



Les atouts énergétiques du bassin de la Loire

Vincent Bouchot, Philippe Calcagno, Albert Genter

► To cite this version:

Vincent Bouchot, Philippe Calcagno, Albert Genter. Les atouts énergétiques du bassin de la Loire. Géosciences, 2010, 12, pp.88-93. hal-01059318

HAL Id: hal-01059318

<https://brgm.hal.science/hal-01059318>

Submitted on 29 Aug 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

La Loire et ses affluents contribuent à la production d'électricité d'origine nucléaire, hydraulique et thermique et au stockage de gaz en aquifère profond. Le bassin de la Loire offre en outre des conditions géologiques favorables au développement de la géothermie. Les volcans récents du nord du Massif central offrent des perspectives pour la production d'électricité tandis que les aquifères sédimentaires profonds sont à des températures adaptées à la production de chaleur. Quant aux roches profondes du socle hercynien, supportées par la technologie EGS (*Enhanced Geothermal System*), elles pourraient être propices à une production combinée d'électricité et de chaleur.

Les atouts énergétiques du bassin de la Loire



88

GÉOTHERMIE



Vincent Bouchot

BRGM, DÉPARTEMENT GÉOTHERMIE, ORLÉANS.
v.bouchot@brgm.fr

Philippe Calcagno

BRGM, DÉPARTEMENT GÉOTHERMIE, ORLÉANS.
p.calcagno@brgm.fr

Albert Genter

GEIE, EXPLOITATION MINIÈRE DE LA CHALEUR,
KUTZENHAUSEN, FRANCE.
genter@soultz.net

La Loire et son bassin versant possèdent diverses caractéristiques hydrographiques et géologiques, permettant la coexistence de multiples formes de production d'énergie. Dans la partie amont du fleuve, c'est-à-dire dans la zone de reliefs la plus accidentée, on y a construit des barrages hydrauliques (*encadrés p. 95 et 99*). Au niveau de son lit intermédiaire, plusieurs centrales nucléaires (*encadré p. 92*) utilisent l'eau du fleuve pour le refroidissement. Près de Nantes, la centrale thermique de Cordemais, l'une des principales sources d'électricité de la Bretagne, fonctionne au charbon (*encadré p. 96*) et au fuel. D'amont en aval, la Loire présente des contextes géologiques variés, favorables au développement de ressources géothermiques, allant de la très basse à la haute température et également du stockage de gaz en aquifère (*encadré p. 93*).

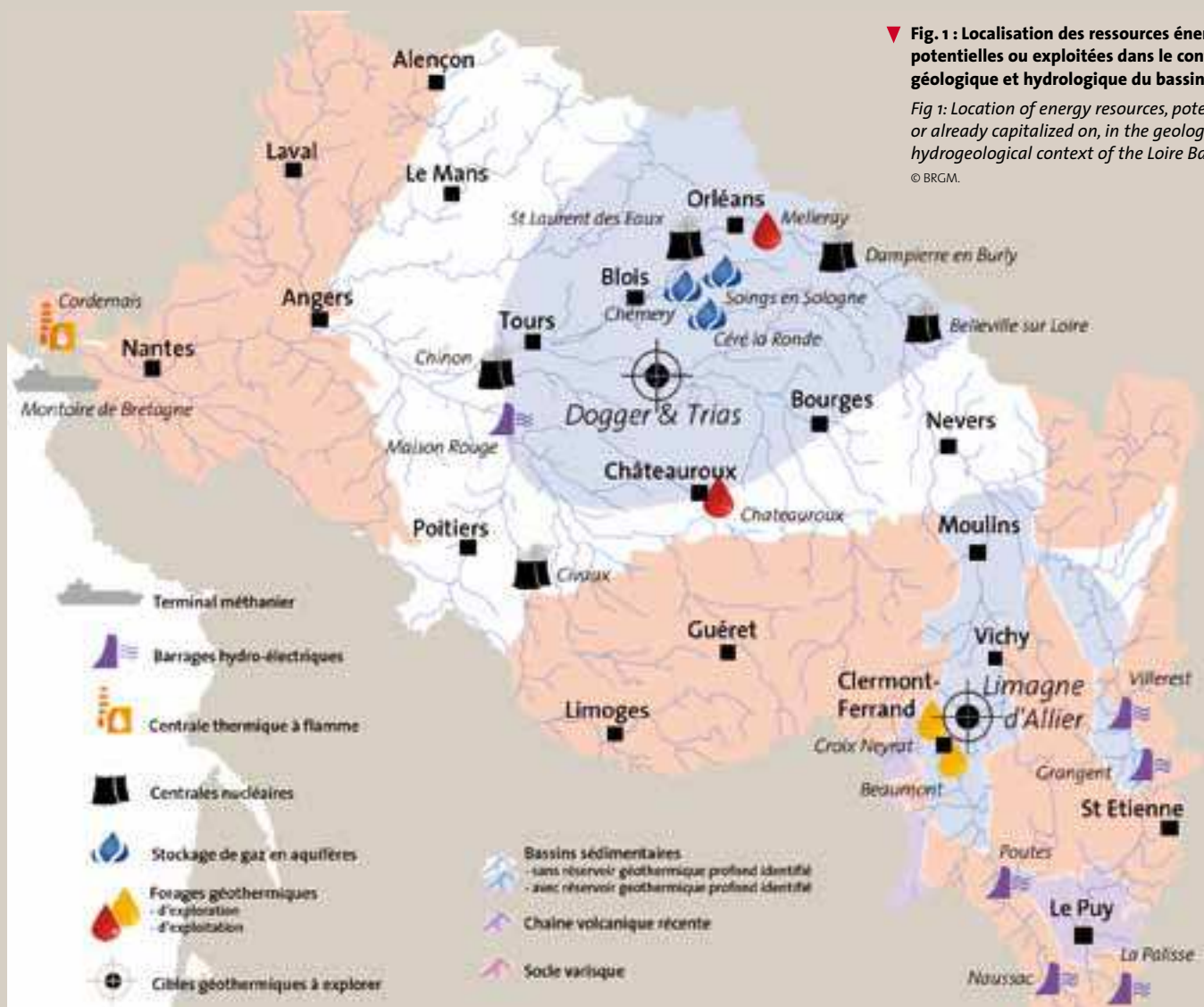
Le nord du Massif central et son volcanisme récent : une ressource potentielle pour la géothermie haute température

La genèse du volcanisme récent du Massif central est encore l'objet de débat : on l'apparente soit à un modèle de subduction associé à une remontée d'asthénosphère, soit à un point chaud intracontinental. Mais quoi qu'il en soit, ce volcanisme constitue une anomalie thermique dans la croûte qui se traduit par un flux de chaleur atteignant 110 mW/m². Il s'agit

Chaufferie Saint-Jean à Châteauroux (Indre). 1 310 logements sont alimentés depuis 2002 par une centrale géothermique.

The Saint-Jean boiler plant at Châteauroux (Indre Department). Since 2002, 1310 homes are being heated via geothermal technology.

© SA HLM Habitat 2036.



▼ Fig. 1 : Localisation des ressources énergétiques potentielles ou exploitées dans le contexte géologique et hydrogéologique du bassin de la Loire.

Fig 1: Location of energy resources, potential or already capitalized on, in the geological and hydrogeological context of the Loire Basin.

© BRGM.

en fait d'un objet géologique remarquable évalué depuis les années 70 [Varet *et al.* (1977)] jusqu'à aujourd'hui [Pallard (2009)] pour son potentiel géothermique haute température.

De nombreuses sources chaudes (*photo 1*) sont présentes dans l'emprise de la chaîne volcanique (*figure 2*), avec une forte densité entre le lac Pavin au sud et Vichy au nord. Cette zone correspond aux parties les plus récentes de la chaîne volcanique, mise en place entre 500 000 ans et 3 800 ans. Ainsi, ces sources thermales pourraient être l'expression de surface de réservoirs géothermiques plus ou moins profonds (*figure 3*). En termes de températures, de nombreux géothermomètres⁽¹⁾ obtenus à partir de ces sources témoignent de l'existence de réservoirs atteignant 200 °C en profondeur (*figure 2*).

(1) – La géothermométrie est l'estimation de la température des réservoirs géothermiques profonds d'après la composition chimique des eaux de source.



▲ Photo 1 : Une des plus belles sources thermales d'Auvergne (63 °C) : la source du Dôme, située à quelques kilomètres de Vichy (département de l'Allier).

Photo 1: One of the Auvergne region's most beautiful hot springs (63 °C): the Dôme spring, a few kilometres from Vichy (Allier Department).

© BRGM im@gé

L'exploitation de réservoirs à de telles températures peut permettre la production d'énergie électrique pour divers usages : processus industriels, électricité pour les populations et réseaux de chaleur. En termes de profondeur, deux hypothèses s'affrontent. Ces réservoirs géothermiques de hautes températures sont-ils à des profondeurs d'environ 5 km (si on se réfère uniquement aux flux de chaleur par conduction [Lucazeau *et al.* (1981)] ? Dans ce cas ils demeureraient à court terme inaccessibles d'un point de vue économique, car trop profonds. L'autre possibilité, plus prometteuse, réside dans l'existence de chambres magmatiques plus superficielles, vers 5-10 km de profondeur, en cours de refroidissement, qui conduirait au développement de cellules de convection par circulation de fluides. Dans cette configuration, les réservoirs géothermiques

seraient économiques car accessibles entre 1 à 3 km de profondeur. À ce propos, à l'issue des évaluations du potentiel géothermique, il s'avère que la région de La Bourboule – Mont-Dore – Saint-Nectaire constitue une des zones géothermales les plus favorables, car elle est typique d'un volcanisme récent et différencié, suggérant l'existence de chambres magmatiques peu profondes. D'autres zones sont *a priori* moins chaudes (120-160 °C), mais tout aussi prometteuses en ressource géothermale.

Cependant, seule la réalisation de campagnes d'exploration, notamment par forages, permettrait de vérifier l'hypothèse de réservoirs accessibles et de répondre à la question « le Massif central constitue-t-il une province géothermale haute température ? ».

Fig. 2 : Localisation des sources thermales du Massif central, caractérisées par leur donnée géothermométrique, et représentées sur la carte géologique de la France au millionième.

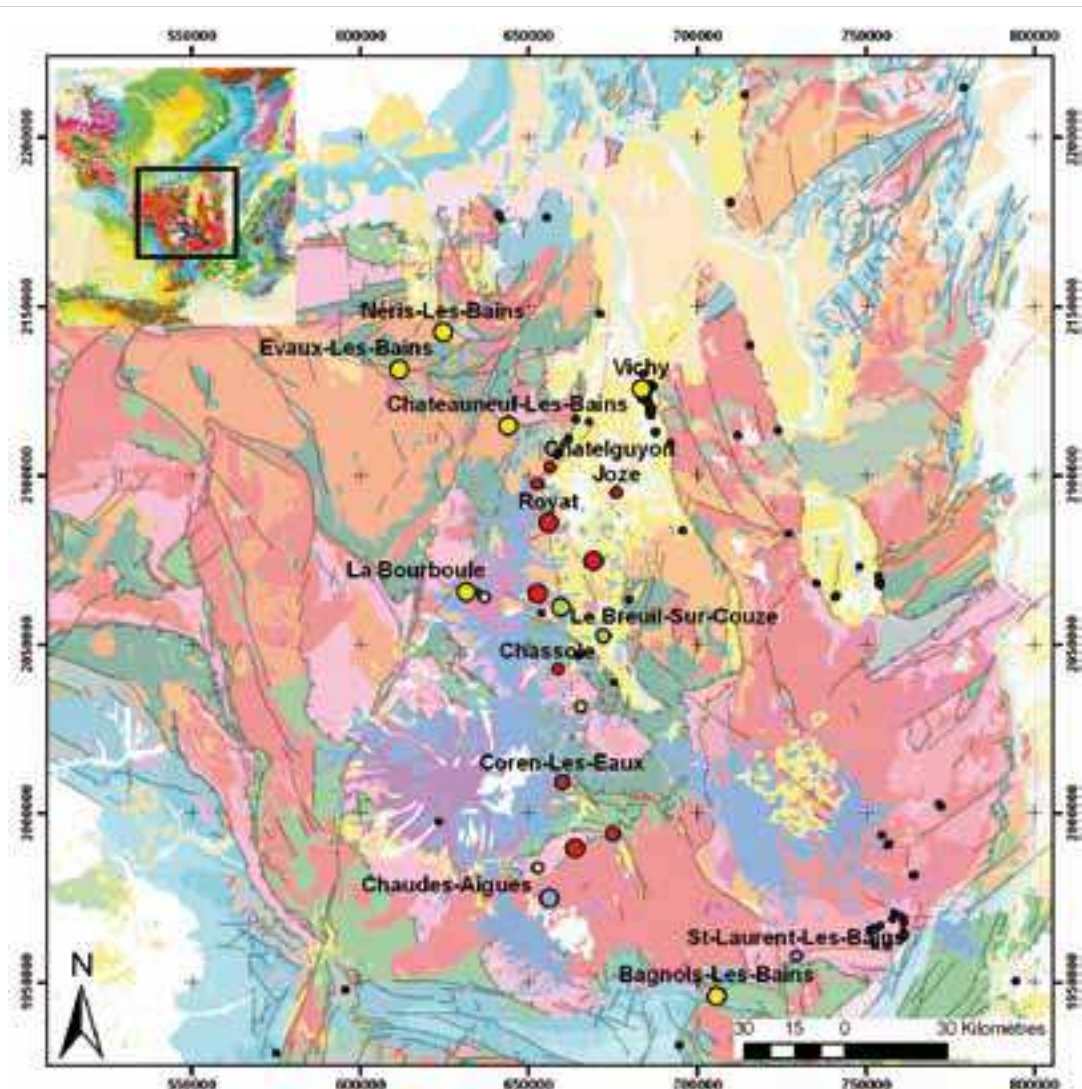
Fig. 2: Locations of hot springs in the Massif Central characterized by their geothermometer, plotted on the geological map of France at 1:1,000,000 scale.

© Pallard, 2009.

Géothermométrie des sources (sur la base des géothermomètres SiO₂, Na/K et Na/Li).

Température, certitude (concordance des géothermomètres).

- 200 °C, Haute
- 200 °C, Moyenne
- 200 °C, Basse
- 160-200 °C, Haute
- 160-200 °C, Basse
- 120-160 °C, Haute
- 120-160 °C, Moyenne
- 120-160 °C, Basse
- 100-120 °C, Haute
- 100-120 °C, Basse
- Source



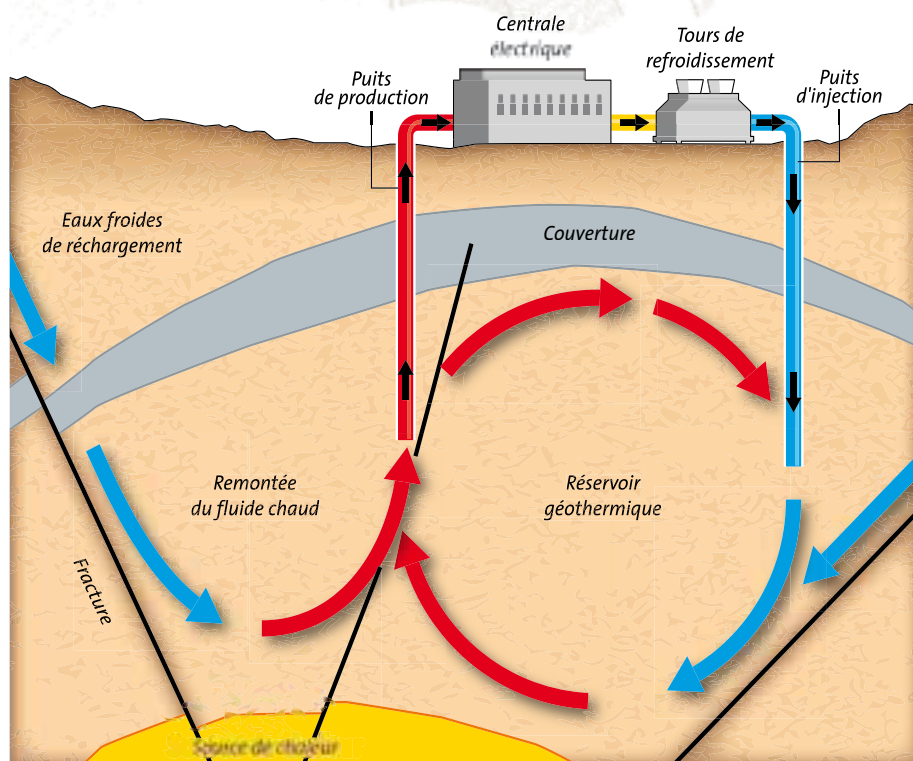


Fig. 3 : Schéma conceptuel d'un système géothermique haute température exploité pour la production d'électricité. Le système est principalement composé d'un réservoir géothermique caractérisé par sa cellule de convection, d'une source de chaleur sous-jacente (chambre magmatique) et d'une couverture argileuse imperméable permettant le développement de la cellule de convection.

Fig. 3: Conceptual diagram of a high-temperature geothermal system used to generate electricity. The system consists mainly of a geothermal reservoir characterized by its convection cell, an underlying heat source (magma chamber) and a water-tight clay cover layer enabling the development of the convection cell.

© BRGM - Art presse - D'après : <http://jcwinnie.biz/wordpress/?p=2667>

Évaluation du potentiel géothermique du bassin de Limagne d'Allier

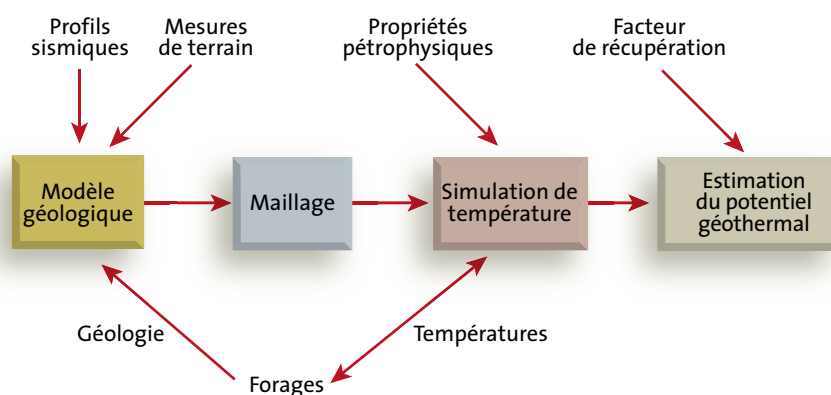
Le bassin de la Limagne d'Allier est situé dans la région de Clermont-Ferrand, immédiatement à l'est de la chaîne des Puys. Il correspond à une zone présentant une des plus fortes anomalies de température en profondeur de la France métropolitaine [Hurtig *et al.* (1991)]. Ce bassin, d'âge tertiaire, fait partie du système de rift ouest-européen qui se compose d'une série de grabens et d'une chaîne volcanique très récente. Ces grabens sont caractérisés par des gradients géothermaux élevés et une fracturation importante qui affecte les séries sédimentaires de fond de bassin et le socle cristallin anté-Permien. D'autre part, de nombreuses sources thermales présentes le long des failles bordières du bassin confirment le caractère hydrothermal de la zone (figure 2). Localement, l'expression de la perméabilité en surface est contrôlée par une fracturation naturelle bien développée qui affecte à la fois les séries sédimentaires et le socle cristallin comme c'est le cas au voisinage de la faille d'Aigueperse. L'ensemble de ces critères fait que le bassin de la Limagne d'Allier a été exploré non

seulement pour la recherche pétrolière et uranifère jusqu'aux années 1980 mais aussi pour son potentiel géothermal depuis trente ans. Deux forages géothermiques ont été réalisés dans les années 1980 dans la région Clermont-Ferrand. Le meilleur d'entre eux a montré une température proche de 100 °C à 1 500 mètres de profondeur, mais sans stimulation, avec des débits trop faibles pour espérer une exploitation géothermique conventionnelle. Afin de quantifier ce potentiel, un modèle de température a été calculé à partir de l'interprétation de la géologie en trois dimensions et des propriétés thermiques des roches. Le couplage des volumes géologiques et des températures a permis ensuite d'estimer les cibles les plus favorables pour la géothermie (figure 4).

Fig. 4 : Schéma du processus pour le calcul du potentiel géothermal. Les différentes étapes sont détaillées dans le texte.

Fig. 4: Flowchart of the procedure for calculating geothermal potential. The various stages are described in the text.

© Calcagno *et al.*, 2009.



Le bassin de Limagne d'Allier, une des plus fortes anomalies de température de métropole.

► PRÉLÈVEMENTS D'EAU DES CENTRALES NUCLÉAIRES

Jean-Pierre Granier – Association « Les études ligériennes » – j-p.granier@wanadoo.fr

Les cinq centrales nucléaires du bassin de la Loire – Chinon et Dampierre, avec quatre tranches de 900 MW chacune, Saint-Laurent-des-Eaux (2 x 900 MW), Belleville-sur-Loire (2 x 1 300 MW), sur la Loire – Civaux (2 x 1 450 MW) sur la Vienne – sont refroidies par l'atmosphère. L'eau de refroidissement des condenseurs cède ses calories dans de grandes tours où circule un courant d'air permanent. L'eau à refroidir tombe en pluie et s'évapore en partie. C'est cette vapeur d'eau qui contribue à former les panaches (figure).

À Saint-Laurent-des-Eaux, ces tours de réfrigération sont d'une hauteur moindre que sur les autres sites (120 mètres au lieu de 160 mètres) pour qu'elles ne puissent être vues des terrasses de Chambord. À Chinon, les réfrigérants sont d'un autre type, dit « à tirage forcé » : l'air est poussé par des ventilateurs géants, la hauteur des tours étant ainsi réduite à 30 mètres.

Site	Puissance en MW	Volumes prélevés millions m ³ /an	Volumes évaporés millions m ³ /an
Belleville	4 x 900	197,0	23,2
Chinon	4 x 900	159,6	26,3
Saint-Laurent	2 x 900	101,3	17,2
Dampierre	2 x 1 300	200,0	33,4
Civaux	2 x 1 450	116,0	25,9
TOTAL		773,9	126,0

Volumes prélevés et évaporés (chiffres 2007).

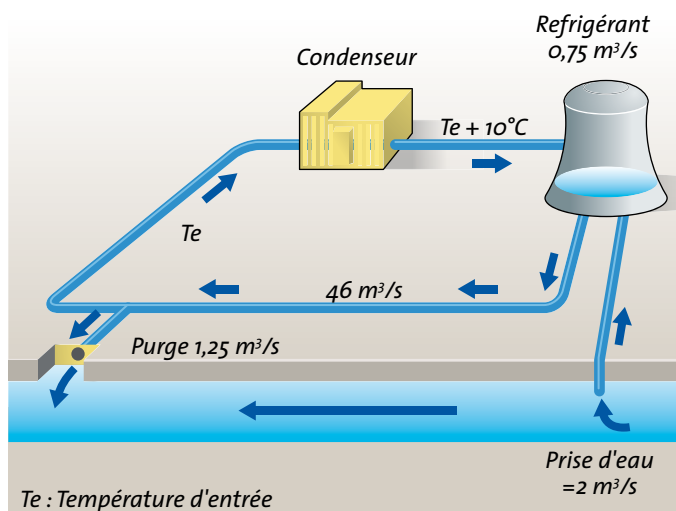
Volumes extracted and evaporated (2007 data).

© Source : EDF-Délégation de Bassin Loire-Bretagne.

Les barrages réservoirs de Naussac et Villerest permettent d'assurer, environ neuf années sur dix, un débit de 60 m³/s à Gien, point nodal du SDAGE⁽¹⁾, débit qui permet de préserver l'ensemble des usages.

Plusieurs types de débits sont définis à Gien par le Préfet de bassin (encadré p. 95) :

► DOE (débit objectif d'étiage) = 60 m³/s. Au-dessus de cette valeur tous les usages sont préservés.



Te : Température d'entrée

► Circuit de refroidissement d'une tranche de 900 MW.

Cooling system of a 900 MW unit. © BRGM - Art presse - D'après : EDF

► DSA (débit d'étiage seuil d'alerte) = 50 m³/s. Des premières restrictions sur les prélèvements peuvent être décidées par le Préfet pour éviter d'atteindre le débit de crise (DCR).

► DCR (débit de crise) = 43 m³/s. Seuls les prélèvements nécessaires à l'eau potable et à la sécurité civile sont maintenus. Le Préfet décide des prélèvements.

Les caractéristiques des dispositifs de pompage qui assurent une hauteur manométrique suffisante à l'aspiration des pompes des différents sites, associées à la présence d'un seuil (sauf à Chinon), permettraient de fonctionner jusqu'à des débits de 25 à 35 m³/s, la sûreté des réacteurs étant assurée au moins jusqu'à 14 m³/s, voire jusqu'à 7 m³/s pour les centrales les plus en amont.

Chinon est un cas particulier : la construction d'un seuil en enrochement est prévue si le débit de la Loire devait descendre en dessous de 42 m³/s. ■

(1) – Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux.

Dans un secteur de 1 000 km² environ entre Clermont-Ferrand et Riom, une centaine d'anciens forages pétroliers ont été réinterprétés en termes de litho-faciès et de séquence stratigraphique. De même, 26 profils sismiques issus d'anciennes campagnes d'exploration pétrolière ont été retraités et calés sur les forages. Ces données fournissent une interprétation en une dimension (forages) et en deux dimensions (profils sismiques) à l'intérieur du bassin sédimentaire. Par ailleurs, l'analyse de levés gravimétriques et magnétiques a permis de positionner la profondeur du socle sous-jacent. Enfin, des relevés géologiques sur le terrain complètent notre jeu de données. L'ensemble de ces informations a été rassemblé pour modéliser en 3D la géométrie de la géologie à l'aide du logiciel GeoModeller développé au BRGM. Le modèle géologique, présenté sur la figure 5, montre le socle de la

Limagne d'Allier surmonté de quatre séquences sédimentaires, déposées il y a 23 à 40 Ma : Éocène moyen (S1), Éocène supérieur (S2), Rupélien (S3) et Chattien (S4). Chacune de ces séquences est composée d'un même cycle sédimentaire de dépôts détritiques à la base (« Réservoir ») suivi d'une alternance de couches carbonatées et détritiques (« Mixte ») et enfin un mélange de marne et de carbonate au sommet (« Top »). La pile géologique décrite ci-dessus est complétée par un réseau de failles qui décale le socle et les formations sédimentaires. On note que l'épaisseur de chaque formation modélisée varie à la fois spatialement et temporellement : les formations « Réservoir » de nature gréseuse s'avèrent plus épaisses en bord de bassin qu'au centre. Enfin, les formations lacustres (« Top ») sont plus compétentes et plus profondes dans la partie centrale du bassin.

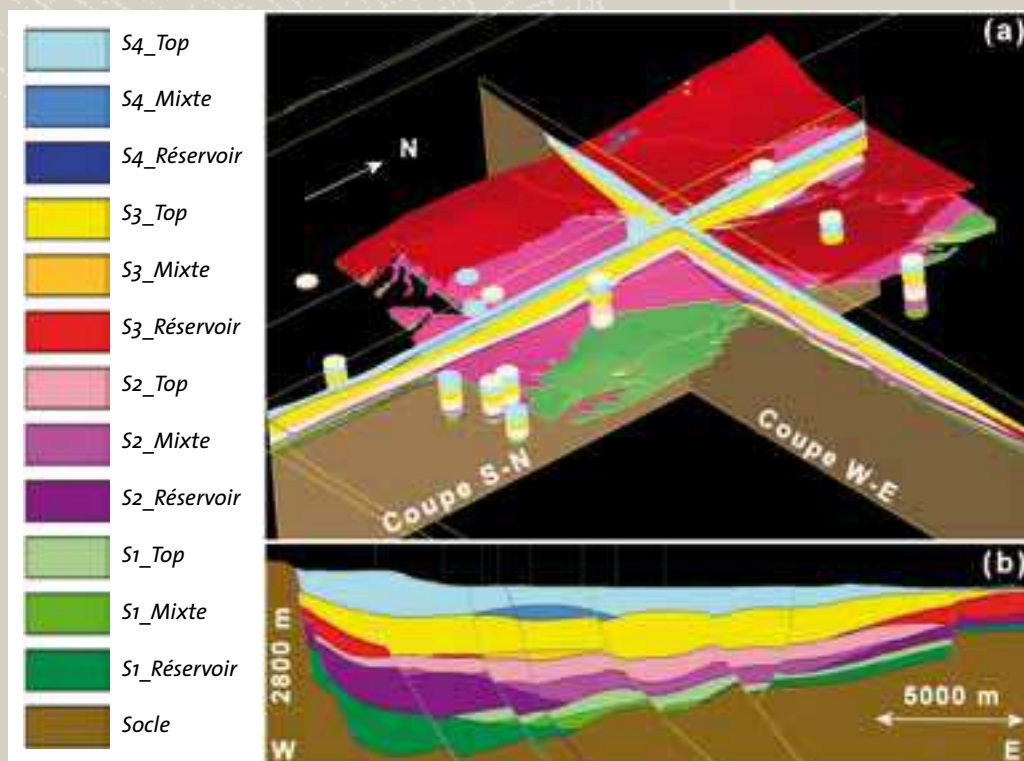


Fig. 5 : Modèle géologique du bassin de la Limagne d'Allier (E-W : 30 km, N-S : 35 km, extension verticale : 5 km).
(a) Vue 3D depuis le SE des quatre formations réservoir, des forages et de deux coupes (S-N et W-E).
(b) Coupe W-E de l'ensemble du bassin.

Fig. 5: Geological model of the Limagne d'Allier basin E-W: 30 km; N-S: 35 km; vertical extent: 5 km.
(a) A 3D view from the SE of the reservoir's four formations, boreholes and two cross-sections (S-N and W-E);
(b) A W-E cross-section of the basin as a whole.

© Calcagno et al., 2009.

► HYDROCARBURES, RESSOURCES ET STOCKAGE EN VAL DE LOIRE

Christophe Rigollet – BRGM, Service Géologie – c.rigollet@brgm.fr

Le Val de Loire a connu au cours des temps géologiques de nombreux paysages continentaux et marins où se sont accumulés tous types de sédiments. Les dépôts de la Loire actuelle sont la dernière couche d'une épaisse pile sédimentaire riche en ressources, exploitées depuis des décennies, et qui font régulièrement l'objet de travaux d'exploration profonde.

Au Carbonifère, il y a plus de 300 millions d'années, la région était recouverte de forêts luxuriantes. Les végétaux se sont accumulés dans ces environnements chauds et humides, puis, lors de leur enfouissement, se sont progressivement transformés en charbon qui a été exploité en bordure du Massif central.

50 millions d'années plus tard, au Trias, le climat est beaucoup plus sec et la morphologie des paysages change. La région est parcourue par de larges systèmes fluviaux qui se jettent dans une mer peu profonde, à l'ouest du Bassin parisien. Les sables déposés par ces rivières sont bien triés, poreux, perméables et ont donc toutes les qualités d'un bon aquifère. Ces formations sont actuellement exploitées pour stocker du gaz naturel, accumulé en été lorsque la consommation est faible et soutiré en hiver

lors des pics de consommation. L'exploitation des aquifères profonds de Sologne permet donc de réguler l'approvisionnement en gaz des foyers, des collectivités et des entreprises.

Les capacités de stockage des sables du Trias (utilisées aussi pour les hydrocarbures dans le bassin de Paris) permettent également d'envisager leur exploitation pour le stockage de CO₂.

Après le dépôt des sables fluviaux, il y a 200 millions d'années, la région est progressivement recouverte par la mer où vont se déposer des argiles, des marnes et des calcaires. Les argiles et les marnes peuvent contenir de la matière organique, qui se transforme au cours de son enfouissement en pétrole et gaz. Si les hydrocarbures sont expulsés, ils migrent et peuvent être piégés dans les formations réservoirs. Si au contraire ils restent piégés dans la roche mère, ils peuvent également être exploités. De nombreux projets d'exploration sont à l'étude sur cette thématique non-conventionnelle.

Les calcaires, déposés au niveau de plate-formes, présentent des propriétés réservoirs favorables et ont donc été explorés pour les

hydrocarbures, les ressources en eau profonde, la géothermie et peut-être demain pour le stockage pour le CO₂. ■

Affleurement de sables réservoirs marins, déposés par des courants de marées, il y a 100 millions d'années, au sud de la Sologne (à proximité de Vierzon).

Outcrop of marine reservoir sands laid down 100 million years ago by tidal currents, south of the Sologne region (near Vierzon).

▼ © C. Rigollet.



Afin de préparer la simulation des températures en 3D, les formations et les failles décrites dans le modèle géologique ont été maillées avec les outils *Winfra mesh generator* et son extension *Orion* développés par GEOWATT. Le maillage est plus serré à l'intérieur du bassin et à proximité des failles pour mieux modéliser le processus qui permet de calculer la température. Un régime conductif de propagation de température a été choisi en raison du peu d'information sur la circulation des fluides à l'intérieur du bassin. Les conditions aux limites correspondent à une température constante de 10 °C au niveau de la topographie et un flux de chaleur de 105 mW/m² à la base du modèle. Aucun transfert ne se fait latéralement de part et d'autre du modèle. La conductivité thermique et la production de chaleur des formations géologiques viennent compléter les paramètres utilisés. Ces propriétés pétrophysiques ont été mesurées sur des échantillons provenant de forages carottés. La *figure 6* montre le résultat de la simulation des températures en 3D.

La dernière étape de notre méthodologie (*figure 4*) a consisté à calculer le potentiel géothermal. Cette quantité nous renseigne sur les cibles les plus favorables pour une exploration puis une exploitation en cas de succès. Il convient tout d'abord de calculer la chaleur en place à partir des températures modélisées, des volumes des formations géologiques et d'une température de réinjection arbitrairement estimée à 30 °C. La chaleur en

D'un modèle thermique conductif à un modèle thermique convectif : un défi R&D.

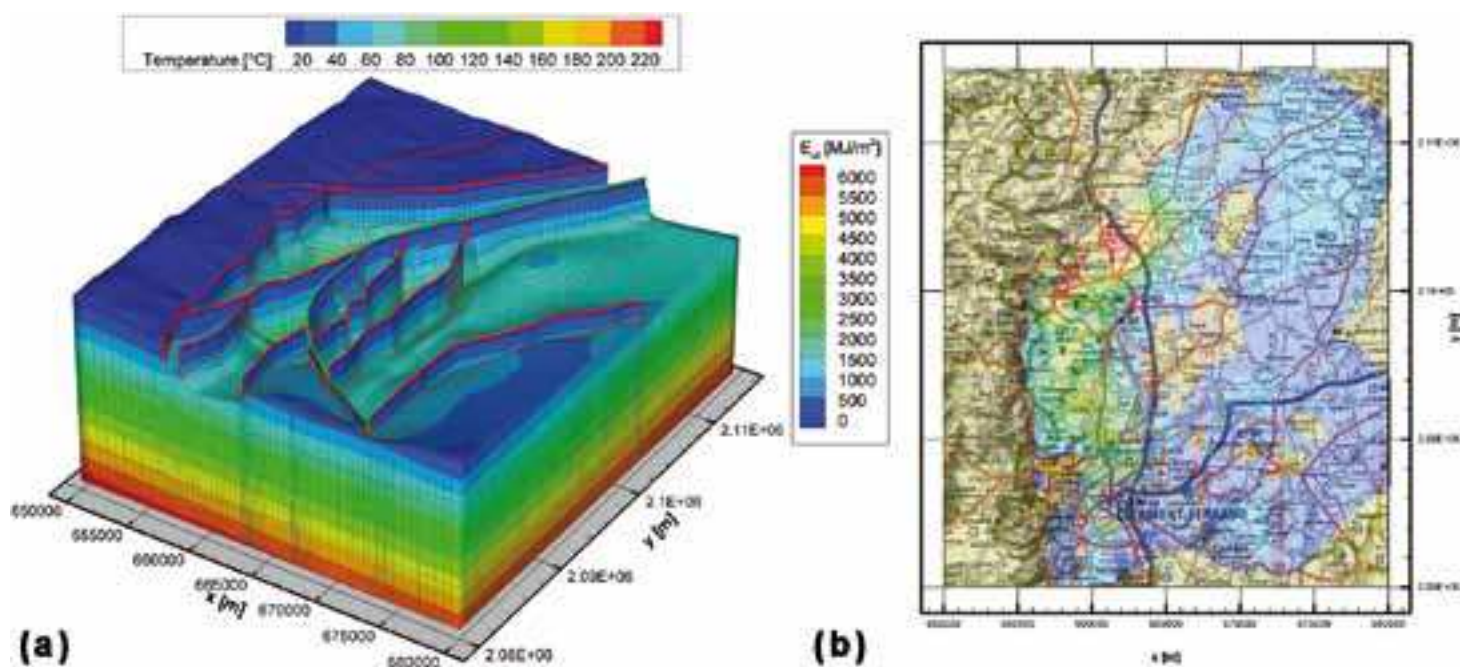
place est finalement transformée en chaleur récupérable – ou potentiel géothermal – en lui appliquant un facteur de récupération fixé à 5 %. Les résultats montrent que la formation géologique la plus favorable correspond aux dépôts détritiques de l'Eocène moyen (« S1_Réservoir ») situés aux alentours de 2 500 mètres de profondeur dans la zone NW du bassin à l'aplomb de Châtelluguyon (*figure 6*).

Ces résultats sont préliminaires dans le sens où ils pourraient être améliorés par une meilleure connaissance de la géologie. En effet, le modèle géologique 3D pourrait être affiné par de nouvelles acquisitions telles que de nouveaux forages ou levés géophysiques. Par manque de données, le processus de convection a été ignoré ici en appliquant simplement un régime conductif à la propagation de la chaleur. Un apport significatif proviendrait donc de la prise en compte de la circulation hydrogéologique pour la simulation des températures. En outre, les températures de forages pétroliers aujourd'hui disponibles permettraient de valider la simulation thermique [Genter *et al.* (2003) ; Bouchot *et al.* (2008) ; Calcagno *et al.* (2009)].

Fig. 6 : Résultats de la simulation numérique :
(a) Distribution des températures dans le socle et sur les failles.
(b) Chaleur récupérable pour S1_Réservoir superposée à la carte géographique (IGN).

Fig. 6: Results of the numerical simulation:
(a) Temperature distribution in the basement and along faults;
(b) retrievable heat for S1_Réservoir superimposed on the IGN geographical base map.

© Calcagno *et al.*, 2009, IGN.



► BARRAGES ET SOUTIEN DES ÉTIAGES DE LA LOIRE ET DE L'ALLIER

Hélène Xhaard – Chef du Service des Barrages de Villerest et Naussac – Établissement public Loire – Helene.xhaard@eptb-loire.fr

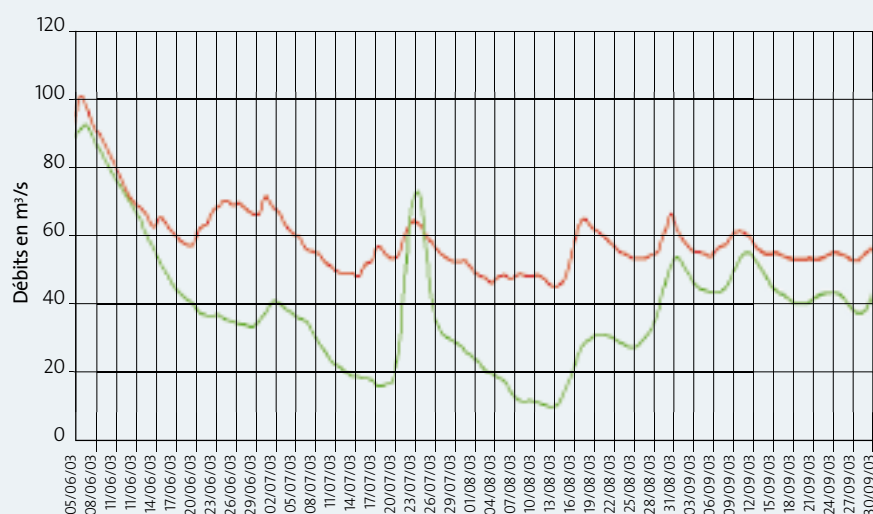


Fig. 1 : Évolution des débits à Gien pendant l'étiage 2003.
Débit observé à Gien en rouge - Débit naturel à Gien (sans les barrages) en vert.

Fig. 1: Evolution in flow rates in Gien during the mean low water episode in 2003.
Flow observed in Gien (red) and natural flow rate in Gien without the dams (green).

Le soutien apporté par les deux retenues peut s'avérer très important, le débit naturel de la Loire à Gien pouvant descendre au-dessous de 15 m³/s, celui de la Loire à Villerest à 1 m³/s.

Étiage 2003

L'année 2003 a été exceptionnelle : un étiage record de mai à octobre, suivi d'une très forte crue. Les réserves en eau des deux retenues de Villerest et Naussac risquant de s'épuiser rapidement, l'objectif de débit à Gien a été progressivement réduit de 60 à 45 m³/s, tandis que des restrictions d'usage étaient imposées sur les zones les plus sensibles. Globalement, 70 millions de m³ ont été déstockés de la retenue de Villerest et 110 millions de m³ de la retenue de Naussac.

Plusieurs grands barrages sont situés sur la Loire et ses affluents. Seuls les aménagements de Naussac et Villerest sont destinés à soutenir les débits en période de basses eaux. La vocation des autres ouvrages consiste, pour l'essentiel, à produire de l'hydroélectricité et à alimenter certains secteurs en eau potable. Celle de Villerest et Naussac est de lâcher de l'eau en période d'étiage, pour maintenir un débit minimum dans la Loire et l'Allier afin de satisfaire les différents usages de l'eau (alimentation en eau potable, irrigation, industries, refroidissement des centrales nucléaires...) et les besoins des milieux naturels.

La période de soutien d'étiage s'étend généralement de juin à septembre (figure 1) mais peut être également plus précoce et aussi se prolonger jusqu'en novembre.

Les objectifs de débits sur la Loire et l'Allier sont fixés par les règlements d'eau en cohérence avec le SDAGE (figure 2). En cas de sécheresse accentuée, un comité de gestion des réservoirs de Naussac et Villerest et des étiages sévères du bassin Loire-Bretagne, présidé par le Préfet Coordonnateur du bassin Loire-Bretagne peut décider de réduire ces débits d'objectifs (encadré p. 92).

▼ Fig. 2 : Localisation des barrages et des points de contrôle et débits d'objectifs d'étiage.

Fig. 2: Locations of dams and control points and target flow rates under MLW conditions.

© SPR Consultant.



► LE CHARBON DU BASSIN DE LA LOIRE. LA DÉCOUVERTE RÉCENTE DE LUCENAY-LÈS-AIX

Martin Donsimoni – BRGM – m.donsimoni@brgm.fr

Le bassin de Loire recèle de nombreux gisements de charbon affleurants, d'âge stéphanien à autunien, autrefois abondamment exploités. Ils occupent, au sein du vieux massif hercynien, des fossés d'effondrement d'orientations principales N20°E à N40°E. Le bassin houiller de la Loire fut le principal producteur national de charbon durant la première moitié du XIX^e siècle. Par ordre de productions cumulées décroissantes (en Mt), citons les gisements de Saint-Étienne (600), Blanz-Montceau (192), Commentry (50), Brassac (30), Messeix (30), Saint-Eloy (25), La Machine (20), Ahun (15), Aumance (7), (*carte métallogénique du bassin de la Loire*, p. 101).

À ces anciens gisements, il faut ajouter celui découvert en 1981 par le BRGM à Lucenay-lès-Aix [Donsimoni *et al.*, (1987)] au sud de Decize et de Devay [Donsimoni, (1983)]. Masqué par 160 à 300 m de morts terrains, ce gisement fut localisé grâce à une campagne gravimétrique à maille serrée, effectuée à l'issue d'études préalables de géologie structurale et de sédimentologie. La carte de l'anomalie de Bouguer (*figure 1*) révéla une anomalie légère, allongée N30°E, traduisant la présence d'un fossé sédimentaire ancien.

Un modèle géologique a été proposé pour expliquer le processus de dépôt de la couche de charbon principale (baptisée Faisceau des Membras). La reconstitution du profil paléogéographique (*figure 2*) montre que la sédimentation végétale a été contrôlée par une faille synsédimentaire active qui a permis une extraordinaire

accumulation de débris végétaux dans le sens vertical. Le profil asymétrique du fossé sédimentaire explique l'augmentation de l'épaisseur de cette couche de charbon d'est en ouest.

Les 26 sondages répartis sur 6 km² ont permis d'élaborer un modèle structural et de déterminer des ressources de plus de 250 Mt de charbon, en couches de 5 à 80 mètres d'épaisseur situées entre 180 et 600 mètres de profondeur. La zone nord contient à elle seule plus de 65 Mt de charbon exploitable à ciel ouvert. ■

Bibliographie : Donsimoni M. (1983) – Inventaire des ressources nationales de charbon. Gisement de Decize-Devay (Nièvre). Rapport de fin de campagne de reconnaissance (1981-1982-1983). Synthèse géologique et géophysique. Rapport BRGM n° 83 SGN 801 GEO. Donsimoni M. *et al.* (1987) – Le gisement de charbon de Lucenay-lès-Aix (Nièvre). Essai de synthèse géologique d'après les sondages récents (1981-1986). Rapport BRGM n° 87 SGN 652 GEO, 84 p., 18 fig., 6 tabl., 46 ann., 12 pl. h.t.

Affleurements de

- Permien
- Stephanien
- Socle

Faïlle

- LY.A Sondage d'identification de l'anomalie légère de Lucenay-lès-Aix

Anomalies gravimétriques

Positives

Socle peu profond

Négatives

- Tertiaire
- Carbonifère

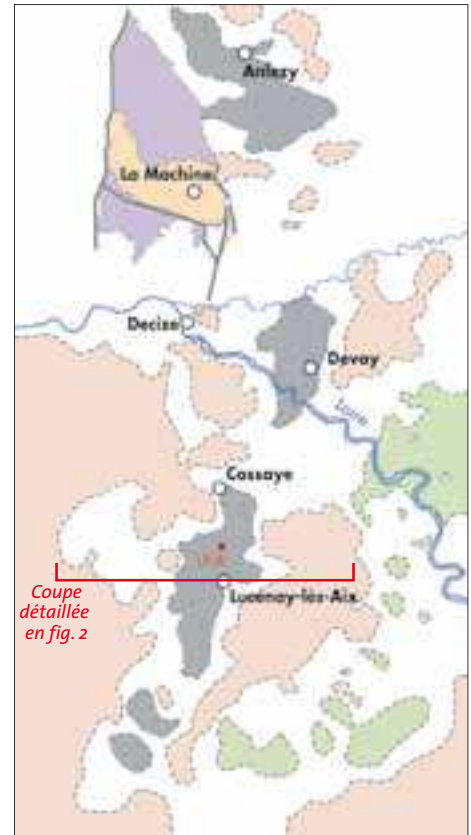
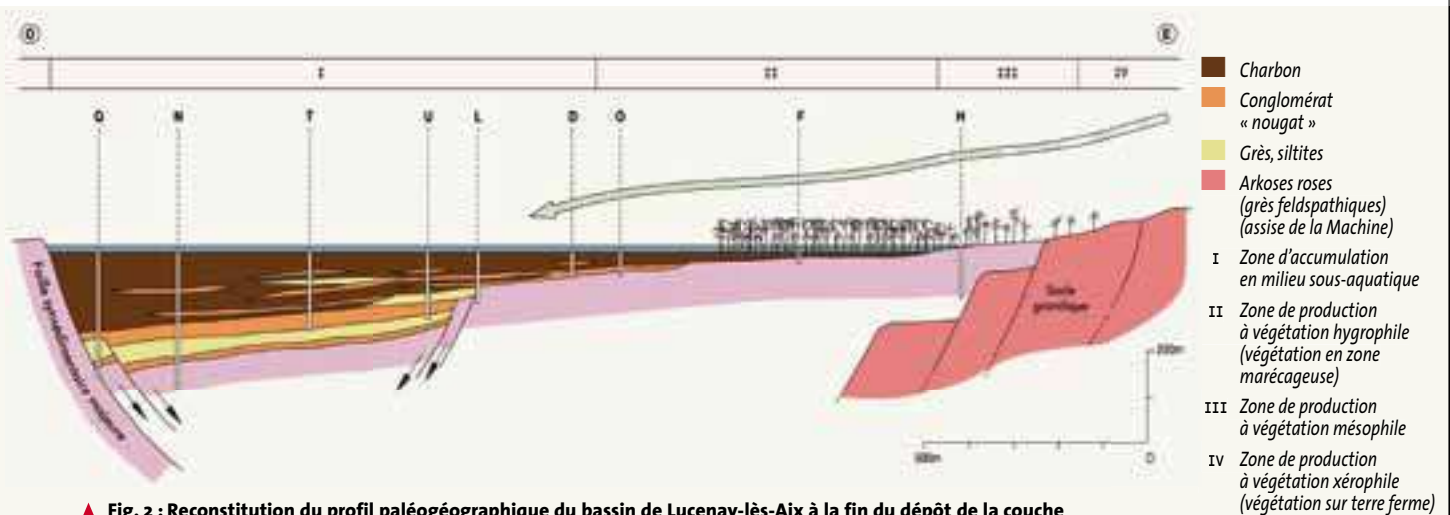


Fig. 1 : Carte de l'anomalie de Bouguer (d = 2,3) de la région de Decize (Nièvre).

Fig 1: Map of the Bouguer anomaly (d=2.3) in the vicinity of Decize (Nièvre Department).

© M. Donsimoni *et al.*



▲ Fig. 2 : Reconstitution du profil paléogéographique du bassin de Lucenay-lès-Aix à la fin du dépôt de la couche principale baptisée Faisceau des Membras (du nom du bois qui aujourd'hui surplombe cette couche).

Fig. 2: Reconstruction of the paleo-geographic profile for the Lucenay-lès-Aix basin when the deposition of the main layer, referred to as the Faisceau des Membras (named for the wood that verges on this layer today), had ended.

© M. Donsimoni *et al.*

Proportion relative des différentes zones végétales contribuant à la formation des dépôts phytoclastiques

Un permis exclusif de recherche de gîtes géothermiques à haute température a été accordé en juillet 2008 à une compagnie pétrolière pour une durée de cinq ans. Cette campagne d'exploration devrait permettre l'acquisition de nouvelles informations sur cette cible prometteuse.

Géothermie du sud du bassin de Paris : Berry, Sologne et Val de Loire

Le potentiel géothermique des aquifères superficiels dans le bassin de la Loire est exploitable, comme partout en France métropolitaine, par les systèmes thermodynamiques de type pompe à chaleur (PAC). Il concerne principalement les aquifères superficiels de température d'environ 12 °C à 15 °C (cf. site Internet Ademe-Brgm <http://www.geothermie-perspectives.fr>).

Un peu plus profonde, une installation géothermique remarquable de type PAC valorise, à Châteauroux dans le Berry, les aquifères de moyenne profondeur du Trias et du Dogger. Par exemple, 1 310 logements du Quartier de la ZAC Saint-Jean, sont chauffés à partir d'une ressource géothermique puisée dans l'aquifère sablo-gréseux triasique. Cette chaufferie utilise un forage qui exploite ce réservoir à 670 mètres de profondeur pour produire une eau à 34 °C. Une pompe immergée à 150 mètres de profondeur permet un débit d'exploitation de 100 m³/h. Cette installation diffuse dans les logements une

température ambiante de 19 à 20 °C via des planchers chauffants (figure 7 et photo d'entrée).

Au-delà de 1 km de profondeur, le potentiel géothermique des aquifères profonds est exploitable dans le Val de Loire et la Sologne par échange direct de chaleur : c'est en particulier le cas des aquifères du Dogger (température 55-65 °C) comme ceux du Trias (température 65-80 °C). Ainsi, en termes de géothermie basse énergie (< 90 °C), le bassin de Paris est connu depuis trente ans pour l'exploitation géothermique de son réservoir calcaire du Dogger. Même si celui-ci n'a jamais été exploité sous la région orléanaise, il a été reconnu par forages pétroliers et montre des volumes comparables à ceux du réservoir exploité sous Paris. Parce que l'on constate une remontée des isothermes en Sologne et dans le Val de Loire par rapport à la région parisienne, il s'avère, qu'à profondeur égale, les températures sont plus chaudes au sud du bassin de Paris. En conséquence, les ressources géothermiques sont plus rapidement atteintes vers Orléans que vers Paris.

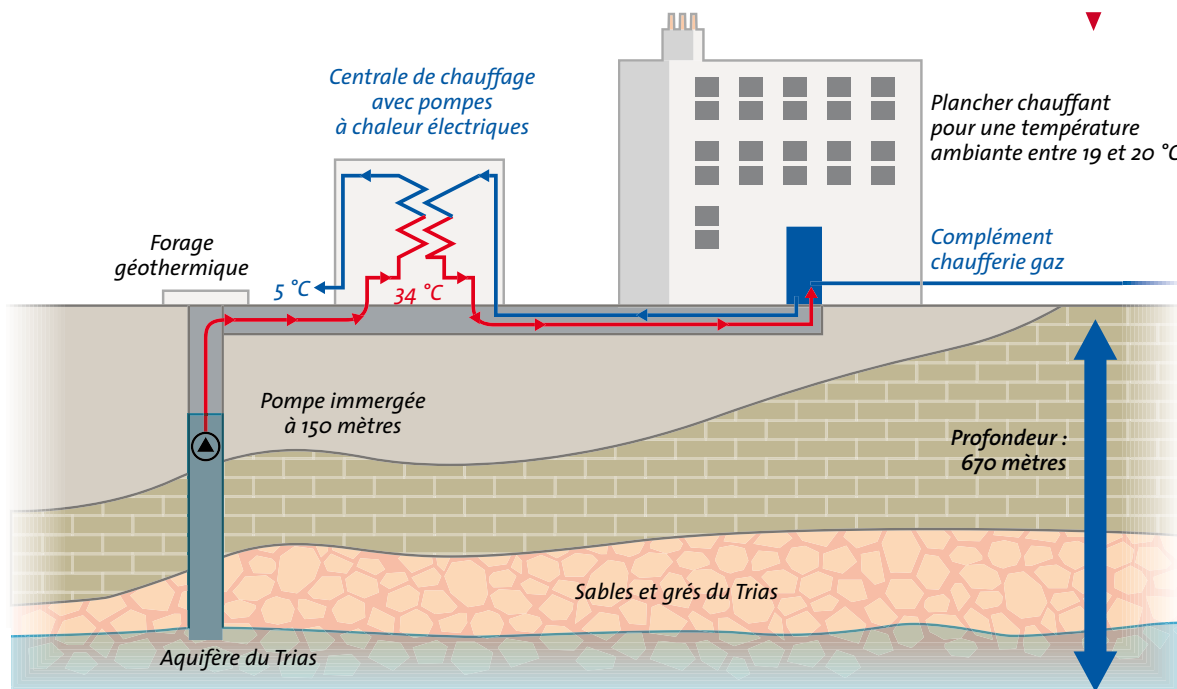
Sous les calcaires du Dogger, le Trias est composé de deux principales formations réservoir, situées dans l'emprise du bassin versant de la Loire : il s'agit des grès de Chaunoy et des grès de Donnemarie sous-jacents. Une étude réalisée en 2008 pour l'Ademe [Bouchot *et al.* (2008)] montre que le potentiel géothermique de ces

“ Le Dogger et le Trias sont des réservoirs géothermiques prometteurs pour le Val de Loire. ”

Fig. 7 : Schéma de principe de l'installation géothermique de type pompe à chaleur de Châteauroux.

Fig. 7: Diagram depicting the principle behind a heat-pump type geothermal installation at Châteauroux.

© BRGM - Art presse - D'après : CFG Services, www.cfgservices.fr

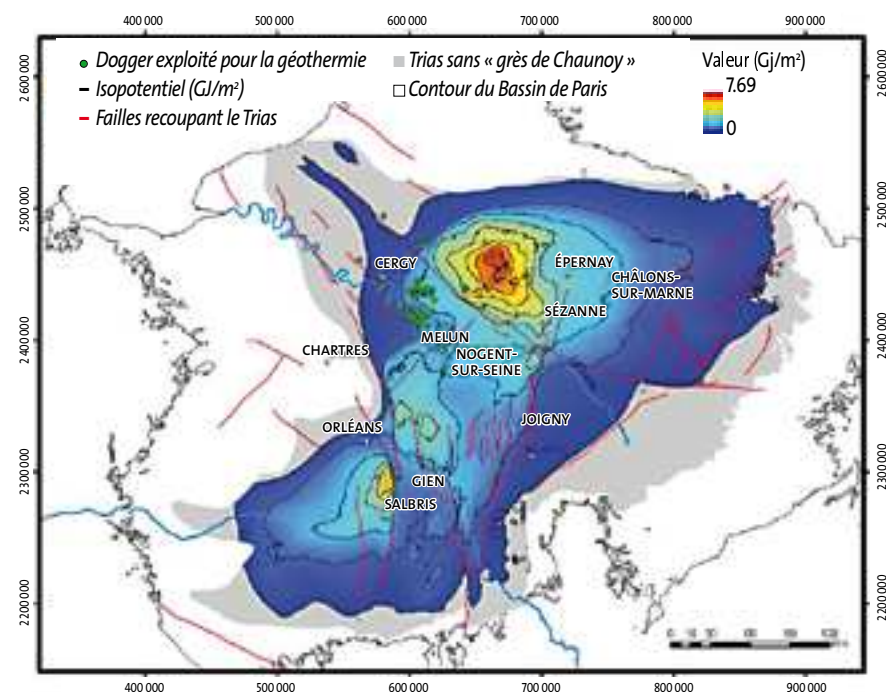


formations argilo-gréseuses est favorable. La meilleure cible, composée de grès de Chaunoy (figure 8), est située entre Orléans et Salbris, en Sologne. Elle se caractérise par un réservoir moyennement profond (1 400-1 500 mètres) et épais (140-180 mètres), offrant une température de ~75 °C équivalente à celle du Dogger exploité sous Paris.

Quant au doublet géothermique de Melleray, situé dans le Val de Loire, immédiatement à l'est d'Orléans, il a été réalisé à l'extrémité sud de cette cible. Un doublet géothermique avait été foré pour le chauffage d'un domaine de serres entre novembre 1979 et décembre 1980 (figure 1). Le réservoir argilo-gréseux a été recoupé entre 1 416 et 1 436 mètres de profondeur avec un excellent débit initial de 150 m³/h correspondant à un fluide de type saumure montrant une température de 75 °C. Mais rapidement après la mise en exploitation, une baisse progressive de l'injectivité a été constatée. Plusieurs hypothèses ont été invoquées pour expliquer cette baisse progressive. La cause la plus communément admise correspondrait à la déstabilisation des formations gréseuses réservoirs via la mise en mouvement de particules fines argileuses qui obstruent la porosité matricielle. Finalement, après deux ans et demi d'exploitation, une augmentation soudaine de pression est observée, conduisant à l'abandon du site de Melleray. Par conséquent, les formations argilo-gréseuses du Trias constituent un réservoir géothermique prometteur mais dont la réinjection des saumures refroidies devra dorénavant faire l'objet d'une grande attention pour parvenir à une exploitation durable comme c'est le cas chez nos voisins d'outre-Rhin.

Perspectives

Le développement de projets de géothermie Haute Température pour la production d'électricité dans une région montagneuse comme le Massif central passe par une expression détaillée des besoins des acteurs économiques, notamment du côté des industriels. À cet égard, l'arrêté du 23 juillet 2010 augmente de façon significative le tarif de rachat d'électricité (20 c€/kWh) et incite de fait à investir dans la géothermie. Les progrès technologiques des centrales géothermiques binaires permettent d'envisager d'exploiter des ressources entre 150-170 °C et donc de forer moins profond. De plus, sachant que le thermalisme est une activité importante pour la région, il sera essentiel de prouver que la ressource thermique des aquifères superficiels n'a aucun risque d'être impactée par une exploitation géothermique profonde (prévenir les conflits d'usage). Il faudra plutôt montrer que la ressource géothermale est susceptible de fournir une ressource d'appoint pour l'industrie



thermale. Ensuite, la mise en évidence de ressources passera par la réalisation de forages d'exploration, comme cela avait été envisagé dans les années 1990 par le BRGM. Au préalable, des campagnes géophysiques modernes de type magnéto-tellurique permettront de prédire en profondeur les réservoirs et réduire ainsi le risque géologique.

La partie amont du bassin de la Loire, caractérisée par des flux de chaleur particulièrement élevés en domaine de socle, constitue une région de prédilection pour la géothermie Enhanced Geothermal System (EGS). À ce titre, on rappelle que le premier site test français dans le socle fracturé a été réalisé entre 1984 et 1994 sur le granite de Mayet-de-Montagne à proximité de la Limagne d'Allier. L'exploration géothermique menée actuellement par des pétroliers dans l'emprise de la Limagne d'Allier au nord de Clermont devrait permettre d'avancer considérablement dans la connaissance de réservoirs profonds dans le socle.

Autant l'exploration de l'aquifère du Dogger sous la région parisienne ne pose plus de problème pour les opérateurs qui connaissent ce réservoir, autant le développement de la géothermie profonde au sud du bassin de Paris n'en est qu'à ses prémices. L'histoire malheureuse du doublet géothermique de Melleray, du fait des difficultés rencontrées lors de la réinjection, ne doit pas masquer les réelles qualités de l'aquifère du Trias, même si celui-ci est géologiquement plus complexe et technologiquement plus difficile que celui du Dogger sus-jacent. ■

Fig. 8 : Carte du potentiel géothermique de la formation triasique des « Grès de Chaunoy » à l'échelle du bassin de Paris.

Fig. 8: Map of the geothermal potential of the Triassic formation known as "Grès de Chaunoy" at the scale of the Paris basin.

© Bouchot et al., 2008.



Energy Assets in the Loire Basin

The Loire and its tributaries contribute to the development of a number of forms of energy. They allow electricity to be generated via hydraulic and nuclear technology at five dams located upstream from the basin and five nuclear power plants further down. Thus, thanks to its high discharge rate and the dams that control it, the Loire provides hydraulic conditions favourable for cooling nuclear power plant condensers. Although coal is no longer exploited in the northern part of the upper Loire Basin, it remains a potentially interesting resource, provided the environmental impact is mastered. Furthermore, the subsurface of the Loire's catchment area offers conditions conducive to the development of geothermal energy: recent volcanic formations, a sedimentary basin and an old Hercynian basement. The geothermal resources reflect this geological diversity, and geothermal potentials are plentiful and promising. In the river's upstream portion, north of the French Massif Central, these geothermal potentials are varied. Recent volcanism reflects the presence of heat sources at depth that might be harnessed to produce geothermal electricity. The deep sedimentary basin of Limagne, particularly the tertiary sandstone reservoir, displays temperatures appropriate for heat production. Beneath these sediments the Variscan basement rock, probably fractured, could support the development of projects to generate electricity or an electricity/heat combination using Enhanced Geothermal System (EGS) technology. Downstream, on the southern rim of the Paris basin, sedimentary aquifers from the Triassic (sandy) and Dogger (carbonate) (~600 m) formations are currently being tapped in Châteauroux via heat pumps for residential heating and to heat an administrative building. When these aquifers lie at greater depth (1000 à 2000 m), they constitute geothermal reservoirs with a potential for heat production. Lastly, in the Sologne region, Triassic sandstones are used to store gas in order to regulate gas supply to households.

► LA PRODUCTION HYDROÉLECTRIQUE SUR LE BASSIN LOIRE-BRETAGNE

Suivi des mesures et valorisation des données – Direction des Politiques d'Intervention – Agence de l'eau Loire-Bretagne
Bénédicte Parard – Bénédicte.PARARD@eau-loire-bretagne.fr
Franck Eymery – Franck.EYMERY@eau-loire-bretagne.fr

Le bassin Loire-Bretagne comporte environ 500 centrales hydroélectriques sur l'ensemble de son réseau hydrographique dont la puissance globale est d'environ 1 000 MW. Dans l'absolu, le potentiel hydroélectrique du bassin pourrait être quasiment doublé. Cependant, le respect des contraintes réglementaires et écologiques limite la puissance potentielle mobilisable de manière réaliste à environ 30 % (soit environ 250 MW)⁽¹⁾. ■

(1) – Sources et données : Agence de l'eau Loire-Bretagne, documents d'accompagnement du SDAGE Loire-Bretagne 2010-2015.

Ouvrage	Hauteur de l'ouvrage (en m)	Production 2008 (en kwh)	Volume turbiné (en Mm³)
La Roche	11,5	49 199 000	2 093,453
Teillet	41,8	47 536 000	556,482
Villerest	45,8	184 245 000	1 968,498
Grangent	50,0	123 405 520	1 207,728
Eguzon	58,2	127 583 800	1 072,697
Poutes	64,2	49 201 680	375,015
Les Fades	75,6	90 988 720	588,939
Montfermy	130,0	43 099 330	162,230
Ance Du Nord	158,0	40 472 390	125,344
La Valette	188,3	42 489 740	110,417
Peyrat	252,0	142 469 000	276,646
Montpezat	638,0	386 933 560	296,770

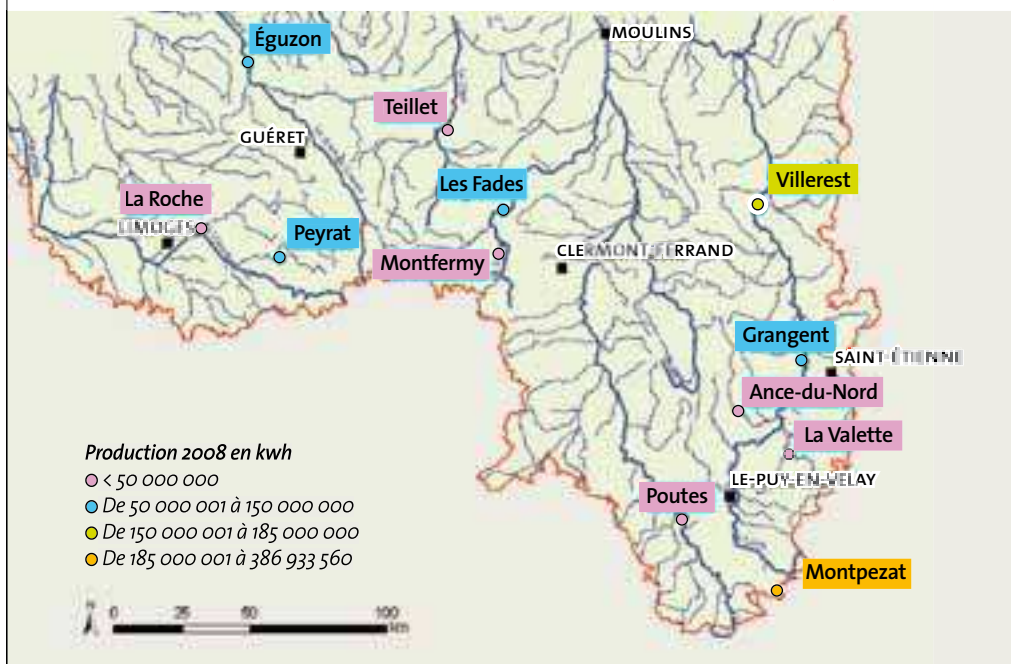
► Principaux ouvrages hydroélectriques du bassin de la Loire.

Main hydroelectric plants in the Loire basin.

Localisation des principaux ouvrages hydroélectriques du bassin de la Loire.

Location of the main hydroelectric plants in the Loire basin.

© AELB.



Références bibliographiques : Bouchet V., Dezayes C., Lopez S., Millot R., Bialkowski A., Calcagno Ph., Sanjuan B., Jorand C., Ossi A., Courrioux G., Genter A., Garibaldi C., Bonté D., Guillou-Frottier L., Thinin I., Tourlière B., Brach M., Hervé J.-Y., Innocent C., Négrel Ph., Delobelle G., Baujard C., Kohl T. (2008) – Projet CLASTIQ : CLAYed sandStone In Question. Rapport final BRGM/RP-56626-FR, 68 p. Calcagno Ph., Baujard C., Dagallier A., Guillou-Frottier L., Genter A., (2009) – Three-dimensional estimation of geothermal potential from geological field data: The Limagne geothermal reservoir case study (France), Trans. Geothermal Resources Council, Vol. 33. Genter A., Giot D., Lieutenant N., Nehlig P., Rocher Ph., Roig J.-Y., Chevrement Ph., Guillou-Frottier L., Martelet G., Bitri A., Perrin J., Serrano O., Courtois N., Vigouroux Ph., Négrel Ph., Serra H., Petelet-Giraud E., (2003) – Méthodologie de l'inventaire géothermique des Limagnes : Projet COPGEN, Compilation des données, Rapport BRGM/RP-52644-FR, 122 p. Hurlig E., Cermak V., Haenel R., Zui V., (1991) – Geothermal Atlas of Europe: Hermann Haack Verlagsgesellschaft, 156 p. Lucazeau F., Vasseur G., Kast Y., Jolivet J., (1981) – Données du flux de chaleur dans le Massif central français, Ann. Géophys., 37-3, pp. 481-491. Pallard G., (2009) – Évaluation du potentiel géothermique haute température du Massif central français. Mémoire d'Ingénieur Géologue n° 363, encadrement BRGM, 2009, 92 p. Varet J., Stieltjes L., Gadalia A., Demange J., Lopoukhine M., (1977) – Évaluation du potentiel géothermique du Massif central français. Rapport interne BRGM 77 SGN 594 GTH, 367 p.