

Apport des traçages à la connaissance du système karstique du Val d'Orléans. Historique et nouvelles avancées

Nevila Jozja¹, Philippe Maget², Christian Défarge³, Cécile Mauget⁴, Arnaud Pidon⁵, Simon Prod'homme⁶, Katia Rousseil⁷, Jacques Munerot⁸, Stéphane Thauvin⁹ et Audrey Dufour¹⁰.

Introduction

Le Val d'Orléans, avec le petit cours d'eau qui donne son nom au département du Loiret, a de tout temps excité la curiosité et fait l'objet d'observations de plusieurs admirateurs du milieu naturel.

Si l'étendue géographique du système karstique du Val d'Orléans est bien définie (du méandre de Guilly, près de Sully-sur-Loire à l'est, jusqu'à la confluence Loire-Loiret à l'ouest ; Fig. 1) ses limites hydrogéologiques précises, malgré de nombreux travaux menés, restent encore mal connues. Or, la délimitation du système est une étape essentielle et préalable à toute démarche visant à comprendre les altérations de la qualité de la ressource en eau pouvant résulter de la contribution d'eaux polluées à son alimentation et à assurer la protection de cette ressource.

Deux approches ont été tentées pour étudier le régime hydrodynamique : la première par modélisation mathématique, l'autre, la plus développée, par traçages artificiels. Cette dernière méthode a permis de caractériser les vitesses d'écoulement le long des drains majeurs, d'estimer les temps de transit, et a contribué à renouve-

ler la connaissance de la délimitation du système.

Cette note vise à mettre en relief le rôle important joué par les traçages, qui ont apporté des précisions considérables sur l'organisation du drainage au sein du système et sur son fonctionnement. Dans le Val d'Orléans, ils sont à l'origine de deux grandes réalisations : la station de surveillance et d'alerte de Saint-Denis-de-l'Hôtel et les périmètres de protection des captages.

Système karstique du val d'Orléans

Val d'Orléans, système particulier, alimenté par les pertes de la Loire

La formation du karst du Val d'Orléans a débuté avec l'enfoncement du lit majeur de la Loire dans le calcaire de Beauce, lors de la glaciation du Würm qui a provoqué un abaissement du niveau marin d'environ 100 m, entraînant une érosion fluviale intense et un accroissement important du potentiel de karstification au contact entre fleuve et calcaire de Beauce supérieur (calcaire de Pithiviers). (Lepiller, 2006 ; voir figure 1).

Alors qu'elle coulait sur fond d'argile à silex en arri-

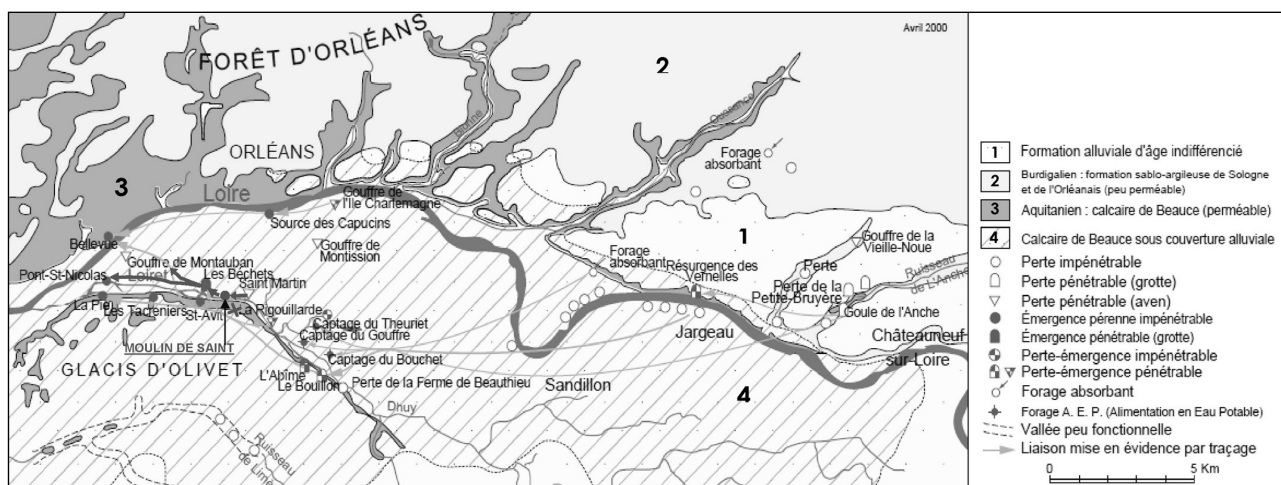


Figure 1. Carte des circulations karstiques du Val d'Orléans. (Les modifications apportées aux circulations présentées dans Lepiller, 2006, sont en gras foncé).

1. Université d'Orléans, CETRAHE (Cellule R&D d'Expertise et de Transfert en TRaçages Appliqués à l'Hydrogéologie et à l'Environnement), Polytech'Orléans, 8 rue Léonard de Vinci, 45072 Orléans cedex 2, nevila.jozja@univ-orleans.fr
2. Hydrogéologue agréé
3. CETRAHE (voir 1) ; Université d'Orléans/CNRS-INSU, Institut des Sciences de la Terre d'Orléans, UMR 6113 ; École Polytechnique de l'Université d'Orléans.
4. École Polytechnique de l'Université d'Orléans. Adresse actuelle : ADEME, 49004 Angers cedex 01.
5. Université d'Orléans/CNRS-INSU, Institut des Sciences de la Terre d'Orléans, UMR 6113. École Polytechnique de l'Université d'Orléans. Adresse actuelle : BRGM – Géothermie, 45060 Orléans cedex 2.
6. École Polytechnique de l'Université d'Orléans. Adresse actuelle : Lyonnaise des eaux, 33009 Bordeaux.
7. École Polytechnique de l'Université d'Orléans. Adresse actuelle : EGIS, 33310 Lormont.
8. Association de Spéléologie Subaquatique du Loiret, 45000 Orléans.
9. Association Syndicale de la Rivière du Loiret, 45160 Olivet.
10. CETRAHE (voir 1).



Figure 2. Perte des Moulins à Jargeau (cliché : Jacques Munerot).

vant dans le Val d'Orléans, la Loire, dès le hameau de Bouteille (près de Guilly), est en contact avec un calcaire de Beauce bien fissuré. Les premières pertes se situent au niveau de Châteauneuf-sur-Loire, à l'aval du talus formé par la surface piézométrique de l'aquifère alluvial (Sainjon, 1888 ; Lepiller, 2006). Ces pertes massives (Fig. 2), pouvant atteindre une quinzaine de m^3/s , sont la caractéristique principale du système et sont à l'origine du développement du réseau karstique (Chatelain *et al.*, 1981 ; Chery, 1983).

Si la partie amont est caractérisée par la présence des pertes sur une vingtaine de kilomètres, la partie aval correspond à une zone d'exhaure, les résurgences du Loiret, dont la source dite le Bouillon, dans le Parc floral, est la plus en amont et la plus connue (Perrault, 1674 ; Sainjon, 1888, Desprez *et al.*, 1967).

Un système fragile et vulnérable

Le Val d'Orléans constitue un milieu très fragile car le calcaire, situé entre 0 et 10 m de profondeur environ, et les alluvions forment un système aquifère unique, sans couverture protectrice. Le calcaire est très facilement accessible par les ouvrages souterrains et les travaux de fouille et les effondrements (bîmes ou fontis) sont de plus en plus fréquents.

Le Val d'Orléans est occupé par une zone urbaine étendue (48 000 personnes demeurent dans le val) et par des zones agricoles aux cultures très variées (Martins, 1992), ce qui entraîne des rejets d'eaux domestiques

polluées, des rejets agricoles par le drainage, ainsi que certains rejets industriels. Les points de pollutions potentielles ne concernent pas seulement le lit majeur de la Loire, mais aussi la totalité du bassin versant qui s'étend sous les coteaux de part et d'autre du val.

Le risque est d'autant plus sensible que la Ville d'Orléans possède trois captages (le Gouffre, le Theuriet et le Bouchet) situés dans le val et qui fournissent environ 80 % de l'eau pour la ville ainsi que pour trois communes du sud de la Loire (Saint-Denis-en-Val, Saint-Jean-le-Blanc et Saint-Pryvé-Saint-Mesmin). Ces ouvrages, peu profonds (17 à 26 m), captent l'eau dans le Calcaire de Pithiviers, fortement karstifié dans ce secteur proche des sources du Loiret et qui est en relation directe avec les alluvions (Guillerd, 1942, 1946). Les analyses d'eau effectuées sur ces captages ont montré une similitude presque parfaite avec celles effectuées sur la source du Loiret, y compris pour les variations physico-chimiques liées au débit de la Loire (Albéric et Lepiller, 1998). Les risques encourus aux sources sont donc les mêmes que pour les captages du Val.

Contribution des traçages à la compréhension du système

Importance de la méthode traçage dans l'étude des systèmes karstiques

La méthode des traçages artificiels consiste à injecter dans le milieu hydrique des marqueurs dont le caractère fluorescent ou salin va permettre de tracer les circulations des eaux. Parmi les principales applications, on peut souligner : la caractérisation des systèmes hydrogéologiques naturels, l'estimation de leurs ressources en eau, la délimitation des périmètres de protection et des aires d'alimentation des ouvrages d'alimentation en eau potable (AEP), les études d'impact des rejets par infiltration de stations d'épuration dans le milieu naturel, les études de propagation des pollutions souterraines existantes ou potentielles, etc.

Historique des traçages dans le Val d'Orléans. Que nous enseignent-ils ?

Un exemple parfait des services rendus par le traçage artificiel est sa contribution à la découverte et à la définition du système karstique du Val d'Orléans.

L'hypothèse d'une relation étroite entre la Loire et les sources du Loiret, formulée dès le XVIII^e siècle (Fontenu, 1736), a été confirmée par Marboutin en 1901, le premier à utiliser les traçages à la fluorescéine pour mettre en évidence les pertes en val de Loire et les résurgences qui, tout au long du cours du Loiret, produisent l'essentiel de

son débit. S'appuyant sur une expérience à la fluorescéine, il a également démontré l'apport des pertes du ruisseau de l'Anche (affluent de rive droite de la Loire) à l'alimentation du système, obtenant une restitution aux émergences du Loiret et mettant en évidence l'existence d'un réseau de drainage karstique sous la Loire (Marboutin, 1901, 1902). On trouve ensuite, sous la plume d'Albinet et Brossier (1973), une évocation très vague de traçages qui auraient été réalisés de 1928 à 1932 à partir de pertes en Loire situées au hameau de Bouteille, sur la commune de Guilly, donnant lieu à un transit contrôlé dans le puits du Château-Bardy, à Sandillon, et à la source du Bouillon.

Il faudra ensuite attendre 28 ans pour que deux nouveaux traçages soient réalisés. Le premier, réalisé en 1969 par le BRGM (Caudron et Desprez, 1969), a mis en cause le résultat de Marboutin (1901), par absence de restitution constatée du traceur. Le second, réalisé à partir de la perte du Gouffre d'Ambert en Forêt d'Orléans, a été un échec faute d'une surveillance et de moyens de recherche adaptés (Lepiller 2006).

Le premier traçage dont la surveillance permettra la quantification des paramètres du transit est réalisé en 1973. Une faible proportion (environ 8%) du traceur injecté (fluorescéine) dans une perte située dans le lit mineur du fleuve, à l'aval de Jargeau, transitera en 102 heures (vitesse apparente : 128 m/h) jusqu'à la source du Bouillon (Lepiller, 2006). La relation avec les autres points surveillés auparavant par Marboutin sera également confirmée à cette occasion.

Sept traçages effectués par la suite par Michel Lepiller et l'Université d'Orléans, à partir des pertes situées dans le lit mineur ou d'un point d'injection qui se trouve sur l'axe de drainage karstique, montrent des valeurs de vitesses apparentes peu variables, entre 100 et 140 m/h, et peu dépendantes du débit de la Loire. On obtient des vitesses plus lentes vers les captages AEP de la ville d'Orléans (entre 73 et 85 m/h). Ce ralentissement est dû à la position latérale des captages par rapport à l'axe de drainage suivi par les traceurs depuis la zone des pertes (Janet, 1901).

L'autre hypothèse de Marboutin sur des liaisons souterraines entre les pertes du ruisseau de l'Anche (rive droite de la Loire) et les émergences du Loiret a été confirmée à trois reprises par des traçages effectués par l'Université d'Orléans (Lepiller, 2006). Les vitesses apparentes de transit sont 68 m/h en basses eaux et 142 m/h en hautes eaux. À partir du ruisseau de l'Anche (voir figure 1), le traceur est restitué à l'exutoire du Bouillon en quantité très variable selon les conditions hydrologiques : en basses eaux des ruisseaux, la restitution est de l'ordre de 10 à 20 fois plus élevée qu'en période de hautes eaux. Ce contraste est dû à l'existence de la source des Vernelles,

1 000 m à l'aval de Saint-Denis-de-l'Hôtel, en rive droite de la Loire (voir figure 1). En période de crue, elle permet le transit d'une fraction importante de la masse de traceur à partir du ruisseau de l'Anche, avec une vitesse apparente proche de 110 m/h. La présence de la source des Vernelles dans une zone dominée par les pertes semble paradoxale. Le fonctionnement temporaire de cette source est en relation étroite avec les crues du ruisseau de l'Anche survenant en période de moyennes eaux de la Loire, conférant ainsi à la source un rôle de trop-plein. L'exutoire évacue la fraction de l'eau qui ne peut facilement s'écouler dans les galeries creusées sous le lit du fleuve.

Le suivi de la restitution de traçages réalisés à partir des pertes en amont de la Loire ou des pertes du ruisseau de l'Anche à différents exutoires du Loiret a mis en évidence une accélération considérable de la vitesse de transit vers les exutoires aval. L'accroissement de la pente hydraulique conjugué à la convergence des trajectoires d'écoulement vers cette partie rétrécie du Val explique les vitesses remarquablement élevées qu'on y constate. Les eaux du Loiret ne représentent que la moitié du débit perdu et qui traverse le système. L'autre moitié ressort directement dans le lit mineur de la Loire à partir des sources des Capucins, à Saint-Jean-le-Blanc. Une zone importante d'exhaure est située à la Chapelle-Saint-Mesmin (Bellevue ; voir figure 1). Ces émergences constituent également le point d'exhaure d'un système qui draine une partie de la Grande Beauce (Gonzalez, 1991).

Traçages récents dans le Val d'Orléans : de nouvelles avancées

Le renouvellement de certains traçages, ou de nouveaux traçages, ont été réalisés ces dernières années dans le Val, à l'initiative de la Cellule R&D CETRAHE de l'Université d'Orléans, dans le cadre de projets d'ingénieurs de l'École Polytechnique Polytech'Orléans. Ils ont contribué à renouveler et élargir les connaissances déjà acquises sur le système.

Dans le but d'explorer l'hypothèse d'une extension latérale à l'ouest du système, un traçage à la fluorescéine a été réalisé en mars 2009. Le but était de vérifier si des résurgences un peu lointaines telles que les sources des Fontenils et des Eaux-Bleues à Tavers (près de Beaugency), ainsi que la source des Grandes Fontaines à Saint-Ay sont affectées par le drainage du système du Val (Fig. 3). L'injection a été faite à partir des pertes de Saint-Martin (Olivet), qui se trouvent dans le cours du Loiret, sur l'axe de drainage Jargeau-émergences du Loiret (voir figure 2). Elle a été réalisée en plongée, directement dans l'un des drains. Compte tenu des grandes distances (environ 35 km), la quantité de fluorescéine injectée dans les pertes de Saint-Martin a

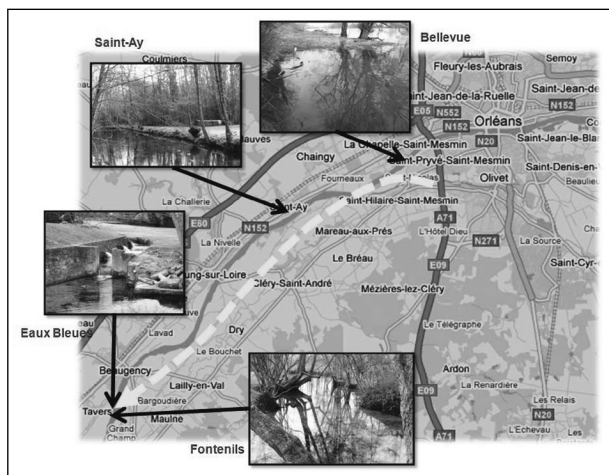


Figure 3. Localisation géographique des sources des Eaux Bleues et des Fontenils (Tavers), des Grandes Fontaines (Saint-Ay) et de Bellevue (La Chapelle-Saint-Mesmin). Source : Google map et clichés : Simon Prod'homme, Katia Rousseil).

été de 20 kg. Aucune restitution n'a été mise en évidence en l'un quelconque de ces points après un suivi d'un mois. Par contre, une restitution cohérente avec les circulations connues a été observée au bout de 19 heures à Bellevue (La Chapelle-Saint-Mesmin ; voir figures 1 et 3).

La coloration visuelle spectaculaire des eaux du Loiret provoquée par la quantité importante de traceur injecté lors de ce traçage a permis d'observer des phénomènes inconnus jusque-là. Quelques centaines de mètres en aval des pertes de Saint-Martin, la coloration intense du bassin aval du moulin de Saint-Julien (domaine de la Fontaine, Olivet ; Fig. 4) a permis de mettre en évidence la présence d'une source. Une coloration a également été observée plus en aval, rive droite du Loiret au niveau du Pont Saint-Nicolas à Saint-Hilaire-Saint-Mesmin (liaison non reportée dans l'article Lepiller, 2006 ; voir figure 1).

Dans la perspective de préciser ces observations, ce traçage a été répété au mois de mai 2009 sous la forme d'un multitraçage avec injection de 1 kg de fluorescéine et 1 kg de sulforhodamine, respectivement dans les deux cavités constituant les pertes de Saint-Martin. Une surveillance a été établie au Moulin de Saint-Julien et aux sources des Béchets, des Tacreniers (Olivet) et de la Pie (Saint-Hilaire-Saint-Mesmin), ainsi qu'en rives droite et gauche du Loiret au niveau du Pont-St-Nicolas (voir figure 1). Les deux traceurs ont été restitués aux mêmes points (Saint-Julien, Béchets, rive droite du Pont-St-Nicolas), mais aucune trace n'a été observée aux Tacreniers, à la Pie, ni dans aucune source située rive gauche du Pont-St-Nicolas.

La restitution montrée sur la figure 5 a été obtenue lors d'un 3^{ème} traçage dans les pertes de Saint-Martin, effectué en mars 2010. Ces résultats confirment l'exis-



Figure 4. Bassin aval du moulin de Saint-Julien à Olivet (cliché : Jacques Munerot).

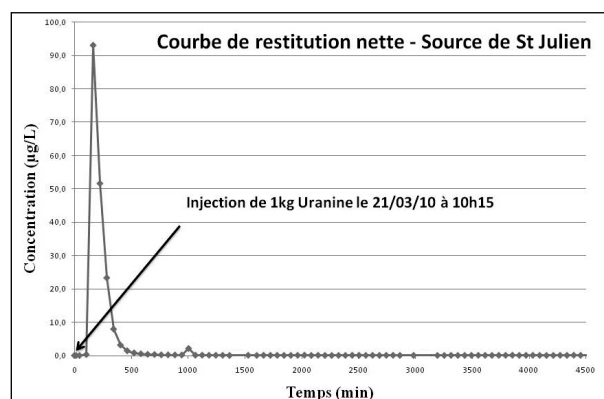


Figure 5. Courbe de restitution de la fluorescéine à la source de Saint-Julien (source : Nevila Jozja).

tence de la source de Saint-Julien, avec une vitesse apparente de 163 m/h, qui se rajoute à la zone d'exhaure du Loiret. Les pertes de Saint-Martin se trouvent vraisemblablement sur l'axe d'un drain qui rejoint la source de Bellevue, mais qui n'a aucun lien avec le drain qui va à la source de la Pie (voir modifications apportées par cette étude sur la figure 1).

Conséquences pratiques pour la protection des eaux

Les traçages réalisés à partir des années 1990 par l'Université d'Orléans en collaboration avec les spéléologues orléanais ont contribué à donner des indications très importantes pour la protection des captages AEP du Val. La confirmation de la restitution des eaux perdues par l'Anche et ses affluents démontre la nécessité d'étendre la protection des captages pour la production d'eau potable d'Orléans au nord de la Loire.

Le périmètre du SAGE Loiret s'arrête à la Loire, ignorant les données factuelles démontrant de manière indiscutable la contribution des pertes des systèmes hydrogéologiques superficiels en rive droite à l'alimentation du système. Un des affluents du ruisseau de l'Anche est issu de la zone industrielle de Châteauneuf-sur-Loire et se perd lui-même avant d'atteindre le ruisseau. Par ailleurs, les bassins versants de l'Anche, de Chenailles, de l'Oussance et de la Bionne sont en grande partie à vocation agricole. Ils sont aussi traversés par la N60 et accueillent un aéroport. Toutes ces caractéristiques confèrent à ces surfaces une indéniable implication dans la vulnérabilité du système du Val d'Orléans et de ses captages AEP.

Perspectives

Les éléments évoqués ci-avant soulèvent plusieurs questions dont les réponses exigent la réalisation de nouveaux traçages :

- Quelle est la destination prise par les eaux perdues par le ruisseau de Chenailles ? Alimentent-elles un système établi au nord de celui lié aux pertes de l'Anche, et qui serait drainé vers l'Île-Charlemagne ?
- Quelle est l'origine de l'axe de drainage mis en évidence par les traçages de l'Île-Charlemagne (voir figure 1) ? Aucun des traceurs injectés dans les pertes de la Loire et du ruisseau de l'Anche n'ayant été retrouvés dans le drain de l'Île-Charlemagne, il convient probablement de rechercher plus au nord que le bassin versant de ce ruisseau celui qui alimente ce drain.
- L'hydrométrie des affluents de rive droite de la Loire est mal connue. L'hydrogéologie des systèmes de l'Oussance et de la Bionne, qui comportent plusieurs pertes sur leur bassin versant, ou celui de leurs affluents est à préciser à l'aide de traçages.

Par ailleurs, sous le glacis d'Olivet, la question de la contribution des pertes de deux systèmes hydrologiques superficiels issus de la formation de Sologne (les ruisseaux de Limère et de Baule) à l'alimentation du système karstique du Val d'Orléans n'a pu être tranchée. Enfin, la limite orientale du système, à l'est du méridien de Châteauneuf-sur-Loire, reste imprécise.

La complexité du système karstique du Val d'Orléans dépasse ce qu'on pouvait encore imaginer il y a quelques années. Combinée avec d'autres approches, les traçages apporteront indéniablement de nombreux éléments de réponse à ces questions essentielles pour la gestion des ressources en eau de ce val.

Remerciements

Luc Gaillard, Benoît Macé et Nicolas Strzepek, ain-

si que Christelle Giusti et Albin Liébaux, élèves-ingénieurs à Polytech'Orléans, ont participé aux surveillances mises en place lors de traçages. Olivier Cantaloube et Jean-Pierre Duchêne ont aidé aux injections subaquatiques.

Bibliographie

- Albéric P. et Lepiller M., 1998 : Oxydation de la matière organique dans un système hydrologique karstique alimenté par des pertes fluviales (Loiret, France). *Water Research*, 32, 2051-2064.
- Caudron M., Albinet M., Cottez S., Margat J., 1965 : Les sources du Loiret – Guide hydrogéologique. *Bull. B.R.G.M.*, 3 - 1965, 183-202.
- Chatelain S., Chery J.-L., 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. 8 p.
- Chery J.-L., 1983 : Etude hydrochimique d'un aquifère karstique alimenté par perte de cours d'eau (la Loire) : le système des calcaires de Beauce sous le Val d'Orléans. Thèse Doct. 3^{ème} cycle, Univ. Orléans. 258 p., 4 pl. h.t.
- Desprez N., Megnien C., 1965 : Connaissances nouvelles sur la structure de la Beauce. *Bull. Soc. Géol. de Fr.*, 7-VII, 303-308.
- Fontenu abbé de, 1736 : Réflexions historiques sur le Loiret. *Mémoires de l'Académie Royale des Inscriptions et Belles Lettres*, Tome XII, 153-163.
- Gonzalez R., 1991 : Étude de l'organisation et évaluation des échanges entre la Loire moyenne et l'aquifère des calcaires de Beauce. Thèse Doct Sc. de la Terre, Spéc. Hydrogéologie, Univ. Orléans. 201 p.
- Guillerd A., 1942 : Protection du captage d'eau de la ville d'Orléans. *Ponts et Chaussées d'Orléans*. Rapport inédit.
- Guillerd A., 1946 : Le cours supérieur de la rivière du Loiret. *Ponts et Chaussées d'Orléans*. Rapport inédit.
- Janet L., 1901 : Géologie et hydrologie de la région du Loiret. Préfecture de la Seine - Direction des affaires municipales. Paris, éd. Chaix.
- Lepiller M., 2006 : Val d'Orléans. *In* : Aquifères et eaux souterraines en France, tome 1, J.-C. Roux (éd.), BRGM Éditions, 200-214.
- Lelong F., Jozja, N., 2008 : Fonctionnement du système karstique du val d'Orléans : les acquis, les interrogations. *CFH – Colloque Hydrogéologie et karst au travers des travaux de Michel Lepiller 17 mai 2008*, 107-116.
- Maget P., Pointet T., 2006 : Beauce. *In* : Aquifères et eaux souterraines en France, tome 1, J.-C. Roux (éd.), BRGM Éditions, 191-199.
- Marboutin F., 1901 : Études hydrologiques, Mission du Val d'Orléans (campagne d'été 1901). Commission scientifique de perfectionnement de l'Observatoire municipal de Montsouris, Paris.
- Marboutin F., 1902 : Études hydrologiques, Mission du Val d'Orléans (campagne d'hiver 1901-1902 et d'été 1902). Commission scientifique de perfectionnement de l'Observatoire municipal de Montsouris, Paris.
- Martins C., 1992 : Captages d'alimentation en eau potable du Val. Étude d'environnement. BRGM. R 35 328 4S/92.
- Perrault P., 1674 : De l'origine des fontaines.
- Sainjon H., 1888 : La Loire, le Loiret et les courants souterrains du Val d'Orléans (Orléans).