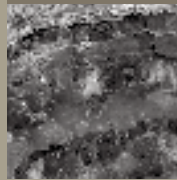




Géologie du bassin
de la Loire
PAGE 10



Les zones humides,
un patrimoine
remarquable
PAGE 68



Les richesses minérales
de la Loire
PAGE 100

LA REVUE DU BRGM POUR UNE TERRE DURABLE
BRGM's journal for a sustainable Earth

géo**sciences**

N° 12 ► DÉCEMBRE 2010 ► 8€

**La Loire,
Agent
géologique**



Géosciences pour une terre durable

brgm

En couverture :
La géologie détermine
le cours du fleuve et
les paysages naturels
et construits.

Confluence de la Loire
et de la Vienne
(Candes-Saint-Martin,
Indre-et-Loire).

Geology determines the river course
and natural and built landscapes.
Junction between the Loire and
the Vienne Rivers
(Candes-Saint-Martin,
Indre-et-Loire Department).

© David Darrault.

- 03  **Édito Mission Val de Loire** - *JACQUES AUXIETTE, FRANÇOIS BONNEAU*
- 05  **Édito Établissement public Loire** - *JEAN GERMAIN*
- 06  **Le mot du rédacteur en chef** - *JACQUES VARET*
- 08  **Introduction scientifique** - *JEAN-PAUL BRAVARD*
- 10  **Géologie du bassin de la Loire** - *PIERRE NEHLIG*
- 24  **La Loire : de la carrière au monument** - *DANIEL PRIGENT*
- 34  **Que nous apprennent les vestiges des (très) vieux ponts de la Loire ?** - *ANNIE DUMONT*
- 42  **La Loire souterraine : circulations karstiques dans le Val d'Orléans** - *ALEXIS GUTIERREZ, STÉPHANE BINET*
- 54  **La Loire, usine à carbonates**
CÉCILE GROSBOIS, JEAN-GABRIEL BREHERET, FLORENTINA MOATAR, PHILIPPE NÉGREL
- 60  **Signatures géochimiques de la Loire**
PHILIPPE NÉGREL, SÉTAREH RAD
- 68  **Les zones humides, un patrimoine remarquable**
LUCIEN MAMAN, LAURENT VIENNE
- 78  **La Loire à l'épreuve du changement climatique**
FLORENTINA MOATAR, AGNÈS DUCHARNE, DOMINIQUE THIÉRY, VINCENT BUSTILLO, ÉRIC SAUQUET, JEAN-PHILIPPE VIDAL
- 88  **Les atouts énergétiques du bassin de la Loire**
VINCENT BOUCHOT, PHILIPPE CALCAGNO, ALBERT GENTER
- 100  **Les richesses minérales de la Loire**
JEAN-PIERRE CARROUÉ
- 112  **Tableau géographique des paysages ligériens**
RÉGIS BARRAUD, NATHALIE CARCAUD, HERVÉ DAVODEAU, DAVID MONTEMBAULT
- 122  **Tribune - Imprévisible Loire !** - *NICOLAS FORRAY*
- 124  **Tribune - Le Val de Loire inscrit au patrimoine mondial de l'Unesco.**
DOMINIQUE TREMBLAY
- 126  **Points de vue croisés - Qu'est-ce qui fait la valeur de la Loire ?**
YVES DAUGE, ROBERTO EPPLÉ
- 130  **Chiffres clés**
- 131  **Brèves**

**Montsoreau, confluence
Loire/Vienne.
Constructions en tuffeau
de Touraine.**

*Montsoreau, junction
between the Loire and
the Vienne Rivers. Buildings
made of Touraine tuffeau.*

© Laurent Massillon




Jacques Auxiette

PRÉSIDENT DE LA RÉGION PAYS DE LA LOIRE
 PRÉSIDENT DE LA MISSION VAL DE LOIRE,
 PATRIMOINE MONDIAL DE L'UNESCO


François Bonneau

PRÉSIDENT DE LA RÉGION CENTRE
 VICE-PRÉSIDENT DE LA MISSION VAL DE LOIRE,
 PATRIMOINE MONDIAL DE L'UNESCO

La Loire, socle pour un développement économique, social et culturel

Les régions Centre et Pays de la Loire sont en grande partie situées dans le bassin versant de la Loire. La Loire, plus long fleuve de France, y coule sur 600 kilomètres, depuis Cuffy dans le Cher jusqu'à son estuaire sur la façade atlantique.

Nos régions sont donc fortement impliquées dans la définition et la mise en œuvre des politiques publiques liées au fleuve, que ce soit celles développées dans le cadre du Plan Loire Grandeur-Nature, de l'Établissement public Loire ou de l'Agence de l'eau Loire-Bretagne.

Nos régions accompagnent également l'inscription sur la Liste du patrimoine mondial de l'Unesco d'un paysage culturel évolutif et vivant de 280 kilomètres de long qu'elles s'efforcent de préserver et de mettre en valeur.

Les dix ans de cette inscription font l'objet de différentes manifestations telles que des débats, des expositions, des sessions de formations de guides touristiques ou encore des ateliers pour sensibiliser les acteurs aux paysages.

Notre mission est d'y insuffler un dynamisme et d'accompagner le développement économique, touristique, agricole et viticole, culturel, pour permettre aux habitants d'y vivre agréablement. Tout l'enjeu est de faire converger, à l'échelle d'un territoire, les enjeux de conservation, de valorisation et de développement.

La Loire à vélo, ce sont ainsi bientôt 800 km de pistes cyclables, sécurisées et balisées, entre Saint-Brévin-les-Pins (Loire-Atlantique) et Cuffy (Cher), qui permettent de découvrir les paysages et patrimoines des bords de Loire, tout en faisant vivre les territoires traversés par un tourisme renouvelé et plus respectueux.

La Loire et les enjeux dont elle est porteuse constituent un axe de coopération entre les deux régions basé sur une véritable stratégie interrégionale et des initiatives coordonnées dans de nombreux domaines.

La Mission Val de Loire, que nous présidons en alternance, a ainsi un rôle essentiel, à l'échelle des deux Régions qui la portent, pour construire un projet partagé autour de la reconnaissance internationale que nous a apportée l'Unesco.

Au-delà, notre soutien à l'Établissement public Loire, qui a tenu récemment son quatrième rendez-vous annuel entre la communauté scientifique et les gestionnaires ligériens, témoigne de notre volonté de faire progresser la connaissance autour du fleuve, que ce soit en ce qui concerne son fonctionnement et les phénomènes physiques associés ou en termes d'identité fluviale et de culture du risque.

Ce numéro spécial de *Géosciences* consacre la Loire comme un agent géologique. Elle est ce substrat géographique et géophysique. Et elle est aussi un socle pour un développement économique, social et culturel.

**Le Cher dans la partie
amont de son cours.**

*The Cher River in
its upper course.*

© EP Loire.





Jean Germain

PRÉSIDENT
DE L'ÉTABLISSEMENT PUBLIC LOIRE

Adosser aux résultats de la recherche les actions d'aménagement, de développement et de gestion du bassin de la Loire et de ses affluents

C'est l'une des priorités pour les partenaires du plan Loire pour la période 2007-2013, avec l'ambition de faire du bassin de la Loire et ses affluents une référence européenne en matière de gestion d'un grand fleuve et de son bassin versant (à l'échelle d'un cinquième du territoire français).

De manière concrète, les collectivités membres de l'Établissement public Loire [7 régions, 16 départements, 18 villes et agglomérations, 9 syndicats intercommunaux (SICALA)] ont accepté que celui-ci anime et soutienne les actions de développement et de partage d'une connaissance globale, fondamentale et opérationnelle du bassin de la Loire et ses affluents, regroupées à travers trois mots « recherche/données/information ».

Ces actions sont menées dans une triple logique de solidarité, de subsidiarité et d'économie d'échelle, mobilisant l'effet levier des crédits européens (FEDER) au bénéfice de l'ensemble des partenaires. Elles se déclinent sur l'ensemble du bassin, avec des interventions d'équipes de recherche de tout le territoire national, en s'appuyant sur l'expertise du Conseil scientifique du plan Loire grandeur nature composé de personnalités françaises et d'autres pays européens.

Les actions de recherche retenues dans le cadre du plan Loire (déjà 44 projets de recherche lancés depuis 2007, dont 14 thèses), doivent coïncider avec les besoins des acteurs explicités à travers la préoccupation centrale du plan Loire, à savoir la réduction de la vulnérabilité aux inondations, à la sécheresse, des espaces et espèces patrimoniales du bassin de la Loire et ses

affluents. C'est ainsi que de nombreux champs disciplinaires sont investis, comme en témoignent certains des projets présentés dans ce numéro.

Parmi les actions mises en œuvre par l'Établissement public Loire, la montée en charge du plateau collaboratif d'échange intranet/internet du plan Loire (www.plan-loire.fr) est particulièrement structurante et innovante. L'objectif est de recenser, organiser et rendre accessibles les données et informations sur le bassin fluvial, en s'appuyant sur les nombreux éléments existants, pour faciliter et stimuler la communication entre les acteurs du plan Loire, les partenaires et le public s'intéressant à la Loire.

De même, le rendez-vous annuel entre la communauté scientifique et les gestionnaires ligériens constitue un élément déterminant pour contribuer aux échanges entre recherche/communauté scientifique, recherche/industrie et recherche/société, et pour favoriser la valorisation des résultats de la recherche ligérienne et du capital scientifique ligérien, à des fins opérationnelles. Ainsi, la troisième édition de ce rendez-vous, qui s'était tenue le 6 novembre 2009 à Saint-Étienne, avait pour thème la « valorisation des résultats de la recherche sur la gestion intégrée des fleuves ». C'est précisément suite à la présentation, lors de cette manifestation, du projet d'un numéro spécial de la revue *Géosciences* consacré à la Loire, que la collaboration entre le BRGM et l'EP Loire a été formalisée, avec la conviction que ce numéro contribuera à l'objectif de valorisation et de partage des connaissances que nous portons.



Jacques Varet

CONSEILLER DU PRÉSIDENT,
BRGM
j.varet@brgm.fr

06

LE MOT DU RÉDACTEUR EN CHEF

Des Cévennes à l'Atlantique

La Loire, l'un des derniers « fleuves sauvages » d'Europe, berceau de nombreux épisodes clés de l'histoire de France, et dont la partie centrale du cours est classée au patrimoine mondial de l'humanité, est surtout un agent géologique. C'est à ce titre que la revue *Géosciences* a choisi de consacrer son numéro 12 à ce fleuve, qui a pour particularité de trouver son origine dans la partie « cévenole » (au moins au plan climatique) du Massif central avant de traverser, dans les plaines en aval, une grande diversité de formations géologiques avec lesquelles il interagit. La partie la plus majestueuse du cours du fleuve et de ses affluents, sous influence atlantique, occupe le quart sud-est du bassin de Paris, pour finalement traverser le sud du Massif armoricain.

formations hercyniennes à l'aval et jusqu'à l'estuaire, au nord du seuil du Poitou, les caractéristiques du cours moyen sont largement déterminées par la traversée de formations sédimentaires mésozoïques et cénozoïques souvent caractérisées par des calcaires en interaction hydrogéologique puissante avec le fleuve, du fait de leur nature karstique (une partie du flux de la Loire étant alors souterraine).

Ces variations dans la composition des roches encaissantes confèrent à la Loire des caractéristiques hydrogéochimiques très variables, entre eaux acides issues des socles à l'amont, dissolvant les calcaires des plaines du centre et eaux carbonatées déposant de la calcite à la sortie des karsts. Sans négliger les

La diversité et la qualité des paysages sont largement déterminées par la géologie.

Née dans les formations volcaniques, notamment phonolitiques et basaltiques, du Velay et du Mezenc, c'est dans les massifs cristallins et les fossés lacustres des « Limagnes » qui ont préfiguré son cours et celui de ses principaux affluents, tel l'Allier, que se développe la partie haute du fleuve. Le bassin amont de la Loire érode ainsi tout le versant nord du Massif central, alimentant de puissants systèmes détritiques, qui ont épanché des sables et des granulats dans de vastes parties du Bassin parisien, jusqu'au-delà du cours actuel de la Seine. Si l'on retrouve les

eaux de sources, souvent thermo-minérales de la partie amont, émergeant notamment dans les Limagnes, en particulier à la faveur de leurs failles limitrophes, qui constituent une des richesses du bassin.

Le *substratum* rocheux détermine aussi les variations remarquables des caractéristiques de l'habitat et des constructions humaines, notamment des monuments historiques, qu'il s'agisse des murs de granites et des toits de lauzes phonolitiques dans la partie amont du bassin, des blocs taillés pour les





maisons, les châteaux et les ponts dans les calcaires de Beauce et des tuffeaux de Touraine, des briques solognotes ou encore des ardoises des toitures à l'aval. Les recherches en préhistoire montrent le développement initial de l'occupation humaine, notamment troglodyte, le rôle du fleuve et les solutions adoptées pour son franchissement. L'histoire industrielle du bassin, qui marque encore la diversité de sa géographie humaine, a été largement déterminée par les ressources du sous-sol, qu'il s'agisse du charbon ou des métaux, ou plus récemment des stockages souterrains de gaz ou des futurs stockages de CO₂. L'énergie est aujourd'hui encore fortement présente dans le bassin de la Loire avec de nombreux ouvrages hydroélectriques et surtout cinq centrales nucléaires. Quant à son important potentiel géothermique, il est en cours de développement.

Plus généralement, et même en zones rurales, la biodiversité et l'occupation des terres et en définitive la diversité et la qualité des paysages sont largement déterminées par la géologie, et ce qu'il s'agisse des zones de bocages et d'élevage en terrain cristallin, de l'agriculture irriguée pour le maraîchage en terrains sédimentaires et dans les plaines alluviales récentes, ou encore des coteaux viticoles au sud ou des forêts des terrasses de Sologne ou du nord de la Loire. Sans oublier les zones humides, les tourbières et les autres habitats naturels des falaises bordant le fleuve.

Du fait de la diversité des zones climatiques impactant son bassin et de la diversité de son *substratum*, la Loire est aussi un agent actif en matière de risques naturels, que ce soit pour les étiages ou les inondations. Certains terrains

alluviaux argileux peuvent être affectés par les risques de retrait des argiles, tandis que les crues peuvent altérer de nombreuses zones de plaine alluviale dans la partie centrale ou aval, notamment plusieurs agglomérations urbaines dont l'urbanisme s'est développé ces dernières années en zones inondables.

La Loire et son *substratum* géologique constituent bien le « socle pour un développement économique, social et culturel » de l'ensemble du bassin. Ce douzième numéro de la revue *Géosciences* convaincra nos lecteurs que ce socle n'a pas fini de fournir aux hommes les ressources nécessaires à un développement à la fois diversifié, harmonieux et durable. ■



Le pont de Beaugency lors de la crue du 3 décembre 2003. Le pont d'origine médiévale est construit en calcaire de Beauce et a fait l'objet de nombreuses restaurations.

The bridge at Beaugency during the 3 December 2003 flood. The original medieval bridge is built of Beauce limestone and has undergone repeated restorations.

© P. Nehlig, BRGM Im@gé



Le numéro spécial sur la Loire et son bassin que propose la revue Géosciences est important à plus d'un titre. Il met en effet en perspective des éléments fréquemment traités de manière disjointe et qu'il a le mérite de rapprocher, ce qui est toujours utile à la réflexion.



Jean-Paul Bravard

PROFESSEUR DE GÉOGRAPHIE

UNIVERSITÉ DE LYON ET INSTITUT
UNIVERSITAIRE DE FRANCE

PRÉSIDENT DU CONSEIL SCIENTIFIQUE
DU PLAN LOIRE.

Jean-paul.bravard@univ-lyon2.fr

Le Haut Allier s'écoulant dans le socle métamorphique en aval de Langogne (Lozère).

The upper Allier River flowing through the metamorphic basement downstream from Langogne (Lozère Department).

© S. Rad.

Héritages et Paysages d'un grand fleuve

En premier lieu, la Loire, ce très ancien « agent géologique » est inscrit comme ses affluents dans l'épiderme du Massif Central, du Bassin parisien et du Massif armoricain. Le cours amont paraît aujourd'hui d'une stabilité que rien n'a pu ébranler, la Loire et l'Allier drainant de hauts terrains cristallins et métamorphiques qui enserment eux-mêmes des bassins alluviaux menus ; l'histoire tectonique du bassin rend compte de changements de tracé d'époque tertiaire qui ont affecté même les hautes terres et ont fait confluer le long fleuve avec la Seine. La plate-forme continentale, qui prolonge l'estuaire vers le large, bien au-delà du dessin hydrographique actuel, manifeste les effets des changements globaux et nous rappelle les variations majeures du niveau marin qui ont allongé et raccourci la

Loire, ce dont les 1 012 kilomètres des manuels et des guides ne rendent pas compte.

Cette instabilité d'échelle géologique, qui explique beaucoup de particularités que ce volume ne peut toutes développer, se lit de manière discrète dans le sillon fluvial. La Loire a dissous depuis des millions d'années les roches de son bassin versant, en particulier les roches carbonatées des assises sédimentaires encaissantes du Bassin parisien. La Loire, c'est un flux d'eau et de particules en suspension ou charriées (du sable et de la matière organique), mais c'est aussi un flux géochimique essentiel à la vie des écosystèmes fluviaux et marins. Les « boires » et les remontées de nappe du Val d'Orléans sont les manifestations remarquables d'écoulements souterrains et des résurgences





▲ **L'estuaire de la Loire et la ville de Saint-Nazaire.** *The Loire estuary and the city of Saint-Nazaire.* © Ouroboros, Static.panoramio.com.

du vaste flux hydrique qui depuis des millions d'années dissout, taraude et construit, comme le précisent les chercheurs. Cette eau pure est précieuse en tant que ressource pour les communautés riveraines, mais elle est menacée par diverses pollutions. Des contributions montrent que cette longue histoire géologique fait peser quelques menaces sur la stabilité des levées qui enserrant le cours de la Loire depuis des siècles et sur d'éventuelles remontées phréatiques en arrière des ouvrages de protection. La connaissance du lit fluvial s'enrichit ainsi de la prise en compte de l'enveloppe fluviale dont l'histoire est bien plus longue que celle du chenal holocène et dont les héritages gagnent à être connus. Dans ce patrimoine fluvial et périfluvial entrent en ligne de compte des installations humaines telles que les ponts romains et médiévaux en majorité construits en bois.

La Loire est aussi un agent actif, inscrit dans les dynamiques naturelles contemporaines ;

c'est sous cet aspect tout à la fois favorable et dangereux qu'on la connaît le mieux. Les étiages sont des périodes critiques pour la dilution des pollutions et le refroidissement des centrales nucléaires qui fonctionnent pendant l'été grâce au soutien d'étiage assuré par le barrage de Villerest. Les crues font l'objet d'un nombre important d'études hydrologiques et de mesures destinées à les prévenir ou à réduire leurs effets négatifs, notamment dans le cadre du Plan Loire. L'eau assure la biodiversité à tous les niveaux, des mouillères et hautes tourbières acides jusqu'au système péri-estuarien, en passant par les chenaux et zones périfluviales sous influence de la nappe et du régime fluvial. L'histoire morphodynamique de la Loire explique la diversité des formes et des annexes qui sont le support de la biodiversité. Le fleuve est enfin le vecteur du transport fluvial qui depuis des siècles, exporte les ressources du bassin vers les sites fluviaux et vers Paris : la pierre de construction (granite, craie, tuffeau et calcaire de Beauce, ardoise

armoricaine), le bois des bateaux et le charbon des hauts bassins houillers, tels ceux du bassin stéphanois chargés sur les « rambertes » foréziennes. On saisit bien l'indissociable lien qui existe entre la géologie du bassin versant et le fleuve.

En conclusion de ce volume vient la notion de patrimoine paysager. Un paysage « réussi », comme l'on dirait d'une peinture, ne procède pas de substitutions brutales, mais d'additions patientes, touches respectueuses du passé, fondues dans un ensemble harmonieux. Les paysages ligériens, dont la qualité leur a valu classement au Patrimoine mondial de l'humanité, possèdent cette singulière capacité d'osmose, comme si les lieux savaient rendre visible à échelle humaine la très longue histoire d'un bassin et d'un fleuve. Ce n'est pas le moindre mérite de ce numéro spécial que de le rappeler. ■

prochain numéro ► juin 2011

Le rôle de l'eau dans le Système Terre

Grotte
du Cirque
(Assier, Lot).

© J.-F. Fabriol.

Abonnez-vous à *Géosciences* sur notre site Internet : www.brgm.fr



Siège
Tour Mirabeau, 39-43 quai André-Citroën
75739 Paris Cedex 15 - France
Tél. : (33) 1 40 58 89 00 - Fax : (33) 1 40 58 89 33

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin - BP 36009
45060 Orléans Cedex 2 - France
Tél. : (33) 2 38 64 34 34 - Fax : (33) 2 38 64 35 18



www.brgm.fr

