

Numéro 207 - Décembre 2020 - 20 € - ISSN 0016.7916 - Trimestriel



Géologues

REVUE OFFICIELLE DE LA SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DE FRANCE
Géosciences appliquées

Dossier

***L'hydrogéologie face
aux extrêmes climatiques***

DIRECTEUR DE PUBLICATION :

François BAUDIN

RÉDACTEUR EN CHEF :

Marc BRISEBARRE

CONSEILLER PUBLICATIONS :

François LEPARMENTIER

COMITÉ DE RÉDACTION :**SECTION GÉOLOGIE DE L'INGÉNIEUR**

Marianne CHAHINE

Denis FABRE

SECTION EAU

Jean-Pierre FAILLAT

Anthony LE BEUX

Lahcen ZOUHRI

SECTION GÉOPHYSIQUE

Antoine BOUVIER

Christian HERISSON

Jean-Marc MIEHE

SECTION SUBSTANCES MINÉRALES

Patrice CAUMARTIN

Michel JÉBRAK

Christian POLAK

Véronique TOURNIS

SECTION ÉNERGIE

Marc BLAIZOT

Éléonore DALMAIS

Jean-Marc FLEURY

Jean-Jacques JARRIGE

SECTION ENSEIGNEMENT ET RECHERCHE

Christian BECK

Roselyne FRIEDENBERG

Cyril SCHAMPER

SECTION AFFAIRES PROFESSIONNELLES

Eric MARCOUX

SECTION JEUNES

Edith KUBIK

SECRETARIAT DE RÉDACTION :

redac.geologues@geosoc.fr

Géologues est la revue officielle de la Société Géologique de France.

Géosciences Appliquées.

Association loi de 1901, fondée en 1830 et reconnue d'utilité publique par Ordonnance du Roi du 3 avril 1832.

SIÈGE SOCIAL :

77, rue Claude Bernard - 75005 PARIS

01 43 31 77 35 - accueil@geosoc.fr

Site Internet : www.geosoc.fr

RÉGIE PUBLICITAIRE :

FFE - 15 rue des Sablons - 75116 PARIS

DIRECTEUR DE LA PUBLICITÉ :

Patrick SARFATI

RESPONSABLE PARTENARIATS PUBLICITAIRES :

Philippe LEGOFF - 06 66 84 36 37

philippe.legoff@ffe.fr

ASSISTANTE DE FABRICATION :

Aurélie VUILLEMIN - 01 53 36 20 40

aurelie.vuillemin@ffe.fr

MISE EN PAGE ET COUVERTURE :

Jean-Claude MANCHON - ORLÉANS

IMPRIMÉ EN FRANCE PAR

CHEVILLON IMPRIMEUR

26, boulevard Kennedy - 89100 SENS

Commission paritaire

CPPAP n°0125G82626

Dépôt légal à parution



Patrick Lachassagne¹,
Président du CFH.



Marc Brisebarre²,
Rédacteur en chef
de "Géologues".



Thierry Pay³,
Président de l'AHSP.

La nécessité de gérer la ressource en eau est une évidence, particulièrement dans le contexte de changement global et, plus précisément, face aux extrêmes climatiques. C'est donc l'objet de ce numéro annuel consacré aux eaux souterraines, élaboré en collaboration avec nos collègues du CFH et de l'AHSP. Qu'il nous soit permis, avant d'aborder cette thématique, de remercier très chaleureusement Serge Lallier (CFH) qui, depuis de longues années, est l'une des chevilles ouvrières de cette collaboration et dont ce numéro est « son » dernier numéro.

La diversité des environnements géologiques qui composent le sous-sol français entraîne une grande variété de types d'aquifères avec des problématiques spécifiques auxquelles la communauté des hydrogéologues doit répondre. Jusqu'au début de ce troisième millénaire, l'environnement naturel de la Terre était considéré comme globalement stable. Aussi les outils de prévision prenaient-ils en compte comme données d'entrée, notamment pour ce qui concerne la recharge des aquifères, des données hydroclimatiques basées sur des statistiques qui s'inscrivaient dans des fourchettes de valeurs globalement stables permettant l'élaboration de scénarii prospectifs relativement fiables. Malheureusement, la consommation sans cesse croissante de ressources énergétiques carbonées fossiles depuis plus d'un siècle se solde depuis quelques décennies par un réchauffement et un dérèglement climatique qui s'amplifie. Ainsi la prise en compte des données du GIEC est-elle devenue incontournable pour l'hydrogéologue dans l'élaboration de scénarii de prévision de l'état des aquifères. Prévision, d'abord, sur le plan de la disponibilité ; c'est l'objet du premier chapitre, consacré aux outils de suivi du niveau des nappes avec, à titre d'exemple, la méthodologie de réalisation de cartes pour cibler les zones sensibles aux inondations par remontée de nappe ou bien une méthode algorithmique pour anticiper les effets du changement global. Ce changement influe aussi sur la qualité des eaux ; c'est l'objet du second chapitre, qui traite d'une part des outils de suivi de cette qualité avec, par exemple, la présentation d'un dispositif de mesure innovant, le SSERK'ŒIL et, d'autre part, des services écosystémiques rendus par les aquifères. Quant au troisième chapitre, intitulé gestion des nappes et contraintes climatiques, il présente des exemples du changement global sur différents aquifères en France, comme l'ASSEC du Doubs en 2018, mais aussi en Afrique avec la problématique de la surexploitation de la nappe du socle au Burkina Faso.

Ce changement global qui est ainsi très présent dans le *Dossier* du présent numéro l'est également dans les autres rubriques. On verra ainsi, dans les *Actualités*, que le changement peut être abordé sous l'angle d'une tempête, comme la tempête *Alex*, ou encore sous celui de la problématique du captage et du stockage du CO₂ ; dans la rubrique *Jeune entreprise*, il sera vu sous l'angle de la recherche des énergies renouvelables avec un projet de micro-STEP.

Mais ces rubriques – et c'était l'un des objectifs de cette nouvelle formule inaugurée avec le numéro précédent – ouvrent aussi sur d'autres aspects des géosciences ; ainsi, dans les *Actualités*, les jeunes géotechniciens lauréats du prix Jean Goguel présentent leurs travaux.

Ceci n'est qu'un bref aperçu des nombreux articles qui s'offrent à vous. Bonne lecture.

1. Courriel : patrick.lachassagne@umontpellier.fr

2. Courriel : redac.geologues@geosoc.fr

3. Courriel : thierry.pay@calvados.fr



Crédit photo : Philippe Crochet

Photo de première de couverture :
Piézomètre artésien, Washington Ranch,
Carlsbad (New Mexico, USA).

Éditorial	1
Actualités	6
EXTRÊMES MÉTÉOROLOGIQUES	6
La tempête Alex	6
<i>Marc Brisebarre.</i>	
Étude géotechnique obligatoire dans les zones exposées au risque de retrait-gonflement des sols argileux	7
<i>Marc Brisebarre.</i>	
GÉOTHERMIE	8
Sismicité dans la région strasbourgeoise	8
<i>Eléonore Dalmais.</i>	
Parution du neuvième rapport annuel de l'European Geothermal Energy Council (EGEC) : La situation et les perspectives de la géothermie en Europe	10
<i>François Leparmentier.</i>	
CAPTAGE DU CO₂	11
Avis de l'ADEME sur le captage et le stockage géologique de CO ₂ en France	11
<i>François Leparmentier.</i>	
Rapport de l'Agence Internationale de l'Énergie : captage, utilisation et stockage du carbone	13
<i>François Leparmentier.</i>	
Le projet de séquestration sous-marine de CO ₂ de Longship	14
<i>François Leparmentier.</i>	
RESSOURCES EN EAU	15
Démarrage de la centrale hydroélectrique de Romanche-Gavet	15
<i>François Leparmentier.</i>	
Vers une gestion active de la ressource en eau	16
<i>François Leparmentier.</i>	
PRIX JEAN GOGUEL	17
Nouvelles méthodes de suivi de terrains instables par réseau de capteurs passifs RFID	17
<i>Mathieu Le Breton, Laurent Baillet, Éric Larose, Smail Tedjini, Frédéric Liébault, Nicolas Grunbaum, Etienne Rey, Fabrice Guyoton.</i>	
Établissement d'un modèle statistique de vieillisse- ment des ouvrages ferroviaires souterrains ; valorisation de données patrimoniales	19
<i>Flavien Chapuis.</i>	
HYDROGÈNE	20
Rapport de l'Académie des Technologies : rôle de l'hydrogène dans une économie décarbonée	20
<i>François Leparmentier.</i>	
Le projet HyGéo de stockage géologique d'hydrogène	21
<i>François Leparmentier.</i>	
RESSOURCES MINÉRALES	22
Le 69 ^{ème} congrès exposition de la Société de l'Industrie Minérale (SIM) s'est tenu à Angers du 6 au 9 octobre 2020	22
<i>François Leparmentier.</i>	
Le nouveau code minier... tant attendu	22
<i>François Leparmentier.</i>	
ENSEIGNEMENT / RECHERCHE	23
L'ESIEE Amiens rejoint le groupe UniLaSalle	23
<i>François Leparmentier.</i>	
Le classement de Shangai 2020	23
<i>François Leparmentier.</i>	
Informations de la SGF	24
Journée(s) Nationale(s) de la Géologie	24
<i>François Baudin.</i>	
Jean-Jacques Biteau lauréat du Prix Léon Bertrand de la SGF	25
<i>Jean-Jacques Jarrige.</i>	
Jeune entreprise	26
STEPSOL	26
<i>François Leparmentier.</i>	

Décryptage 28

La ressource en eau : vers une ère de conflits ? 28

François Leparmentier.

Dossier 31

L'hydrogéologie face aux extrêmes climatiques

LES OUTILS DE SUIVI DU NIVEAU DES NAPPES 31

Sécheresse hydrogéologique : comment définir la sensibilité des nappes aux déficits pluviométriques à partir des chroniques piézométriques ?

Application sur la région Grand Est (France). 31

Delphine Allier, Jean-Charles Manceau, Etienne Buscarlet, Thomas Klinka, Murielle Chabart et Xavier Marly.

Différents outils d'analyses des chroniques piézométriques ont été mis en œuvre et appliqués sur la région Grand Est, dans l'objectif de qualifier la sensibilité des nappes captées à la sécheresse météorologique. Ces outils, en particulier le périodogramme et la courbe de décharge seront décrits dans l'article, ainsi que les résultats obtenus sur la région Grand Est où l'on retrouve une assez grande diversité de dynamique.

Comment cartographier les zones sensibles aux inondations par remontée de nappe résultant d'épisodes pluvieux intenses et répétés 37

Hélène Bessière, Alexandre Brugeron, Bernard Bourguine, Michael Foumelis et Hortense Blanchet.

Les inondations par remontée de nappe sont des phénomènes majeurs, résultant d'événements pluvieux de forte intensité et répétés sur plusieurs mois voire plusieurs années, qui peuvent engendrer des dégâts importants. Il est primordial de pouvoir cibler les zones sensibles aux remontées de nappe pour la gestion et l'anticipation de ces phénomènes. Cet article présente les étapes méthodologiques pour la réalisation de carte de sensibilité aux remontées de nappe à l'échelle locale. Des nouvelles techniques d'analyse des images satellite ont été développées ainsi qu'une exploration de différentes méthodes d'interpolation reposant sur l'analyse géostatistique.

Le bulletin de situation des nappes : les clés de lecture pour anticiper les événements extrêmes ... 46

Violaine Bault et Marc Laurencelle.

Le bulletin de situation hydrologique des nappes représente un bilan synthétique de l'évolution mensuelle des ressources en eau souterraine destiné au grand public. La détermination de la cyclicité des masses d'eau permet d'appréhender le comportement des nappes et de se

projeter dans les semaines à venir. Les clés de lecture simples fournies dans ces travaux permettent ainsi d'anticiper les événements extrêmes.

Influence de la variabilité basse-fréquence des niveaux piézométriques sur l'occurrence et l'amplitude des extrêmes 53

Lisa Baulon, Delphine Allier, Nicolas Massei, Hélène Bessière, Matthieu Fournier et Violaine Bault.

Dans un contexte de changement global, il est crucial de comprendre les liens entre les extrêmes piézométriques, à l'origine des sécheresses hydrogéologiques et des inondations par remontées de nappe, et la variabilité climatique. Pour répondre à cette problématique, une base de données de piézomètres peu influencés par les activités humaines a été constituée. Pour un grand nombre de piézomètres, les fluctuations basse-fréquence d'origine climatique apparaissent responsables de dépassements de seuils (minima ou maxima) tout à fait significatifs durant les dernières décennies.

Estimation algorithmique des paramètres hydrodynamiques du Modèle Nord-Aquitain : approche opérationnelle pour anticiper les effets du changement global 61

Ryma Aissat, Alexandre Pryet, Marc Saltel et Alain Dupuy.

La calibration des paramètres distribués des modèles hydrogéologiques régionaux est un défi technique majeur. Cette étude présente la mise en œuvre d'une méthode algorithmique pour l'estimation des paramètres d'emmagasinement et de conductivité hydraulique du Modèle Nord-Aquitain (MONA). L'intérêt de l'approche est illustré pour la prédiction des variations de stock à l'horizon 2050 prenant en compte le changement climatique et l'évolution de la demande en eau.

LES OUTILS DE SUIVI DE LA QUALITÉ DES EAUX - AQUIFÈRES ET SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES 68

Le SSERK'ŒIL : un dispositif de mesure haute-fréquence innovant pour la surveillance de la qualité des milieux aquatiques 68

Guillaume Lorette, Roland Lastennet, Alain Denis, Nicolas Peyraube, Fabien Naessens, Sylvain Mateo, Nicolas Houillon, Jean-Christophe Studer, Jérôme Donnette, Julien Frant et Pierre Pinet.

Le SSERK'ŒIL (Système de Surveillance d'Étude et de Recherche sur le Karst – Observation, enregistrement, Interprétation, Laboratoire in situ) est un dispositif qui vise à résoudre le problème de l'échantillonnage de la ressource en eau à des fins d'analyse en lui substituant un suivi in situ et « en continu » des milieux aquatiques, avec un pas de temps de mesure modulable. Il a été testé et mis en place sur les sources karstiques du Toulon qui alimentent en eau potable une partie de l'agglomération de Périgueux.

Un observatoire karstique scientifique et participatif : une solution durable pour le suivi de la qualité des eaux souterraines karstiques Application au système karstique hétérogène de l'Ouyse (Géoparc mondial UNESCO des Causses du Quercy, France) 73

David Viennet, Guillaume Lorette, David Labat, Nicolas Massei, Mathieu Sebilo, Matthieu Fournier, Joël Tremoulet, Christian Brunet, Philippe Bonnet, Denis Arnal et Pierre Crancon.

Pour une surveillance optimale de la qualité et de la quantité de la ressource en eau, il est souvent nécessaire de mettre en place un suivi spatialisé à haute-fréquence temporelle. Toutefois, un tel suivi est souvent accompagné de difficultés de par la surface à couvrir et les problèmes d'accès aux sites de mesures choisis. Dans ce contexte, un programme de suivi scientifique participatif avec la collaboration des clubs de spéléologie du Lot est mis en place sur le système karstique de l'Ouyse, localisé au Nord du Parc naturel régional et Géoparc mondial UNESCO des Causses du Quercy.

Services écosystémiques et solutions fondées sur la nature : quelle place pour les eaux souterraines et pour les hydrogéologues ? 76

Cécile Hérivaux et Jean-Christophe Maréchal.

Les aquifères jouent un rôle important pour la fourniture de plusieurs services aux activités humaines. Ils sont pourtant pour le moment peu pris en compte dans les démarches d'évaluation de services écosystémiques, et de conception des solutions fondées sur la nature. Cet article propose un cadre conceptuel permettant d'articuler aquifères, services écosystémiques et solutions fondées sur la nature, et questionne la place de l'hydrogéologue dans ces démarches.

GESTION DES NAPPES ET CONTRAINTES CLIMATIQUES 85

La recharge des aquifères – un concept en évolution ? 85

Arnaud Willeumier.

La recharge des eaux souterraines est un concept clef de l'hydrogéologie. Il revêt une importance fondamentale au regard des évolutions climatiques passées et encore à venir. Mais que recouvre précisément ce concept ? Désigne-t-il toujours aujourd'hui au sein de la communauté scientifique ce qu'il désignait hier lors de l'élaboration du dictionnaire français d'hydrogéologie ?

L'assec du Doubs en 2018 ou comment se traduit un épisode hydroclimatique exceptionnel en contexte karstique 88

Vincent Fister et Thierry Marguet.

Le massif du Jura a été confronté, en 2018, à un épisode hydroclimatique historique marqué par un fort déficit pluviométrique, entraînant un assec prolongé du Doubs pendant près de six mois sur environ 20 km. La démarche s'intéresse d'abord au contexte hydrogéologique, notamment aux échanges complexes entre la rivière, le calcaire sous-jacent et la vallée de la Loue. Une analyse statistique portée sur les variables d'étiages (VCN à différents pas de temps) permet ensuite de quantifier le caractère exceptionnel de l'étiage 2018 sur le secteur comme étant le deuxième le plus sévère depuis 1906.

Impact du changement climatique sur le niveau de la nappe du Bajo-Bathonien de la plaine de Caen 93

Maëlle Portello, Bentje Brauns, Thierry Gaillard, Daniela Cuba.

L'aquifère du bajo-bathonien de la plaine de Caen constitue l'aquifère principal pour l'alimentation en eau potable de ce territoire. Le présent article étudie l'impact possible du réchauffement climatique sur la dégradation de l'aquifère au travers de deux méthodes d'analyse du signal piézométrique de la nappe de Caen.

La nappe astienne face aux extrêmes climatiques : vers une gestion optimisée du stock et des usages 100

Gwendoline Mombertrand et Véronique Dubois.

La nappe des sables de l'Astien, située dans le département de l'Hérault, subit des phénomènes climatiques extrêmes récurrents, manifestations du changement climatique en cours. Cela se traduit par des épisodes de sécheresse estivale sévères et répétés, contrastant avec des épisodes pluvieux tout aussi remarquables à l'automne et en hiver. Cet article traite des spécificités de la nappe astienne qu'il serait intéressant de prendre en compte pour tirer le meilleur parti de ces conditions climatiques pour faire face, en particulier, aux pénuries d'eau.

La surexploitation de la nappe profonde du socle au Burkina Faso : l'exemple de Ouahigouya. Vers une catastrophe annoncée 106

A. Babine, H. Sanfo, A. Hébié, S. Nakolendousse, M. Dzikowski, D. Brondel et G. Nicoud.

L'étude menée par la coopération décentralisée Chambéry-Ouahigouya a montré que les ouvrages profonds alimentant les 37 villages ruraux de la commune de Ouahigouya (Burkina Faso) exploitent la nappe du socle dont la pérennité à moyen terme n'est plus assurée ; une solution pourrait être, lorsque cela est possible, d'améliorer le puisage dans la nappe superficielle de la cuirasse qu'exploitaient autrefois les Dogons avec les puits traditionnels puis de traiter l'eau.