

Lors de son passage dans le Val d'Orléans, la Loire perd une fraction de son débit. Une partie des eaux perdues réapparaît dans le Loiret, court affluent de la Loire qui donne pourtant son nom à tout un département. Les débits de pertes et les circulations souterraines de ces flux sont difficiles à estimer. Leur détermination est pourtant essentielle non seulement pour la caractérisation du système, mais aussi pour la prévention des pollutions et des catastrophes naturelles.

Les pertes de la Loire dans le Val d'Orléans créent parfois des vortex en surface. En moyenne, environ 12 m³/s rejoindront la nappe des calcaires de Beauce sous-jacents pour emprunter un réseau karstique anastomosé dont une partie alimente les sources du Loiret.

Swallow holes in the Loire River in the Orléans Valley may cause eddies at the surface. An average of some 12 m³/s infiltrates the underlying Beauce limestone aquifer, flowing into a braided karst network, part of which feeds the Loiret headwaters.

© Philippe Boismoreau.

La Loire souterraine : circulations karstiques dans le Val d'Orléans



Alexis Gutierrez

HYDROGÉOLOGUE, BRGM
a.gutierrez@brgm.fr

Stéphane Binet

MAÎTRE DE CONFÉRENCES, ISTO
stephane.binet@univ-orleans.fr

Dans la portion la plus septentrionale de son cours, le fleuve change radicalement de direction (quasiment 90°), quittant la direction de Paris pour celle de Nantes. De Gien à Orléans, le fleuve entre dans le domaine du calcaire lacustre de Beauce. À partir de la boucle de Guilly, à l'ouest de Sully-sur-Loire, la Loire entre dans une plaine alluviale au relief peu marqué, large de 4 à 7 km, dont elle occupe la partie nord. C'est le domaine du Val d'Orléans. Sa rive droite y est dominée par la forêt d'Orléans, sise sur les sables et argiles de l'Orléanais qui recouvrent les calcaires de Beauce, et constitue la limite nord du Val d'Orléans. Au sud, le coteau solognot, constitué de formations équivalentes, borde le Val qui se resserre à l'ouest d'Orléans. Sur environ 50 km de cours d'eau traversant les 183 km² du Val ainsi délimité, la pente du fleuve est de 5 %, alors que celle de la topographie n'est que de 1 % [Desprez (1967)].

Sous les alluvions quaternaires, le calcaire de Beauce est proche, affleurant même parfois dans le lit du fleuve. Entre la limite est du Val et Orléans, la Loire y perd une partie de son débit. Entre 7 et 20 m³/s disparaissent pour n'être retrouvés qu'en aval de la confluence avec le Loiret par l'entremise d'une circulation essentiellement souterraine, dite karstique.

“ Les eaux de la Loire ont creusé un réseau karstique particulièrement développé. ”

Rivières souterraines

Le karst désigne les cavités, conduits, chenaux organisés en réseaux souterrains, issus de la circulation des eaux souterraines selon des passages préférentiels et de la dissolution du calcaire à leur contact. Alors que le karst de la Beauce, bien que fréquent et visitable en plusieurs endroits, ne présente pas de développement spectaculaire, les eaux légèrement acides de la Loire (cf. article C. Grosbois et al. page 54) ont creusé sous le Val un réseau karstique particulièrement développé (photo 1). Sa présence est attestée par les très nombreuses « bîmes » (ou fontis), gouffres qui se créent brutalement par effondrement de la voûte d'un conduit karstique ou par soutirage des matériaux alluvionnaires emportés dans ces conduits. Ces effondrements se produisent souvent sous les digues de Loire, non seulement dans le Val, mais sur tout le parcours « sédimentaire » de la Loire, soit 432 km, le long desquels le BRGM a défini un classement du « risque karstique » (cf. encadré p.44). Le Val d'Orléans se trouve dans la classe la plus élevée, avec une densité supérieure à un gouffre par km² (la plupart sont rebouchés). Les cavités naturelles y sont donc fréquentes et leur développement sous l'effet des circulations souterraines défraie régulièrement la chronique. En 1979, la plate-forme du forage géothermique de Melleray s'effondre (cf. encadré p.45). Lors de la construction du pont de l'Europe en 2000, à Orléans, la présence de karst sous la Loire est un défi pour l'architecte, Santiago Calatrava, qui distance les appuis principaux du pont de plus de 200 mètres pour rechercher des terrains stables. En mai 2010, une maison de Saint-Pryvé-Saint-Mesmin a disparu entièrement dans l'un de ces fontis (photo 2). Actuellement, le projet d'une nouvelle station d'épuration à l'île Arrault (rive droite de la Loire à Orléans) nécessite de combler de béton le karst sous-jacent.



▲ **Photo 1 : Le réseau karstique du Loiret est pénétrable depuis son émergence à la source du Bouillon. Il a été exploré par les plongeurs de l'association Spéléologie Subaquatique du Loiret.**

Photo 1: The karst network of the Loiret River is accessible via its emergence at the Bouillon spring. It has been explored by divers from the Spéléologie Subaquatique du Loiret association (Loiret association for underwater caving).

© Philippe Boismoreau.



▲ **Photo 2 : Effondrement à Saint-Pryvé-Saint-Mesmin. Le 22 mai 2010 une maison est entièrement engloutie par une « bîme » en liaison avec la circulation souterraine de l'eau de la Loire.**

Photo 2: Collapse at Saint-Pryvé-Saint-Mesmin. On 22 May 2010, a house was completely swallowed up by a massive sinkhole associated with underground circulation of water from the Loire River.

© Michel Leclercq.

► CARACTÉRISATION DE L'ALÉA D'EFFONDREMENT KARSTIQUE SOUS LES LEVÉES DOMANIALES

Aude Nachbaur – BRGM, Risques naturels et sécurité du stockage du CO₂ – a.nachbaur@brgm.fr

Luc Closset – BRGM, Directeur du Service géologique régional Ile-de-France – l.closset@brgm.fr

44

L'effondrement d'une cavité karstique est susceptible de déstabiliser ou de rompre les digues, jusqu'à conduire à l'inondation du Val. Pour prévenir ce risque, la DREAL Centre, gestionnaire de ces ouvrages, a initié en 2006 un projet de recherche et développement cofinancé par le BRGM, qui doit s'achever fin 2011. Une analyse géologique et hydrogéologique du bassin a notamment permis de repérer et qualifier les horizons rocheux sous-jacents des digues et de préciser la nature et l'épaisseur du recouvrement alluvionnaire. Ces analyses ont été réalisées au BRGM par les Services géologiques régionaux concernés (Bourgogne, Centre et Pays de la Loire).

À partir de ces données et de l'inventaire des événements karstiques géoréférencés, une cartographie de l'aléa a été élaborée avec hiérarchisation des tronçons de digues selon leurs niveaux de susceptibilité aux événements karstiques (figure). Cette cartographie est couplée à des indices qualifiant la qualité du diagnostic. Sur les secteurs les plus problématiques entre Bouteille (45) et Blois (41), le niveau d'aléa a été affiné grâce à des investigations géophysiques sur environ 100 km de digues, par une équipe de géophysiciens du BRGM. La démarche expérimentale consiste en un couplage de deux méthodes géophysiques – sismique (SASW) et tomographie de résistivité électrique – qui permettent une définition des propriétés mécaniques de l'horizon calcaire et une caractérisation du corps de la digue. Les particularités de cette campagne sont le relief de la digue, les complexités des réseaux karstiques, ainsi que les contraintes techniques de l'acquisition. En parallèle, des modélisations numériques ont permis d'analyser les mécanismes potentiels d'instabilité sur une digue mise en danger par un karst.

Cette étude devrait permettre aux gestionnaires de localiser les tronçons de digues sur lesquels des actions préventives doivent être menées en priorité. ■



▲ Fontis, dû à la présence d'un système karstique en profondeur, survenu au sommet de la digue au niveau de la commune de Jargeau (Loiret).

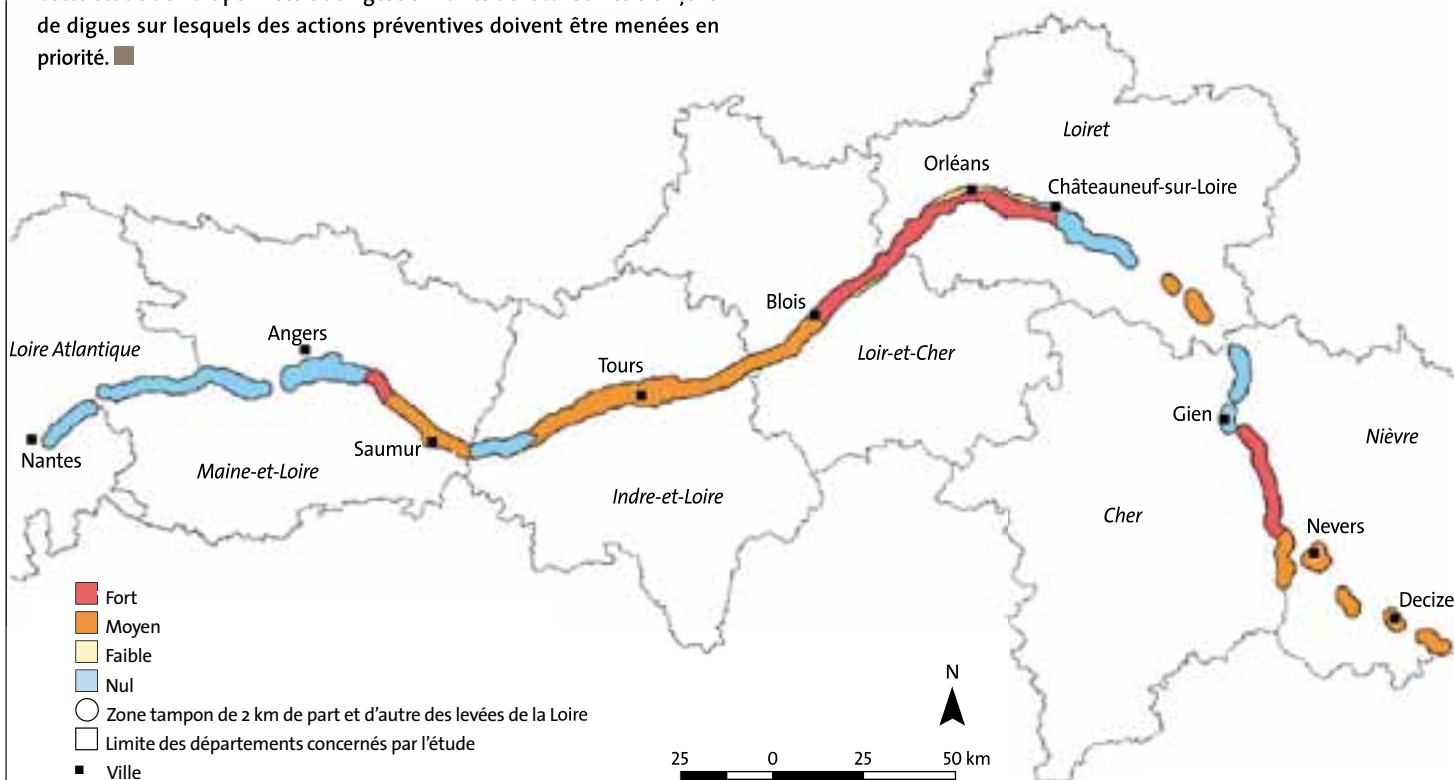
Swallow hole at the top of a dike near the town of Jargeau (Loiret Department), caused by the presence of a karst system at depth.

© BRGM Im@gé

▼ Niveau de sensibilité à la dissolution des terrains du substratum.

Level of susceptibility of the substratum to dissolution.

© BRGM



Pertes et résurgences

Dès 1880, Henri Sainjon, inspecteur général des Ponts et Chaussées, a compris que les circulations souterraines provenaient essentiellement de la Loire. En mesurant le débit en divers points sur la Loire depuis le hameau de Bouteille, près de Guilly à 41 km à l'est d'Orléans jusqu'à Orléans, il constate que les chiffres obtenus diminuent et que le débit en amont de Bouteille n'est récupéré qu'à l'aval de l'embouchure du Loiret, à 9 km à l'ouest d'Orléans. Il en déduit que les diverses sources du Loiret sont des résurgences de la Loire, confirmant ce qui n'était à l'époque que des hypothèses controversées. Il poursuit son analyse en affirmant que « la restitution à la Loire des eaux qu'elle a perdues n'a pas uniquement lieu à ciel ouvert par le Loiret ; elle a lieu en outre par des rentrées de fond dans le lit même de la Loire ».

Les diverses sources du Loiret sont des résurgences de la Loire.

En 1966 la ville d'Orléans et le ministère de l'Équipement ont fait réaliser par le BRGM un recensement des points d'eau. Sur les 1 271 points inventoriés, 712 ont été retenus pour des campagnes de mesures synchrones aboutissant à l'élaboration de cartes piézométriques [Desprez (1967)]. L'apport de ces informations est capital. Les cartes mettent en évidence l'existence de deux nappes, l'une libre dans les alluvions, l'autre captive dans le calcaire de Beauce, dont le niveau est supérieur de 0,5 mètre environ. La captivité de la nappe de Beauce est assurée, à l'est du méridien de Châteauneuf-sur-Loire, par la présence continue de formations imperméables (marnes de Blamont et formations de Sologne) sous les alluvions. À l'ouest en revanche, les niveaux des deux nappes semblent s'équilibrer du fait de la disparition des niveaux imperméables et des nombreux gouffres et forages qui connectent ces deux aquifères, mais la réaction des calcaires aux variations brusques de charge est plus rapide que dans les alluvions, introduisant des écarts ponctuels. Ce phénomène est important dans la prise en compte du risque d'inondations par remontée de nappe lors des crues de la Loire (cf. encadré p. 46). Les cartes de hautes et basses eaux de 1966 établissent le schéma de fonctionnement du système « bicouche ». Dans sa partie amont (est du méridien de Châteauneuf) la Loire draine les alluvions tandis qu'elle alimente la nappe alluviale et la nappe calcaire entre Châteauneuf et

► FONTIS DU FORAGE GÉOTHERMIQUE DE MELLERAY (SAINT-DENIS-EN-VAL, LOIRET)

Philippe Maget – Hydrogéologue – maget.philippe@wanadoo.fr

En 1979, le premier forage géothermique de Melleray (Saint-Denis-en-Val, Loiret) a démarré avec un outil de grand diamètre pour la traversée des terrains superficiels : alluvions et calcaire de Beauce. Cet outil était suspendu à des tiges de diamètre plus réduit. Vers 16 mètres de profondeur, l'outil a traversé une cavité conséquente : le fluide de forage s'est perdu immédiatement dans cette cavité et les alluvions qui surmontent le calcaire se sont alors engouffrées dans l'espace annulaire formé entre le trou de forage et les tiges. Le forage a créé un fontis artificiel. La plate-forme de forage en béton s'est affaissée en un large entonnoir d'un diamètre de plusieurs mètres au-dessus du vide qui s'est créé (*photo*). Le châssis de la tour de forage et des moteurs s'est trouvé suspendu, s'appuyant de chaque côté du fontis. Les foreurs ont senti le châssis de la tour vibrer, mais ont eu le temps de remonter l'outil avant d'évacuer le chantier. Une grue très puissante a tiré le châssis « tour-moteurs » hors de la zone du cratère. Le chantier a pu reprendre à côté, mais on prit la précaution d'enfoncer un tube de soutènement face aux alluvions et de bien l'ancrer dans le calcaire. ■



▲ **Perturbation de la plate-forme de Melleray (Loiret) : aspiration des sables par la Loire souterraine lors de la foration des calcaires de Beauce.**

Disturbances at the Melleray platform (Loiret Department): sands are sucked down by the underground course of the Loire when the Beauce limestone is drilled into.

© Bernard Herbrich, CFG.

Orléans. En aval d'Orléans, la nappe est à nouveau drainée par la Loire. La lithologie et l'épaisseur des alluvions sont complexes dans le Val, résultat d'une évolution polyphasée du dernier maximum glaciaire jusqu'à aujourd'hui. Les directions d'écoulement préférentiel qui se dégagent de la piézométrie de la nappe alluviale semblent coïncider avec d'anciens chenaux de la Loire qui ont occupé le centre et le sud de la plaine alluviale. Dans la nappe des calcaires, les directions d'écoulement mettent en évidence des axes de drainages préférentiels de direction globale est-ouest et nord-est sud-ouest, qui paraissent eux aussi en liaison avec les anciens lits de la Loire et qui correspondent probablement à d'anciennes pertes, comme le suggère la forme brusquement interrompue de certains de ces chenaux [Lepiller (2006)].

► REMONTÉES DE NAPPE DANS LE VAL D'ORLÉANS

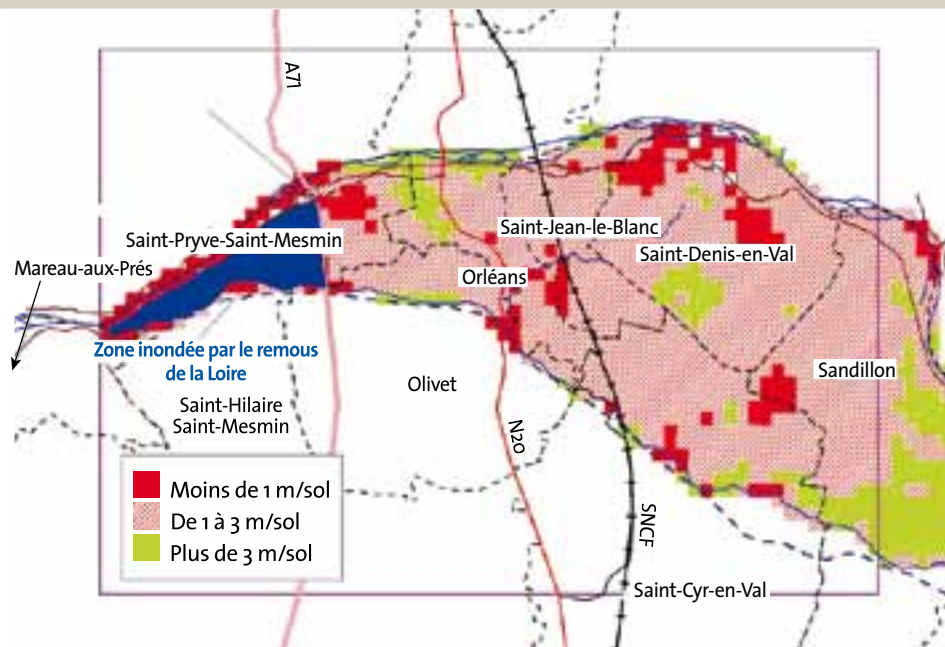
Jean-Claude Martin – BRGM – jc.martin@brgm.fr

Le Val d'Orléans est en grande partie situé en zone inondable. Pour faire face à ces risques, le plan de prévention du risque inondation (PPRI) réduit les risques en fixant les règles relatives à l'occupation des sols et à la construction des futurs biens. Il fixe aussi des prescriptions ou des recommandations applicables aux biens existants.

Mais à ces inondations de surface s'ajoutent les possibilités d'inondation du Val par des remontées de la nappe, causées par les infiltrations de la Loire sous les levées et par le ralentissement des écoulements de la nappe en période de hautes eaux.

Une inondation consécutive à une rupture de levée ou une surverse par-dessus la levée ou les déversoirs en amont d'Orléans représenterait un dommage potentiel de plusieurs milliards d'euros. La seule remontée de nappe peut aussi provoquer des dommages, certes moindres, mais aux conséquences indirectes lourdes, dont le coût peut être important. Aussi, se préoccuper du risque d'inondation par remontée de nappe pour mieux en identifier le niveau de risque et l'ampleur des atteintes potentielles est un enjeu local et régional important.

Une étude réalisée par le BRGM, avec le concours financier de l'Agence de l'eau Loire-Bretagne, a permis de dresser en 2003 la carte des remontées



de nappe dans le Val d'Orléans pour une crue de période de retour 100 ans (figure). Le secteur urbanisé compris entre la Loire et le Loiret est concerné par un tel phénomène, avec une nappe qui s'approcherait à moins d'un mètre du sol et toucherait de nombreux quartiers. Sensible à ce risque naturel, la Ville d'Orléans a créé en 2009-2010 un réseau de surveillance de ces remontées de nappe constitué de cinq piézomètres de suivi en continu des niveaux de la nappe. ■

▲ Niveau de la nappe par rapport au sol lors du maximum de la crue centennale de la Loire, sur le secteur correspondant à la zone urbanisée entre Loire et Loiret.

Depth of the aquifer with respect to ground level during the maximum of the centennial flood of the Loire for the zone of urban development between the Loire and Loiret Rivers.

© BRGM, Rapport BRGM/RP-52121-FR.

L'importance du karst du Val d'Orléans est aussi mise en évidence par les essais de traçages, réalisés sur ce système depuis plus d'un siècle. Félix Marboutin, ingénieur chimiste recherchant une ressource en eau pour la ville de Paris, réalise en 1901 les premières colorations des pertes de la Loire. L'eau du Loiret se colore à son tour après 65 heures de transit depuis un gouffre en Loire, à Sandillon. Cette technique et ces expérimentations ont été particulièrement développées à l'université d'Orléans par Michel Lepiller et son équipe (cf. encadré p. 47), grâce auxquels la création de la cellule CETRAHE à l'université, ou des travaux de recherche tel que le projet TRAC du BRGM pour l'amélioration des interprétations de ces essais (<http://trac.brgm.fr>) ont pu voir le jour. En basses eaux, la Loire laisse apparaître certaines de ces zones de perte, dont la localisation varie d'une année sur l'autre

sous l'effet des transports et dépôts de sédiments charriés par le fleuve (photo p. 42). En rive gauche de la Loire, certains petits affluents issus des sables et argiles de l'Orléanais se perdent également dans des gouffres, tel le ruisseau de l'Anche. Les différents types de traceurs injectés dans ces pertes ressortent une vingtaine de kilomètres plus loin dans les sources du Loiret, comme dans les captages d'eau potable de la ville d'Orléans.

Un système vulnérable

80 % de la ville d'Orléans et quelques communes voisines sont en effet alimentés en eau potable par trois ouvrages anciens (le puits du Gouffre, 1877 ; le puits Theuriet, 1894 ; le puits Bouchet, 1963) aux débits impressionnants (autour de 1 000 m³/h chacun). De

faible profondeur (entre 17 et 26 m), ils captent cette « Loire souterraine » dont les bras ont des directions complexes, en liaison avec la position du fleuve et son niveau durant la période quaternaire. Ce contexte de circulations peu profondes et rapides représente une menace pour la qualité de l'eau. La teneur en nitrates, paramètre « témoin » de contaminations anthropiques, est de 15 mg/l en moyenne (la limite de potabilité est de 50 mg/l) mais présente une forte variabilité avec des pics atteignant les 25 mg/l : des teneurs qui sont supérieures à celles enregistrées en Loire et démontrent la contribution des eaux d'infiltrations sur l'*impluvium*.

► TRAÇAGES ARTIFICIELS EN VAL D'ORLÉANS

Nevila Jozja – CETRAHE (Cellule R&D d'Expertise et de Transfert en Traçages Appliqués à l'Hydrogéologie et à l'Environnement), Université d'Orléans – nevila.jozja@univ-orleans.fr

La méthode des traçages artificiels, qui consiste à injecter dans le milieu hydrique des marqueurs permettant de suivre la circulation des eaux et de calculer les paramètres de transit, est née avec l'hydrogéologie karstique. L'objectif est d'obtenir une courbe de restitution du traceur en fonction du temps, grâce à un échantillonnage réalisé selon un pas de temps prédéterminé aux points d'émergence soupçonnés.

Dans leurs premières applications, à la fin du XIX^e siècle, les traçages ont été mis en œuvre pour prouver la relation entre des points d'injections et des points surveillés. Au fil du temps, les traçages ont été de plus en plus utilisés pour préciser les caractéristiques hydrauliques des liaisons mises en évidence, et simuler le transit de substances polluantes.

Aujourd'hui, cette méthode devient indispensable pour le suivi de la qualité et de la gestion de la ressource en eau. Elle est utilisée pour la caractérisation des systèmes hydrogéologiques et l'estimation de leurs ressources, mais aussi pour la délimitation des aires d'alimentation et des périmètres de protection des ouvrages d'alimentation en eau potable et pour les études de propagation des pollutions.

Le traçage artificiel a notamment permis de découvrir et de définir le système karstique du Val d'Orléans. L'hypothèse d'une relation étroite entre la Loire et les sources du Loiret avait été formulée dès le XVIII^e siècle (Fontenu 1736). Marboutin, en 1902, a été le premier à confirmer à l'aide de traçages à la fluorescéine l'existence dans le Val de pertes de la Loire et, parallèlement, de résurgences produisant l'essentiel du débit du Loiret. Les traçages ultérieurs (Lepiller 2006) ont précisé les liaisons entre ces pertes et les résurgences. Trois jours environ suffisent aux eaux perdues vers Jargeau pour atteindre la source du Bouillon, soit une vitesse moyenne de 200 m/h. ■

Bibliographie : Abbé de Fontenu (1736) – Réflexions historiques sur le Loiret. Mémoires de l'Académie Royale des Inscriptions et Belles Lettres, Tome XII, p.153-163. Marboutin F. (1902) – Rapport sur les eaux de la ville d'Orléans. Michau & Cie, Orléans, 13 p. Lepiller M. (2006) – Val d'Orléans. In: Aquifères et eaux souterraines en France, tome 1, J.-C. Roux (éd.), BRGM Éditions, p. 200-214.

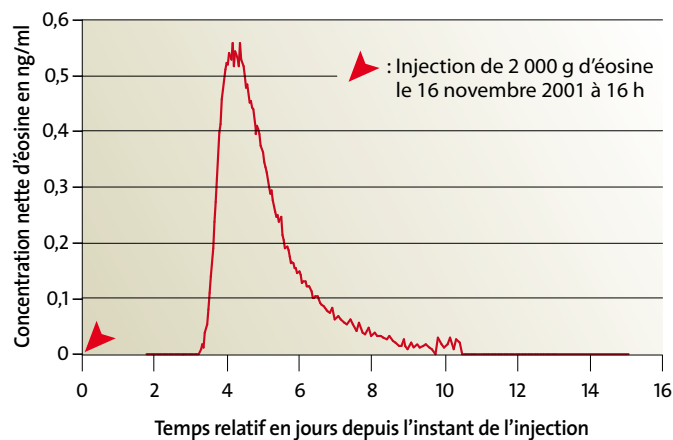
Traçage à partir d'une perte en Loire à proximité de Jargeau.

Dye tracing of a point of loss of the River Loire near Jargeau.



© J. Munrot.

© N. Jozja.



▲ Traçage de la perte des Moulins à Jargeau (restitution à la source du Bouillon).

Dye tracing from the Moulins swallow hole at Jargeau (re-emerging in the Bouillon spring).

© N. Jozja.

► L'EXPLORATION DE LA SOURCE DU BOUILLON. HISTOIRE D'UNE AVENTURE SPÉLÉOLOGIQUE

Philippe Boismoreau – Plongeur spéléologue – Association Spéléologie Subaquatique Loiret
Alexis Gutierrez – Hydrogéologue, BRGM – a.gutierrez@brgm.fr

Les gouffres de l'Abîme, du Bouillon ou de la Gèvre, à proximité du puits du Gouffre, ont excité la curiosité de nos ancêtres. En 1588, une tentative de sondage de l'Abîme se solde par un échec tandis que des travaux le comblent accidentellement en 1672. La « grande source » est immédiatement relayée par le Bouillon.

La Gèvre, aujourd'hui comblée, était « un gouffre dont on n'a jamais pu trouver le fond »⁽¹⁾. Il faut attendre les années 1970 et la plongée autonome pour voir les premières explorations de la source du Bouillon, utilisée pour l'entraînement des pompiers. Bertrand Léger et Daniel Saïm explorent les 180 premiers mètres, puis Francis et Éric Le Guen remontent le conduit karstique sur 770 mètres en 1980. Mais en octobre 1986, un accident met fin aux plongées. Il faudra attendre dix ans pour

qu'une autorisation permette à nouveau l'accès à des fins scientifiques.

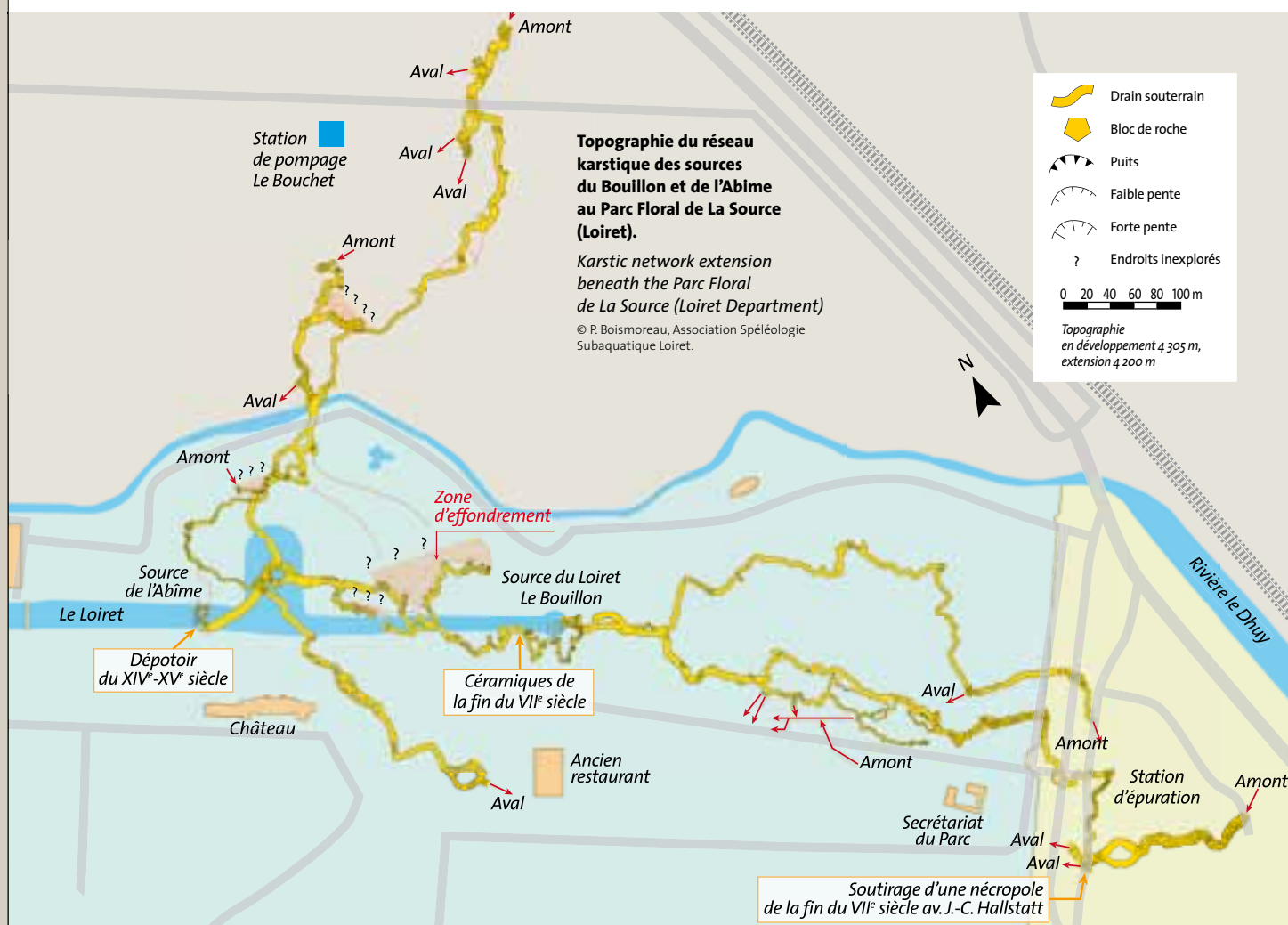
Philippe Boismoreau et Jacques Munérot entreprennent alors des investigations et, en 2000, désobstruent l'Abîme, qui retrouve sa fonction d'avant 1672. Le karst ainsi débouché est pénétrable et interconnecté avec le Bouillon et un ensemble de drains. Les explorations démontrent que le Bouillon correspond à des conduits secondaires connectés à un collecteur « grand comme un couloir de métro ». Ces observations sont cohérentes avec le fait que le débit des sources ne représente qu'un dixième du débit de la « Loire souterraine ».

Pendant une dizaine d'années, les plongées de Philippe Boismoreau, plongeur spéléologue autodidacte, vont aboutir à l'exploration de

5 980 mètres de galeries, dont 4 300 topographiées. L'exploration du karst du Loiret a probablement évité une catastrophe lors de la construction de la station d'épuration d'Orléans-La Source. En effet, Philippe Boismoreau a montré que des cavités importantes se trouvaient sous le projet et menaçaient sa stabilité.

La détermination de l'emplacement des conduits karstiques dans le sous-sol orléanais est donc d'utilité publique. Mais la plongée doit être relayée par des méthodes indirectes comme la géophysique, afin de compléter l'exploration aux endroits inaccessibles par l'homme, même le plus intrépide. ■

(1) – Quatre jours à Orléans de D.-T. Emmanuel (1845).



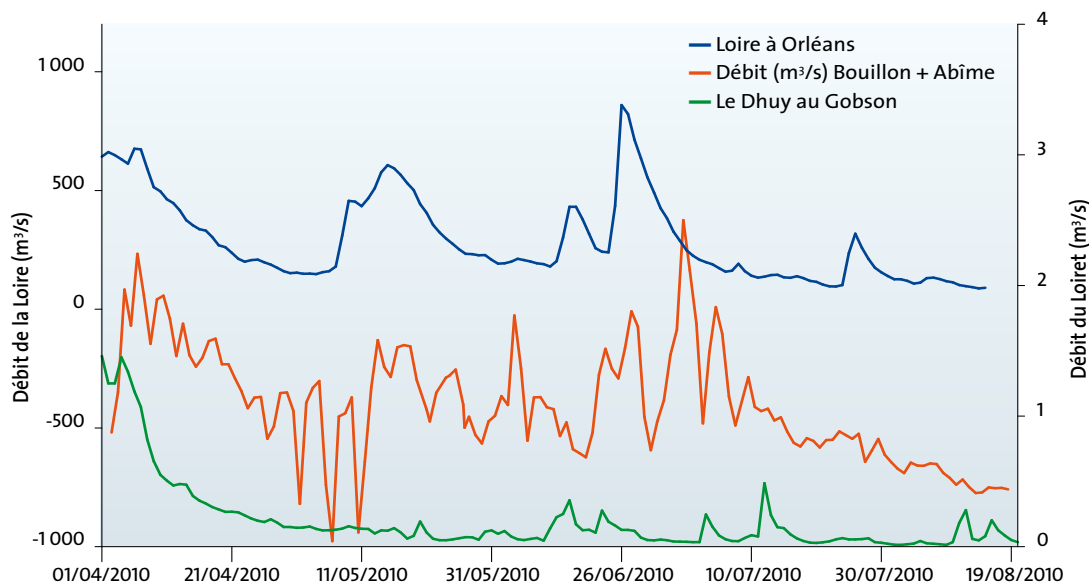


Fig. 1 : Débits moyens journaliers de la Loire, des résurgences du Bouillon et de l'Abîme et du Dhuy, affluent du Loiret. À deux reprises, les 6 et 10 mai 2010, le sens du courant s'est probablement inversé quelques heures.

Fig. 1: Mean daily discharge for the Loire River, the Bouillon and l'Abîme resurgences, and of the Dhuy River, a Loiret tributary. On two occasions, 6 and 10 May 2010, the current probably changed direction for a few hours.

Source : OSUC (Observatoire des Sciences de l'Univers en Région Centre), Orléans.

Les sources du Bouillon et de l'Abîme, sises dans le parc Floral, sont considérées à juste titre comme les résurgences principales des pertes de la Loire. Elles constituent les premières et principales sources du Loiret. Les cavités dont elles sont issues ont été explorées par les plongeurs de l'association de spéléologie subaquatique du Loiret et, en particulier, par Philippe Boismoreau, qui en a dressé une topographie détaillée et exploré environ 6 km de galerie (cf. encadré p.48).

La chronique de débits des sources du Loiret commence en 1901 et comprend quelques mesures ponctuelles tout au long du siècle. Depuis 2009, cette chronique a été automatisée par l'ISTO. Les débits du Loiret évoluent globalement avec ceux de la Loire (figure 1). À cette tendance générale s'ajoutent des variations de débit plus rapide, corrélées à celles du Dhuy, principal affluent du Loiret, en réponse aux précipitations sur l'impluvium local. Ainsi, le débit du Loiret est le produit d'une dynamique générale (la Loire) et d'une influence locale (le Dhuy). Certains jours, le sens du courant peut s'inverser. L'eau du Loiret (et de son affluent le Dhuy) se perd alors dans l'Abîme et le Bouillon [Albéric (2004)]. Cette inversion de circulation représente une menace pour les captages d'eau potable voisins, mais ces épisodes sont généralement très courts (quelques heures à quelques jours). Les inversions de courant se déclenchent lorsque le niveau de la Loire est bas et que se produit un épisode de pluie intense dans le bassin du Dhuy, entraînant une augmentation brutale de son niveau et de ses écoulements. Sur les vingt dernières années, la fréquence d'apparition des

inversions de courant est contrôlée par les variations relatives entre la pluviométrie locale (qui contrôle le niveau du Dhuy) et régionale (qui contrôle celui de la Loire). Il est donc légitime de s'interroger sur l'évolution d'un tel phénomène dans l'avenir, en fonction des différents scénarii climatiques possibles [Joigneaux *et al.* (2008)].

Essai de bilan

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

“ Ces circulations représentent une menace pour la qualité de l'eau. ”

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 est de 284 km². Il déborde sur le coteau de Sologne. 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 (figure 2). 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 lesquels 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 1 10⁶ m³/an.

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 m³/s pour des débits de la Loire inférieurs à 500 m³/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). En étudiant la crue de la Loire de juin 1992 ayant atteint 1 600 m³/s, une modélisation hydrodynamique [Joodi (2009)] calcule un débit de perte de 25 m³/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

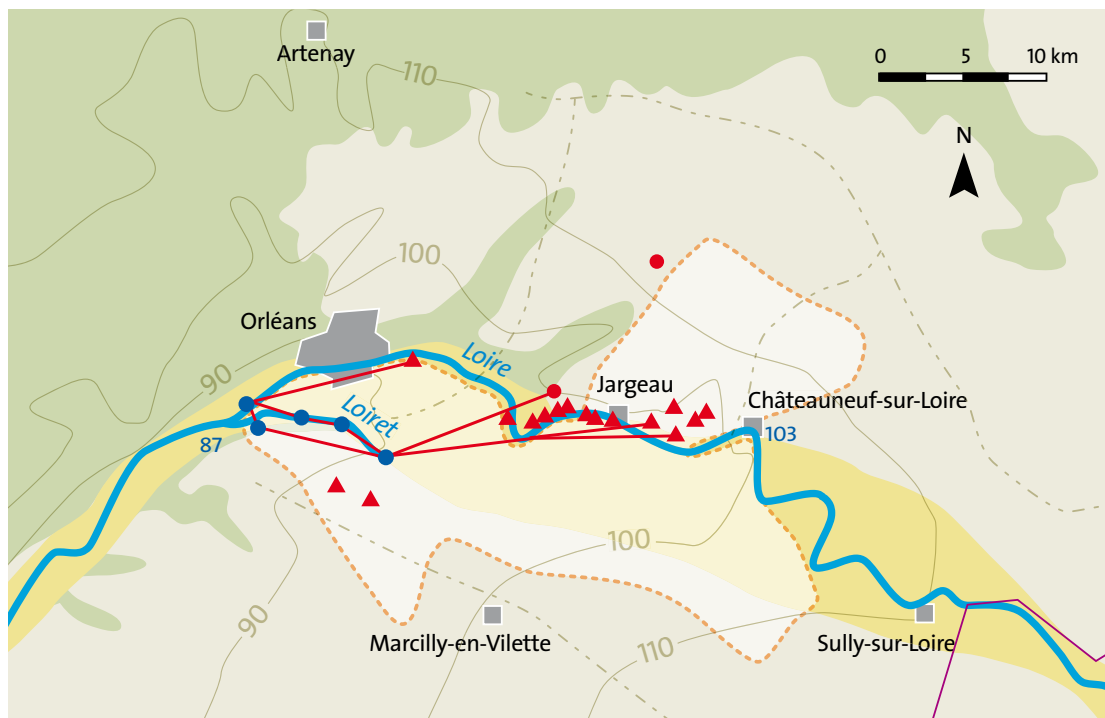


Fig. 2 : Plan de situation montrant le Val d'Orléans, le Bassin versant topographique et hydrogéologique du système pertes-résurgences de la Loire.

Fig. 2: Location map showing the Orléans Valley, the topographical catchment area and the hydrogeology of the Loire and the watershed leakage and resurgence system.

© S. Binet, A. Gutierrez.

- | | | |
|--|--|---------------------------------------|
| ■ Alluvions du Val | ■ Cours d'eau et altitude (en mètre) | — Connexion démontrée par colorations |
| ■ Burdigalien (peu perméable) | ■ Piézométrie et altitude (en mètre) | ■ Bassin versant topographique |
| ■ Aquitainien (calcaire de Beauce) | — Lignes de crêtes piézométriques | |
| ▲ Pertes et forages absorbant dans le bassin versant du Loiret | — Limite Est d'extension des calcaires | |

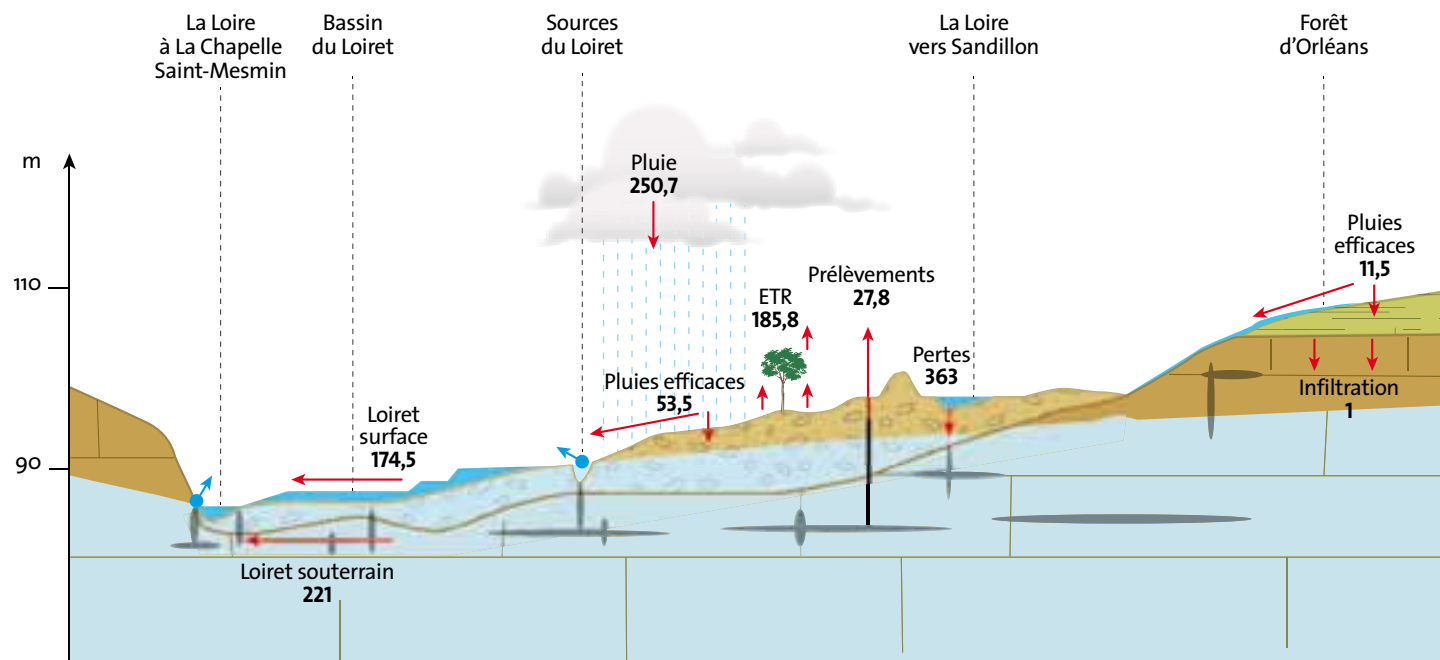


Fig. 3 : Essai de quantification actualisée des termes du bilan ($10^6 \text{ m}^3/\text{an}$).

Fig. 3: An attempt at updated quantification of the water budget ($10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$).

© S. Binet, A. Gutierrez.

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). En retranchant la contribution de la Beauce en rive droite, calculée grâce à l'utilisation de traceurs naturels [Gonzales (1991)], on estime que le drainage de l'aquifère karstique des calcaires sous le Val d'Orléans représente au maximum 55 % des débits de l'ensemble du système Loiret surface et souterrain (étiage 1986). 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 (figure 3). 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. ■



The Loire River beneath the Surface: Karst Circulation Patterns in the Orléans Valley

In the Orléans Valley, the Loire River flows through an alluvial plain with fairly level topography. The Beauce limestone underlies the Quaternary alluvial deposits at shallow depth. The river loses part of its discharge to infiltration, thereby creating groundwater circulation. Beneath the valley, the mildly acidic waters of the Loire have excavated a particularly well-developed karst network. Its presence is evidenced by large numbers of sinkholes which form through sudden subsidence of the ground surface. In the limestone, the directions of flow reveal preferential drainage orientations which seem related to earlier Loire riverbeds. Tracers injected at leakage points re-emerge some twenty kilometres further down in the Loiret headwaters as well as in drinking-water catchments for the city of Orléans. This context of rapid, shallow circulation patterns presents a threat to groundwater quality. Overall, discharges of the Loiret River change in pace with those of the Loire. Adding into this general tendency are shorter-term variations in discharge that correlate with precipitation falling on the local intake area. According to the respective weight of these two contributions, the direction of flow may reverse in the Loiret's upstream portion. The hydrological balance equals out if we take into account an intake to the system of 106 m³/yr. Leakage from the intake area of the Valley thus appears to represent 17% of the flow of the Loiret River. However, a large degree of uncertainty remains, essentially due to measures of Loire discharge rates during periods of flooding.

► POLLUANTS ÉMERGENTS EN VAL D'ORLÉANS

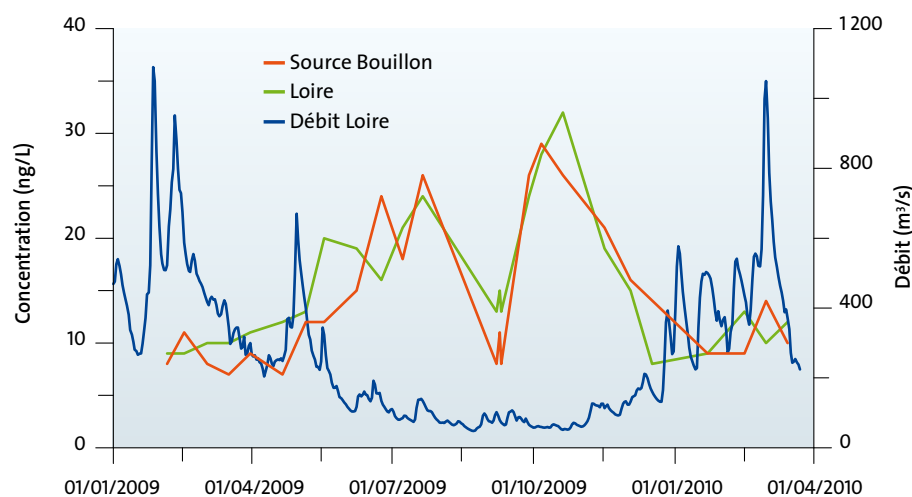
Nicole Baran – Service EAU, BRGM – n.baran@brgm.fr

Le terme générique de « polluant émergent » regroupe les polluants d'origine chimique ou biologique, généralement sans statut réglementaire. Il s'agit bien souvent de molécules pas nécessairement d'usage récent, mais nouvellement recherchées et pour lesquelles les données (éco)toxicologiques et environnementales sont rares. Sont notamment concernés certains stéroïdes, des médicaments soumis ou non à des prescriptions médicales (antibiotiques, hormones) à usage humain ou vétérinaire, les produits de dégradation de détergents non ioniques (composés du nonyl- et octyl-phénol) ou de pesticides, de désinfectants, des phtalates, des retardateurs de flamme, des antioxydants, les nanoparticules, etc. D'un point de vue réglementaire (Directive Cadre européenne sur l'Eau – DCE ou alimentation en eau potable) et bien que de nombreuses interrogations émanent des différents gestionnaires et décideurs, il n'y a pas à ce jour d'obligation de surveillance des eaux.

L'amélioration constante des techniques analytiques offre maintenant la possibilité d'établir des états des lieux de contamination mais aussi d'entreprendre des études environnementales incluant la caractérisation de la contamination

des eaux souterraines, l'étude des processus de transfert et le devenir de ces substances. Ce type d'étude permettra d'apporter les premiers éléments de réponse aux nombreuses questions posées sur le risque environnemental.

Ainsi, des études sur la présence de substances pharmaceutiques dans les eaux souterraines et de surface du bassin Loire-Bretagne ou sur le transfert des médicaments et des produits phytosanitaires dans le Val d'Orléans-Loiret ont été initiées et sont en cours de réalisation au travers de projets de recherche ou d'une thèse avec l'université d'Orléans financée par le BRGM et la région Centre. À titre d'exemple, le suivi bimensuel de la qualité des eaux de la Loire au niveau de Jargeau et de la source du Bouillon révèle la présence continue de la carbamazépine, un antiépileptique connu pour être peu éliminé par les stations d'épuration (STEP). Les fluctuations temporelles de concentrations montrent globalement une anti-corrélation avec le débit, signifiant que les flux, et donc les émissions dans l'environnement probablement via les effluents de STEP, sont en conséquence relativement constants au cours de l'année. ■



▲ Suivi bimensuel des concentrations en carbamazépine dans la Loire au niveau de Jargeau et dans la source du Bouillon.

Fortnightly monitoring of carbamazepin concentrations in the Loire at Jargeau and the Bouillon spring.

© N. Baran.