966.

CONCLUSION:

Depuis quelques années, les débits du Loiret semblent diminuer. La recherche des causes de cette diminution se confronte à un problème multifactoriel. Au cours des 30 dernières années, le Val d'Orléans a subi de nombreuses modifications qui peuvent potentiellement impacter les débits de la rivière. Les pompages, l'urbanisation, l'enfoncement du lit de la Loire, la gestion des écluses... sont autant de facteurs qui influencent les écoulements. Afin de hiérarchiser ces causes de la plus probable à la moins probable, un modèle hydro-géologique a été mis en place sur le Val d'Orléans. Ce modèle a été l'occasion de réaliser une importante synthèse des données existantes sur le Val. Les cartes présentées dans ce rapport présentant le modèle géologique et hydrogéologique sont la base de la réflexion sur les écoulements souterrains.

La modélisation a permis d'estimer les propriétés des conduits et de la matrice ainsi que de reproduire la carte piézométrique en basses eaux. Il en ressort que même en très basses eaux, le Loiret est soutenu par la Loire à 84%. L'eau provenant de la Beauce et de la Sologne correspond à $2 \text{ m}^3/\text{s}$ soit environ 15% du flux, le reste correspondant à l'eau qui s'infiltre sur le Val.

Si l'on fait varier un à un les paramètres de ce modèle, comme la hauteur d'eau en Loire, il est possible de discuter l'effet de chaque paramètre sur le système. Cette méthode a permis d'apporter des informations sur le fonctionnement de la rivière du Loiret.

Parmi les causes possibles qui modifient les débits souterrains débordant vers le Loiret, 3 ont été étudiées. D'après les calculs réalisés dans ce rapport, une baisse de 1 mètre du fil d'eau de la Loire à la pointe de Courpain provoquerait une baisse des apports d'eau souterraine vers le Loiret de 50%. Le calcul met en évidence que malgré le rôle de l'enfoncement du lit de la Loire sur le contrôle des débits d'eau souterraine dans le Loiret, les effets des pompages ne sont pas négligeables en période de basse eaux puisque le pompage peut diminuer les débits de 10 % environ. La gestion des biefs semble avoir un impact sur les écoulements. Modifier le niveau d'eau dans le Loiret de 10 cm peut diminuer de 5% les débits de débordement. Maintenir le niveau d'eau le plus bas possible, permet une meilleure vidange de l'aquifère.

Les débits de soutien d'étiage s'en trouvent ainsi augmentés, mais la hauteur d'eau sera minimale.

REFERENCES :

Albéric P (2001) L'inversac (perte-émergence) de la résurgence du Bouillon (source du Loiret, France). Sci.Tech. Envir, Mém. H.S. (13): 1-4

Albéric P (2003) River backflooding into a karst resurgence (Loiret, France). J Hydrology (286):194-202

Albéric P (2008) Les trois pertes-émergences (ou inversacs) du domaine de la source (Loiret). Colloque national d'Hydrogéologie. May 16 and 17, Orléans –France

Albéric P et Lepiller M (1998) Oxydation de la matière organique dans un système hydrologique karstique alimenté par les pertes fluviales (Loiret, France). Water Resources Res 32(7):2051-2064

Auterives C., Binet S., Albéric A. (2011) Inferred conduit network geometry from geological evidence and water head measurements in a fluvio-karstic system (Val d'Orleans, France). 9th Conference on Limestone Hydrogeology H2KARST – Besançon – France (communication orale et actes)

Albinet M et Brossier G (1973) Expérience de coloration dans le val d'Orléans. BRGM, SGN 095 AME

Binet S., Joodi A., Joigneaux E., Albéric P. , A. Gutierrez (2010) Localisation of a reactive transport zone in a saturated karstic conduit deduced from natural and artificial tracer tests. International symposium on karst :ISKA – Malaga – Espagne (communication orale et actes)

Caudron M et Albinet M (1965) Les sources du Loiret-Guide hydrogéologique. Bull. BRGM :183-202

Chatelain S et Livrozet E (1982) Impact des apports de la Loire sur la qualité des eaux du système karstique des calcaires de Beauce du Val d'Orléans. Aspects bactériologiques. C.R.3ème Coll. « Hydrologie en pays calcaire », Neuchâtel

Chatelain S, Chéry JL, Livrozet E (1981) Le système aquifère karstique du Val d'Orléans. III. Apport d'un double traçage dans l'étude du système Loire-Loiret. Comm. 26^{ème} Coll. Nat. Limnologie, Orléans, Juin 1981

Chéry JL (1983) Etude hydrochimique d'un aquifère karstique alimenté par perte de cours d'eau (la Loire). PhD Thesis, Orléans University

Chéry JL et Lepiller M (1981) Le système aquifère karstique du Val d'Orléans. II. Physico-chimie des eaux. Comm. 26ème Coll. Nat. Limnologie, Orléans, Juin 1981

Chéry JL et Lepiller M (1986) Le karst des calcaires de Beauce dans la région Orléanaise. CR. Des rencontres nature 1986. Bull. Spécial de l'Association des naturalistes Orléanais, 12-18

Chéry JL, Lelong F, Lepiller M (1982) Impact des apports de la Loire sur la qualité des eaux du système karstique des calcaires de Beauce du Val d'Orléans. Aspects hydrodynamiques et chimiques. C.R. 3ème Coll. « Hydrologie en pays calcaire », Neuchâtel

Desprez N (1967) Inventaire et étude hydrogéologique du Val d'Orléans (Loiret). BRGM DSGR 67 A 21.16

Desprez N (1976) Val d'Orléans à l'Est d'Orléans (Loiret)-Etude hydrogéologiques. BRGM 76 SGN 109 BDP

Diersch, H.J.G. (2009) Feflow reference manual. <http://www.feflow.info/manuals.html>

Géo-Hyd (2004) Elaboration du schéma d'aménagement et de gestion des eaux du bassin du Loiret: Diagnostic du bassin versant. Rapport pour la Commission locale de l'eau « Val Dhuy-Loiret »

Gigout M (1973) L'altération périglaciaire du calcaire de Beauce. In : Le calcaire de Beauce. Bulletin de liaison des laboratoires Ponts et Chaussées. Spécial 4 ;

Guillerd A (1946) Le cours supérieur de la rivière du Loiret. Ponts et Chaussées d'Orléans. Rep. Inédit

Gutierrez A. et Binet S. (2010), La Loire souterraine : circulations karstiques dans le Val d'Orléans In Géosciences 12 : La Loire, agent géologique, éd. BRGM

Janet L (1901) Géologie et hydrologie de la région du Loiret préfecture de la Seine-Direction des affaires municipales, Paris, éd. Chaix

Joigneaux, E., Albéric, P., Pauwels, H., Pagé, C., Terray, L., and Bruand, A., 2011: Impact of climate change on groundwater point discharge: backflooding of karstic springs (Loiret, France), *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 2459-2470, doi:10.5194/hess-15-2459-2011, 2011.

Joodi AS, Sizaret S, Binet S, Bruand A, Albéric B, Lepiller M (2009) Development of a Darcy-Brinkman model to simulate water flow and tracer transport in a heterogeneous karstic aquifer (Val d'Orléans, France). *J. Hydrogeology*.

Le Borgne F (2001) Réponses hydrogéochemiques de la nappe phréatique du Val d'Orléans aux sollicitations de son environnement. Développement du site expérimental de la carrière Morillon-Corvol de Sandillon (45). PhD Thesis, Paris 7 University

Le Borgne F, Trel M, Joron JL, Lepiller M (2005) Méthode de sondage géochimique des aquifères à l'aide des lanthanides naturels et de leurs complexes EDTA : Cas des aquifères alluvial et karstique du Val d'Orléans. *Bull. Soc. Géol* no 6: 513-529

Lelong F et Lepiller M (1981) Le système karstique du Val d'Orléans. 1. Esquisse de fonctionnement hydrodynamique. *Comm. 26ème Coll. Nat. Limnologie*, Orléans, Juin 1981

Lepiller M (1996) Guide de l'excursion AIH, Orléans Lepiller M (2001) Traçages appliqués à la dynamique des aquifères karstiques. *Géologue* (129):79-84

Lepiller M (2006) Aquifères et eaux souterraines de France, Tom 1, III, 6. Val d'Orléans. BRGM:200-214

Lepiller M et Mondain PH (1986) Les traçages artificiels en hydrogéologie karstique. *Hydrogéologie* (1):33-52

Livrozet E (1984) Influence des apports de la Loire sur la quantité bactériologique et chimique de l'aquifère karstique du Val d'Orléans. PhD Thesis, Orléans University

Lorain JM (1973) La géologie du calcaire de Beauce. In : Le calcaire de Beauce. *Bulletin de liaison des laboratoires Ponts et Chaussées*. Spécial 4

Marboutin F (1901 et 1902). Etudes hydrologiques, Mission du Val d'Orléans (Campagne d'été 1901, d'hiver 1901-1902 et d'été 1902) (Commission scientifique de Perfectionnement de l'observatoire municipal de Montsouris, Paris)

Sainjon H (1888) La Loire, Le Loiret et les courants souterraines du Val d'Orléans (Orléans)

Zunino (1979) Contribution à l'étude hydrogéologique du Val d'Orléans. PhD Thesis, Orléans University