HAL
open science

Vulnérabilité et adaptation au changement climatique : L'apport des Géosciences

Gonéri Le Cozannet, Nadia Amraoui, Audrey Baills

To cite this version:

Gonéri Le Cozannet, Nadia Amraoui, Audrey Baills. Vulnérabilité et adaptation au changement climatique : L'apport des Géosciences. Géosciences, 2015, N° spécial "Géosciences et Changements climatiques", pp.16-27. hal-01201795

HAL Id: hal-01201795

https://brgm.hal.science/hal-01201795v1

Submitted on 18 Sep 2015

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.

Vulnérabilité et adaptation au changement climatique : l'apport des géosciences

Si les données manquent aujourd'hui pour faire la part entre les différentes causes des évolutions observées (climatiques, anthropiques, naturelles), de nombreux exercices de modélisation anticipent des changements climatiques majeurs. Puisqu'une part des changements à venir ne pourra être évitée, l'adaptation au changement climatique est petit à petit intégrée dans les politiques publiques.

Exemple de recul d'un glacier de montagne entre 2000 et 2008 (glacier d'Athabasca, parc de Jasper, Alberta, Canada).
© A. Baills

Gonéri Le Cozannet
Ingénieur
BRGM, Direction des risques et de la prévention
g.lecozannet@brgm.fr

Nadia Amraoui
Hydrogéologue chef de projets
BRGM, Direction eau, environnement et écotechnologies
n.amraoui@brgm.fr

Audrey Baills
Ingénieur risques naturels
BRGM, Direction des risques et de la prévention
a.baills@brgm.fr

Températures, précipitations et niveau de la mer sont autant de variables climatiques affectées par le réchauffement global actuellement observé. Depuis une vingtaine d'années, ces changements sont devenus une préoccupation sociétale majeure, non seulement en raison de leur ampleur, mais aussi parce que le nombre de systèmes potentiellement affectés est considérable : dans le seul domaine des géosciences, il s'agit d'examiner des risques aussi divers que les submersions marines ou par remontée de nappes, l'érosion des sols et du littoral, les mouvements gravitaires, les processus de retrait-gonflement des sols argileux ou encore les menaces sur la qualité et la quantité de la ressource en eau.

Pourtant, quelle que soit la thématique considérée, des questions similaires se posent : peut-on déjà percevoir des effets du réchauffement climatique dans les phénomènes aujourd'hui observés ? Comment estimer les évolutions futures ? Comment nous adapter à de nouvelles conditions environnementales résultant à la fois du changement climatique et des pressions d'origine anthropique ? Cet article examine ces questions au travers des exemples publiés dans la revue *Géosciences* ces dix dernières années.

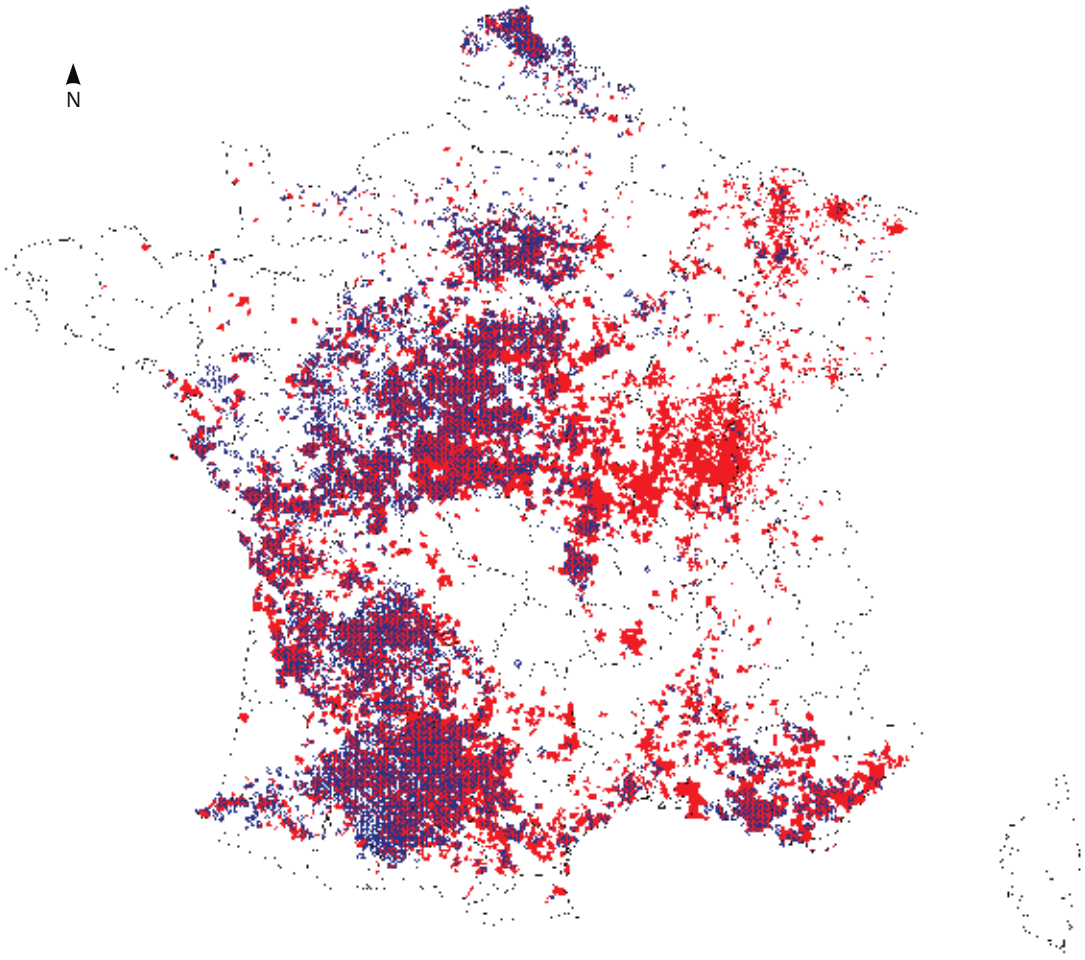


Fig. 1 : Communes françaises ayant formulé une demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle « sécheresse » pour l'été 2003. En bleu, commune reconnue avant 2003 ; en rouge, commune ayant déposé une demande pour l'été 2003.

Source : MEDD/BRGM août 2005 ; *Géosciences* n° 3 : Vincent, 2006.

Observations des effets du changement climatique contemporain

Dès qu'une catastrophe hydrométéorologique survient, la question du rôle joué par le changement climatique est posée. Dans le *Géosciences* n° 3, Vincent (2006) s'interroge sur le rôle de nos émissions de gaz à effet de serre sur un aléa géologique particulièrement sensible aux conditions hydrométéorologiques : le retrait-gonflement des argiles. Ce phénomène naturel est la conséquence de variations de la teneur en eau des sols argileux pouvant entraîner la fissuration de maisons individuelles et les mener jusqu'à la ruine. L'événement induit par la sécheresse de 2003 est remarquable de par son extension spatiale *(figure 1)* et son coût pour la collectivité, puisque plus d'un milliard d'euros ont été versés pour indemniser les victimes des dommages liés au retrait-gonflement des argiles.

Mais quel rôle joue le changement du climat dans un tel événement ? Une réponse partielle à cette question ne peut être formulée que de manière probabiliste [*Géosciences* n° 3 ; Gillet (2006)]. Ainsi, Stott *et al.* (2004) ont montré que, dans le climat actuel, une canicule telle que celle de 2003 a au moins deux fois plus de chances de se produire que pendant la période pré-industrielle. Mais pour ce qui concerne les dommages constatés, Vincent (2006) rappelle que les données statistiques manquent pour conclure sur le rôle joué par le climat. De fait, dans la genèse des catastrophes dites « naturelles », les responsabilités humaines sont des facteurs déterminants à prendre en compte [*Géosciences* n° 3 ; Modaressi (2006)].

Dans le cas de la sécheresse de 2003, il s'agirait notamment d'examiner l'évolution de l'exposition et de la vulnérabilité des maisons individuelles induites par l'extension péri-urbaine et par les pratiques de construction privilégiant des fondations peu profondes. La même question se pose pour de nombreux risques potentiellement liés au changement climatique, tels que les submersions marines, qui se produisent dans des zones où la dynamique urbaine et démographique entraîne une exposition accrue aux risques naturels [*Géosciences* n° 3 ; Lenôtre et Pedreros (2006)].

« Dès qu'une catastrophe hydrométéorologique survient, la question du rôle joué par le changement climatique est posée. »

Pour d'autres phénomènes géologiques tels que les mouvements gravitaires, le rôle des facteurs hydrologiques dans le déclenchement des phénomènes reste souvent mal compris [*Géosciences* n° 3 ; Modaressi (2006)].

Si le rôle joué par le changement climatique dans les catastrophes hydrométéorologiques demeure aujourd'hui difficile à caractériser, qu'en est-il des tendances observées sur le long terme ? Le rapport du GIEC montre un certain nombre de transformations déjà perceptibles et attribuables au changement climatique : fonte des glaciers de montagne *(encadré ci-contre)*, érosion des côtes dans les zones polaires dont les rivages sont de moins en moins protégés par les glaces pendant une partie de l'année… Mais dans beaucoup d'autres cas, il est difficile de conclure : les évolutions restent marquées par une forte variabilité naturelle et par les actions anthropiques.

> *Dans les zones côtières, la dynamique urbaine entraîne une exposition accrue aux risques naturels.*

C'est le cas par exemple pour un certain nombre d'atolls de Polynésie française, pour lesquels l'élévation du niveau de la mer seule ne peut expliquer les migrations du trait de côte observées [*Géosciences* n° 17 ; Le Cozannet *et al.* (2011) ; *figure 2*]. Les données longues et pérennes qui permettraient de déceler un signal lié au changement climatique par-delà la variabilité des évolutions naturelles et anthropiques manquent. Ceci est illustré également dans le cas des niveaux des nappes d'eaux souterraines, pour lesquelles il est prévu de compléter le réseau d'observation national afin de mieux détecter des signaux précurseurs du changement climatique *(voir encadré p. 20)*.

Prévention de risques induits par les glaciers de montagne

Jean-Michel Baltassat et Jean-François Girard – BRGM – Direction des risques et de la prévention – jm.baltassat@brgm.fr – jf.girard@brgm.fr

L'une des manifestations majeures du changement climatique est la fonte des glaciers de montagne, observée dans de nombreux sites, notamment dans les Alpes. Avec ce phénomène, les conditions en montagne se trouvent modifiées et un certain nombre de risques changent. Dans le cas du glacier de Tête Rousse, la préoccupation majeure est la constitution d'une poche d'eau à l'intérieur du glacier. Sa vidange soudaine avait provoqué la mort de 175 personnes et la destruction des thermes de Saint-Gervais-les-Bains en 1892.
La découverte d'une nouvelle poche en 2010 et les risques d'une vidange torrentielle menaçant 3 000 personnes dans la vallée en aval ont motivé un suivi régulier du phénomène, incluant une mesure des variations du volume d'eau par sondage de résonance magnétique des protons (RMP). Les processus conduisant à la formation de ces poches d'eau intraglaciaire demeurent mal connus, notamment en raison de la rareté du phénomène et des rares études qui lui sont consacrées [Vincent *et al.* (2015)]. Bien que la relation du phénomène avec le changement climatique soit mal établie, cet exemple illustre néanmoins le besoin de prévenir sans cesse des risques changeants en milieu montagnard.

Source : Vincent *et al.* (2015) – Mechanisms of subglacial cavity filling in Tête Rousse glacier. Journal of Glaciology.

Suivi de la poche d'eau intraglaciaire de Tête Rousse (altitude 3 200 m) par sondage de résonance magnétique des protons (RMP).

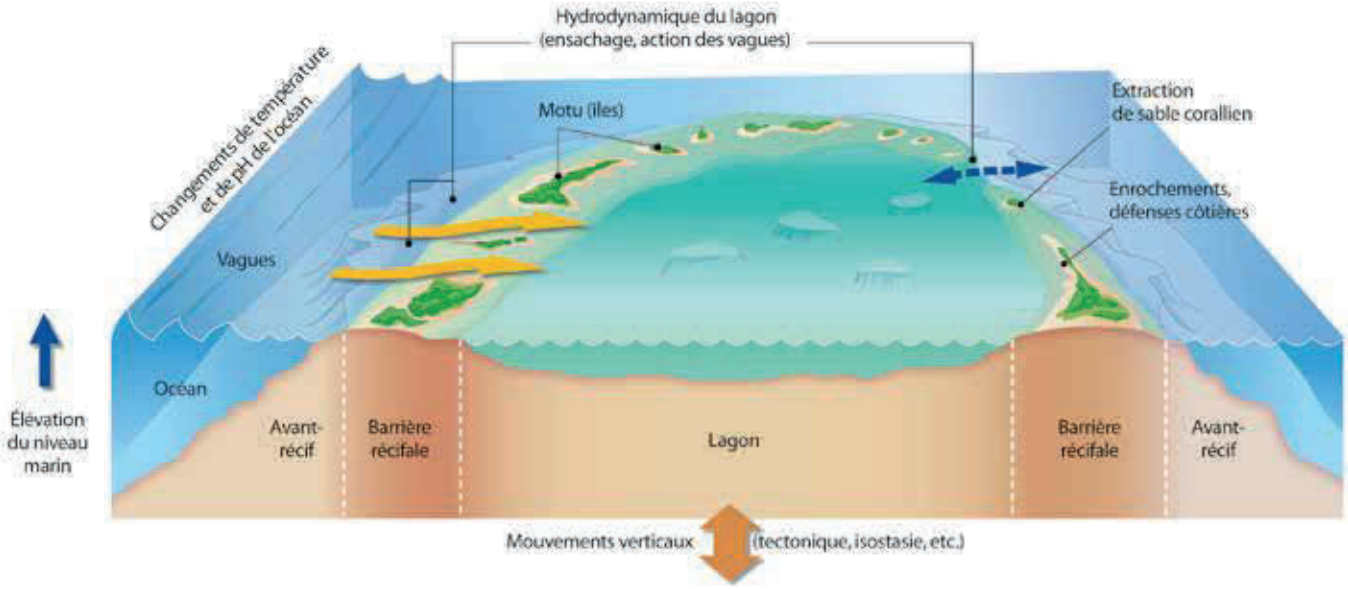


Fig. 2 : Processus côtiers affectant la ligne de rivage et les transports sédimentaires des atolls. Aujourd'hui, les observations disponibles pour les atolls de Polynésie révèlent une grande variabilité d'évolutions. Les effets des vagues, courants, tempêtes, cyclones et activités humaines sont tels qu'ils masquent ceux de l'élévation du niveau de la mer.
Source : Le Cozannet *et al.*, 2011, *Géosciences* n° 14.

Ainsi, pour de nombreux systèmes de la sphère des géosciences, la question de l'identification d'un rôle du climat dans les évolutions observées est complexe : d'une part, un grand nombre de facteurs non climatiques entrent en jeu ; d'autre part, une meilleure distribution spatiale et temporelle des données serait nécessaire pour conclure. Pourtant, comme cela est souligné dans le rapport du GIEC consacré à « l'attribution et la détection d'impacts du changement climatique » [Cramer *et al.* (2014)], il est important de traiter cette question afin de stimuler des actions en faveur de l'adaptation et de la réduction des émissions de gaz à effet de serre. La réponse à cette demande passe par des progrès en matière de modélisations et d'observations de processus géodynamiques.

De l'élaboration de scénarios à l'évaluation de la vulnérabilité

Pour ce qui concerne les risques géologiques, hydrogéologiques et côtiers, la situation actuelle demeure marquée non seulement par une forte variabilité naturelle, mais aussi par une exposition et une vulnérabilité accrue aux différents risques pour les personnes, les biens et les ressources [Modaressi (2009) ; Dörfliger et Perrin (2011)]. Pour le futur, en revanche, le changement climatique peut devenir un facteur majeur d'évolution de ces mêmes risques. Pour s'en convaincre, il suffit de considérer l'ampleur des changements anticipés par le GIEC pour les températures globales, le cycle de l'eau et l'élévation du niveau de la mer dans le prochain siècle *(voir Thiéblemont* et al.*, ce numéro)*.

> *Des progrès restent à faire en matière de modélisations et d'observations des processus géodynamiques.*

En Europe, ces changements concerneront principalement trois risques majeurs[1] : les inondations, notamment dans les zones côtières [*Géosciences* n° 3 : Lenôtre et Pedreros (2006)] ; les risques pour la qualité et la quantité des ressources en eau [Dörfliger et Perrin (2011)] et ceux induits par les sécheresses et les vagues de chaleur, dont fait partie le retrait-gonflement des argiles [Vincent (2006)].

(1) IPCC, WGII, AR5, chapitre 23.

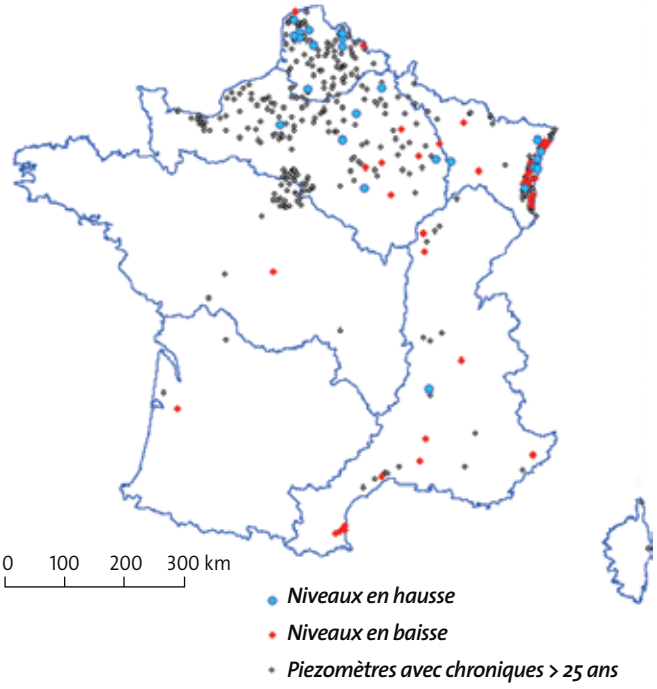
Observer les conséquences du changement climatique sur les eaux souterraines

Jean-François Vernoux – BRGM – Direction eau, environnement et écotechnologies – Jf.vernoux@brgm.fr

La France métropolitaine dispose d'un réseau de piézomètres relativement ancien. Peut-on identifier, dans ce réseau, des tendances significatives qui seraient attribuables au changement climatique ? Si l'on considère les 377 piézomètres présentant des durées d'enregistrements supérieures à 25 ans, on constate que peu d'entre eux présentent des tendances significatives, en raison de l'inertie des systèmes aquifères qui induit une forte autocorrélation des données ; il faudrait pouvoir disposer de chroniques beaucoup plus longues. Par ailleurs, certains enregistrements sont affectés par les prélèvements, et les observations sont mal réparties spatialement. S'il n'est pas aujourd'hui possible de conclure sur l'« observabilité » d'un signal induit par le changement climatique sur les niveaux piézométriques, notre étude (Vernoux et Seguin, 2013) a cependant permis de définir un réseau piézométrique dédié au suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines.

L'approche finalement retenue a été la mise en place d'un réseau constitué d'un nombre limité de piézomètres, représentatifs d'une sélection d'aquifères : aquifère à nappe libre, recharge susceptible d'être impactée par le changement climatique, fluctuations piézométriques marquées, aquifère peu impacté par les prélèvements, aquifère à préserver pour le futur. Au final, une quarantaine d'aquifères ont été sélectionnés. Le choix des piézomètres a quant à lui été guidé par un critère de faible impact anthropique (influence négligeable des pompages sur le niveau de la nappe au droit de l'ouvrage). Un autre critère était de pouvoir disposer d'une chronique de données la plus longue possible.

Ce réseau constituera un méta-réseau du réseau national de suivi quantitatif des eaux souterraines géré au travers de la banque ADES (http://www.ades.eaufrance.fr/) et sera opérationnel courant 2015.



Piézomètres du réseau national de suivi quantitatif des eaux souterraines présentant des enregistrements d'une durée de plus de 25 ans.

Source : Vernoux J.-F., Seguin J.J. (2013) – Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines (année 3) et essai de détermination d'un index piézométrique standardisé. Rapport BRGM/RP-61807-FR, 110 p.

Comment évaluer les conséquences du changement climatique pour les risques géologiques, côtiers et pour les ressources en eau ? Une première approche consiste à utiliser des modèles climatiques et leurs projections de précipitations, températures, voire de niveau de la mer [*Géosciences* n° 12 ; Moatar *et al.* (2010)]. L'impact peut être établi par rapport à un état de référence qui correspond à la période actuelle. Ces approches, fondées sur des modèles déterministes, restent aujourd'hui largement utilisées pour quantifier l'impact potentiel du changement climatique à moyen et long terme pour les risques côtiers et les hydrosystèmes [*Géosciences* n° 3 ; Lenôtre et Pedreros (2006) ; *Géosciences* n° 12 : Moatar *et al.* (2010) projet Explore (2070)].

Il est important de remarquer que cette approche déterministe donne des résultats essentiels en termes de tendances, même lorsque le système considéré dépend de variables climatiques dont les projections sont parfois incertaines, comme les précipitations. Prenons l'exemple des ressources en eaux de surface et souterraines : en France, pour plusieurs bassins tels que ceux de la Loire, la Seine et la Garonne, les résultats de modélisation indiquent une baisse des ressources dès le milieu du XXIe siècle [Projet RExHySS ; Ducharne *et al.* (2009) ; *Géosciences* n° 12 : Moatar *et al.* (2010) ; projet IMAGINE (2030) ; Sauquet, (2009)]. Ils indiquent également des périodes d'étiage prolongées et des extrêmes hydrologiques plus marqués [*Géosciences* n°12 ; Moatar *et al.* (2010)].

Ces résultats sont confirmés par les travaux réalisés dans le cadre du projet Explore 2070, au cours desquels l'évolution de débits des cours d'eau (lot hydrologie de surface) et des aquifères français (lot hydrologie souterraine) à l'horizon 2065 a été simulée en utilisant des projections régionalisées issues de plusieurs modèles de climat utilisant le scénario médian (A1B) d'émission de gaz à effet de serre du 4e exercice du GIEC. Ils font ressortir une baisse quasi générale de la piézométrie associée à une diminution de la recharge, avec globalement deux zones plus sévèrement touchées : le bassin de la Loire, avec une baisse comprise entre 25 et 30 % sur la moitié de la superficie de son bassin-versant, et surtout le sud-ouest de la France, avec des baisses comprises entre 30 et 50 % *(figure 3)*. Cette baisse de la recharge a pour conséquence une baisse du niveau moyen mensuel des nappes. De fortes baisses, pouvant atteindre 10 m, seraient enregistrées sur les plateaux ou contreforts au droit des bassins sédimentaires.

De même, les résultats indiquent une baisse globale des débits moyens annuels à l'échelle du territoire, de l'ordre de 10 à 40 % selon les simulations [Explore 2070, lot hydrologie de surface]. Cette baisse relative des débits s'accompagne d'une diminution marquée des débits d'étiages pour une grande majorité des cours d'eau, sans pour autant réduire les risques de crues qui sont même susceptibles d'augmenter sur certains bassins. Ces approches déterministes ont permis de confirmer que le changement climatique aura bien des conséquences majeures sur les ressources en eau disponibles, malgré les incertitudes qui demeurent sur les baisses effectives attendues.

> *En Europe, le changement climatique affectera trois risques majeurs : les inondations, les ressources en eau et les vagues de chaleur.*

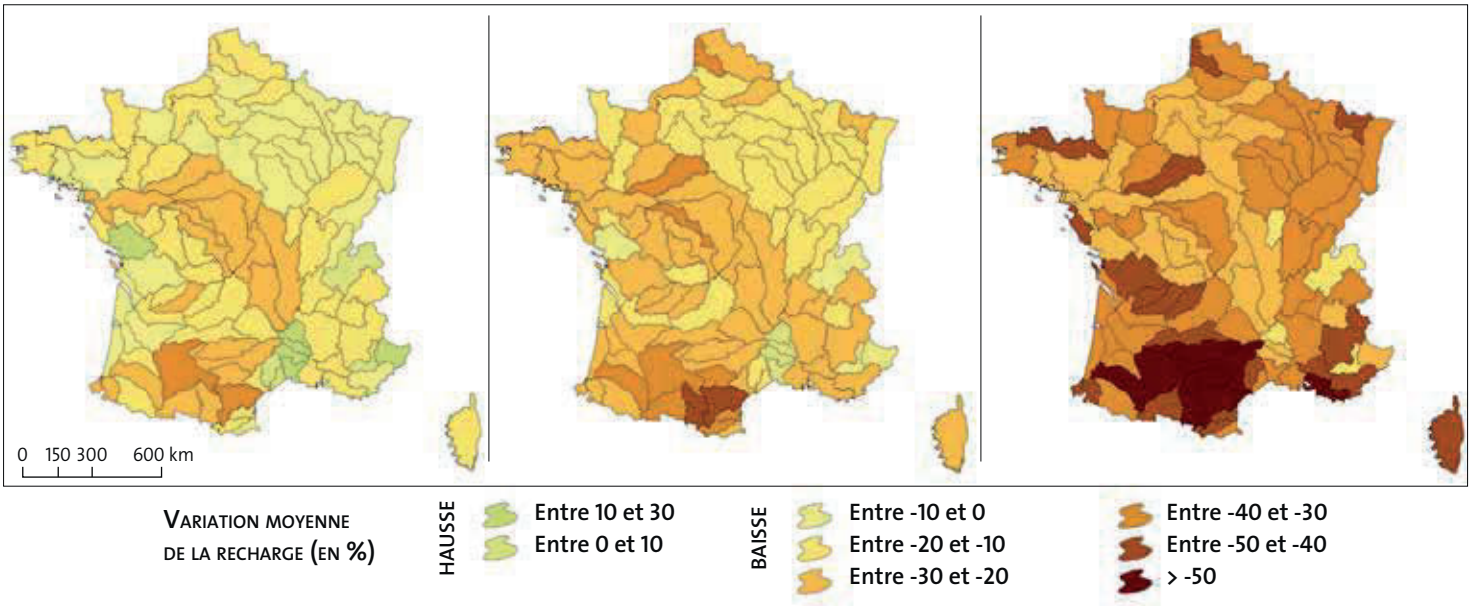
Cependant, plusieurs difficultés se posent alors. La première, évidente, est la prise en compte d'évolutions induites par d'autres facettes des changements environnementaux globaux : évolution des pratiques de gestion des ressources et de l'espace, se traduisant par une vulnérabilité accrue ou au contraire modérée [*Géosciences* n° 17, Levraut et Oliveros (2011)].

Une seconde difficulté est l'hétérogénéité des échelles spatiales à considérer pour l'étude du climat et de ses impacts : contrairement aux variables climatiques qui peuvent être appréciées à une échelle globale ou régionale, les systèmes que nous considérons ne peuvent être caractérisés qu'à des échelles régionales ou locales [Dörfliger et Perrin (2011)]. En conséquence, l'emprise spatiale modeste de nombreux systèmes hydrogéologiques, géologiques et côtiers d'intérêt nécessite l'utilisation de scénarios régionalisés pour corriger les biais des distributions spatio-temporelles des variables simulées et prendre en compte le relief à un niveau de détail le plus fin possible, parfois à la limite de leurs conditions d'utilisation [Modaressi (2009)].

Enfin, une dernière question concerne le traitement des incertitudes, depuis celles affectant les variables climatiques en sortie de modèle à celles des modèles d'impacts : dans le cas des ressources en eaux

Fig. 3 : Variation de la recharge entre temps présent (1960-1990) et temps futur (2045-2065). Écarts minimal, moyen et maximal de la recharge temps futur/temps présent.

Projet Explore 2070. Rapport BRGM/RP-61483-FR, août 2012.



Figures de dessiccation dues à la sécheresse, Éthiopie.
© A. Baills.

souterraines, les projections climatiques futures montrent des changements de température et des précipitations variables selon les régions et les modèles : une tendance générale à l'augmentation de la température, des précipitations accrues au nord de l'Europe mais moindres au sud.

La grande variabilité des projections de précipitations est ici une source d'incertitude qui se répercute dans les estimations de la recharge des aquifères et du débit d'étiage des cours d'eau en période estivale. *In fine*, les incertitudes sont importantes : pour un bassin comme celui de la Loire, la baisse des ressources en eau de surface en moyenne eau et en étiage serait d'environ 30 %, à ± 15 % près, pour un scénario moyen d'émission de GES (A1B).

Parallèlement, pour ce qui concerne l'évolution des aquifères côtiers, l'érosion et la submersion marine, la caractérisation complète des incertitudes devient tout juste possible, avec l'émergence des scénarios d'élévation du niveau de la mer régionalisés et probabilisés. Enfin, d'autres domaines restent à étudier : rôle des variables hydrométérologiques pour certains mouvements gravitaires [*Géosciences* n° 3 ; Modaressi (2006)], implications de la modification des régimes de pluies et du ruissellement, et de l'augmentation prévisible de la température pour la qualité de l'eau. Ainsi, les incertitudes inhérentes aux projections climatiques, aux évolutions futures des pressions anthropiques, mais aussi aux modes de variabilité internes des systèmes étudiés rendent complexe l'évaluation des risques en géosciences à moyen et long terme.

Pour lever ces difficultés, une approche très répandue dans les sciences environnementales consiste à ne plus se focaliser sur des scénarios prédictifs, mais sur les modes d'évolution des systèmes étudiés, leur vulnérabilité à des changements externes, voire leur résilience dans le cas de systèmes disposant d'une capacité d'auto-organisation. Ces approches sont par exemple en fort développement depuis plus d'une dizaine d'années dans le domaine de l'évolution morphodynamique des littoraux sableux [*Géosciences* n° 10 ; Idier et Thiébot (2013)].

Avec ce renversement de perspective, il devient non seulement possible d'améliorer notre connaissance des systèmes étudiés, mais aussi de mieux anticiper les évolutions futures pour un ensemble de changements environnementaux plus vaste. Cette amélioration des connaissances, combinée à celle issue de l'analyse des conséquences des variations des climats passés, permet de mettre en place des analyses multicritères plus fiables et d'établir des cartes couvrant l'ensemble du territoire national. Ces approches ont été notamment utilisées dans le projet Explore 2070 dans le domaine des risques côtiers.

S'adapter au changement climatique

Quelles actions entreprendre vis-à-vis du changement climatique ? Un premier type d'actions est regroupé sous le terme d'« adaptation ». Mais adaptation à quoi ? Dans le cas d'un changement climatique peu atténué, l'adaptation serait rendue particulièrement complexe par l'ampleur des changements anticipés (par exemple, des élévations du niveau de la mer qui atteindraient, puis dépasseraient 1 m au tournant du XXIIe siècle).

L'*encadré* page suivante montre que, pour des côtes basses comme celles du Languedoc, une tempête similaire à celle de 1982 aurait des effets très différents selon l'ampleur de l'élévation du niveau de la mer. Ainsi, on entrevoit des situations très différentes selon les scénarios climatiques et donc selon nos émissions actuelles de gaz à effet de

Modélisation des submersions marines dans le contexte de l'élévation du niveau de la mer

Rodrigo Pedreros, Sophie Lecacheux, Charlotte Vinchon – BRGM – Direction des risques et de la prévention
r.pedreros@brgm.fr – s.lecacheux@brgm.fr – c.vinchon@brgm.fr

Une des conséquences du changement climatique est la remontée du niveau marin qui aggrave l'exposition des zones basses des territoires littoraux aux submersions permanentes et temporaires (se produisant lors des tempêtes). C'est pourquoi le nouveau guide méthodologique des plans de prévention des risques littoraux (PPRL) de mai 2014 inclut dans la cartographie de l'aléa « submersion marine » la prise en compte de l'élévation du niveau de la mer avec une valeur de 0,60 m pour l'échéance 2100.

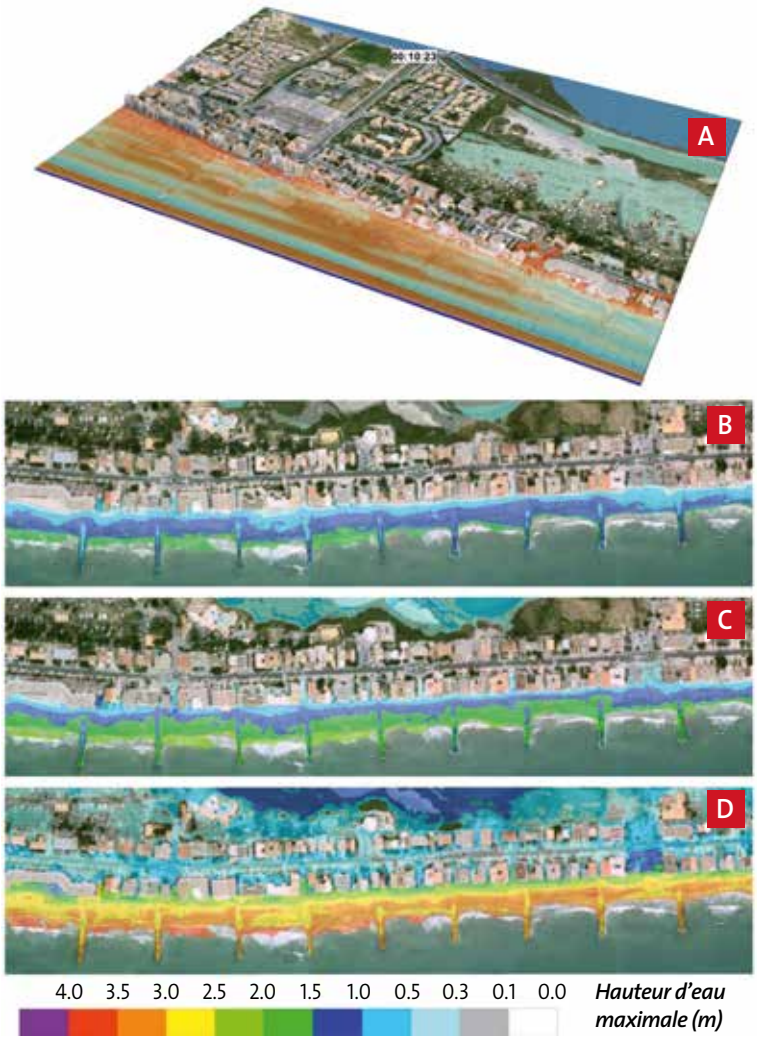
Traditionnellement, la cartographie de l'aléa « submersion marine » est déterminée à partir de la superposition du niveau marin de référence à la topographie. Cette méthode, bien que simple et applicable partout, délimite en fait des zones basses qui peuvent s'étendre dans les terres bien au-delà des zones réellement inondées.

Les récents progrès des outils de modélisation numérique ainsi que la disponibilité des données topo-bathymétriques à très haute résolution spatiale (projet Litto3D, par exemple, porté par l'IGN et le SHOM) permettent désormais de simuler de façon réaliste la submersion marine (chronologie, extension, hauteurs d'eau et écoulements).

La figure ci-contre illustre cette démarche. Il s'agit de la modélisation de la submersion marine à Palavas-les-Flots (Hérault) pour un événement de référence historique (tempête de novembre 1982) et pour un même événement à l'horizon 2100, avec deux hypothèses de remontée du niveau de la mer : 0,35 m et 1 m.

La simulation de ces événements s'appuie sur l'implantation et la validation de modèles « emboîtés », allant de la modélisation au large des vagues et des niveaux d'eau en Méditerranée occidentale, puis au golfe d'Aigues-Mortes, jusqu'à la submersion à terre à Palavas-les-Flots, en prenant compte explicitement du bâti et des ouvrages de protection côtière [Pedreros *et al.* (2011)].

Ce type de modélisation reste aujourd'hui difficile à mettre en œuvre : il nécessite des temps de calcul importants et des données précises (topo-bathymétrie, bâti, etc.). Néanmoins, il répond aux besoins d'une cartographie réaliste de la submersion marine tenant compte des spécificités des territoires littoraux étudiés. C'est pourquoi des exercices de modélisation similaires sont amenés à se développer dans les années à venir, notamment dans le cadre des PPRL.



Modélisation de la submersion marine à Palavas-les-Flots. Exemple d'instantané de la submersion (A). Hauteur d'eau maximale de la zone inondée pour l'événement historique (B) et avec une élévation du niveau marin de 0,35 m (C) et de 1 m (D).
Source : DGPR, MEDDE, 2014.

Sources : Guide méthodologique « Plans de prévention des risques littoraux ». DGPR, MEDDE, mai 2014, 169 p.
Pedreros R., Vinchon C., Delvallée E., Lecacheux S., Balouin Y., Garcin M., Krien Y., Le Cozannet G., Poisson B., Thiebot J., Marche F., Bonneton P. (2011) – Using a multi models approach to assess coastal exposure to marine inundation within a global change context. Geophys. Res. Abstr., Vol. 13, EGU2011-13679, EGU General Assembly 2011, Vienna, Austria.

serre. Ceci rappelle qu'une première mesure, évidente, est de limiter les émissions de gaz à effet de serre afin de limiter les risques d'un changement climatique de très forte ampleur et de faciliter l'adaptation.

Pour faire face à la part inéluctable des changements d'origine climatique du fait de l'inertie du système climatique, de nombreuses études ont d'ores et déjà proposé des mesures d'adaptation en adoptant des approches thématiques (eau, risques, santé, biodiversité) ou sectorielles (agriculture, énergie et industrie, transports, bâtiments et habitat, tourisme) [*Géosciences* n° 3 ; Gillet (2006)]. Ces mesures d'adaptation peuvent être mineures ou entraîner de véritables bouleversements organisationnels.

Aujourd'hui, l'adaptation cherche souvent à favoriser des actions sans regrets, pour lesquelles des bénéfices à court terme sont attendus, y compris en dehors du champ climatique *stricto sensu* [*Géosciences* n° 3 ; Gillet (2006)].

► Stratégies d'adaptation au changement climatique : le cas des viticulteurs du Languedoc-Roussillon

Nina Graveline, Marine Grémont – BRGM – Direction eau, environnement et écotechnologies
n.graveline@brgm.fr – m.gremont@brgm.fr

Le projet SIMADAPT a pour objectif de comprendre la diversité et les déterminants de l'adaptation au changement climatique des viticulteurs du Languedoc-Roussillon. La principale stratégie pour les viticulteurs consiste à adopter l'irrigation, afin de compenser l'accroissement du besoin en eau des plantes. Il y a ainsi un enjeu majeur à comprendre les déterminants qui expliquent le choix du passage à l'irrigation pour pouvoir affiner les prospectives de demande en eau, planifier les infrastructures de distribution et de captage d'eau, ainsi que pour anticiper les impacts sur l'état des ressources en eau.

Nous avons mis en œuvre une méthodologie qui repose sur deux étapes d'acquisition d'informations et de données : la première a consisté à réaliser des entretiens exploratoires et en face-à-face avec des viticulteurs ; la seconde s'est concentrée sur l'élaboration et la diffusion d'un questionnaire par Internet à plus de 3 000 viticulteurs du Languedoc-Roussillon avec l'aide des chambres d'agriculture.

Le questionnaire permet de collecter des données sur les pratiques actuelles et envisagées concernant la gestion hydrique des sols et des plantes et sur les perceptions des changements réglementaires, économiques, technologiques et climatiques passés. Ainsi, 363 enquêtes complètes ont pu être exploitées pour une analyse descriptive et économétrique : 30 % des enquêtés sont déjà irrigants, tandis que 28 % d'entre eux envisagent cette option. Quand ils sont confrontés à un scénario de changement climatique à 2050, 57 % disent qu'ils envisageraient d'irriguer. Ceci illustre l'intérêt d'anticiper la question de la demande future en eau d'irrigation. Parmi les déterminants[1] choisis, nous considérons le terroir (pluie, température, réserve utile), les caractéristiques socio-économiques de l'exploitant et de l'exploitation, les objectifs poursuivis par les viticulteurs et les perceptions des changements passés. Parmi les 11 objectifs proposés dans le questionnaire, seul l'objectif « augmentation du revenu » est déterminant pour l'irrigation. Les objectifs « diminuer le temps de travail » et « contribuer à préserver l'environnement » diminuent la probabilité qu'un viticulteur envisage d'irriguer, tandis qu'« innover » et « développer les stratégies commerciales » augmentent ces probabilités. La résilience des viticulteurs a aussi été analysée face à différents scénarios.

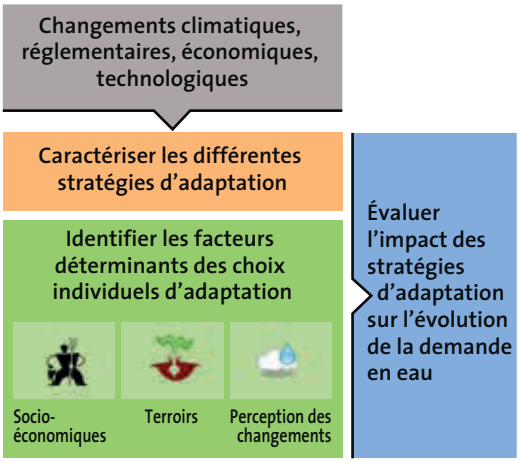


Schéma illustrant l'approche suivie pour analyser les pratiques d'adaptation agricoles et évaluer leurs impacts.
© Réalisé par les auteurs, BRGM.

(1) Un déterminant est une variable qui va statistiquement augmenter la probabilité d'être irrigant ou d'avoir le projet de passer à l'irrigation, toute chose égale par ailleurs.

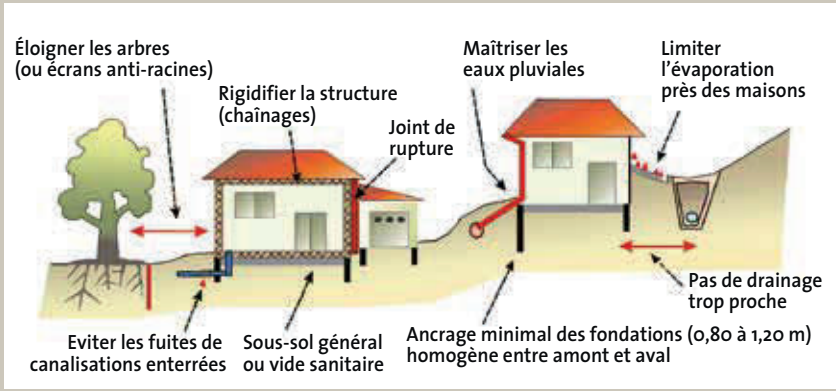


Fig. 4 : Principales mesures préventives préconisées pour construire sur un sol sujet au phénomène de retrait-gonflement des argiles et éviter les dommages à la structure.
Source : Vincent 2006, *Géosciences* n° 3.

Aujourd'hui, l'adaptation cherche souvent à favoriser des actions sans regrets, pour lesquelles des bénéfices à court terme sont attendus.

En pratique, cette forme d'adaptation traite de nombreux problèmes environnementaux, même lorsque ceux-ci ne sont pas (encore) affectés par le changement climatique. C'est par exemple le cas de la protection de la ressource en eau à travers les captages, les gisements ou des bassins hydrogéologiques [*Géosciences* n° 2 : Pointet (2005) ; De Marsilly (2005) ; *Géosciences* n° 5 : Vigouroux et Pointet (2007) ; Penequin *et al.* (2007)]. On pourrait dire qu'il s'agit ici de s'adapter aux conditions environnementales actuelles. Le terme « adaptation » utilisé pour faire référence à ce type d'action publique intègre donc les dimensions sociales, environnementales et économiques de la gestion des risques et des ressources *(voir encadré p.24)*.

Le secteur de la ressource en eau, en France, est un exemple pour lequel les mesures d'adaptation passent avant tout par le renforcement des mesures actuellement prises dans des cas extrêmes. La réduction du gaspillage et la gestion pluriannuelle et non plus annuelle de la cyclicité des épisodes de sécheresse et d'humidité en sont des exemples phares [*Géosciences* n° 3 ; Pinault (2006)]. De même, le système d'observation de la Loire « CRISTAL » [*Géosciences* n° 12 ; Moatar *et al.* (2010)], initialement créé pour anticiper les crues, a tout naturellement été adapté à la surveillance des étiages.

Le secteur de la construction est un autre domaine pour lequel de petites modifications de nos actions actuelles peuvent devenir de véritables mesures d'adaptation. Ainsi, en ce qui concerne les constructions de bâtiments sur des sols sujets au retrait-gonflement des argiles, le respect de quelques mesures simples *(figure 4)* permet d'éviter de futurs sinistres et n'entraîne qu'un surcoût modéré, de 3 à 8 %, du coût de la construction [*Géosciences* n° 3 ; Vincent (2006)]. De même, de nouveaux matériaux permettent désormais de construire des bâtiments légers, bien isolés et économes en énergie, afin de s'adapter à de futurs extrêmes de températures tout en minimisant les besoins en énergie des habitations. Il ne faut cependant pas oublier que les constructions en matériaux légers peuvent être plus vulnérables aux tempêtes [*Géosciences* n° 3 ; Wesckstein et Salagnac (2006)], d'où la nécessité d'établir une stratégie d'adaptation globale.

D'autres contextes ou d'autres situations requièrent en revanche un profond bouleversement afin de tendre vers l'adaptation. C'est le cas, par exemple, de la gestion de l'eau dans les pays majoritairement alimentés par des glaciers et dont la source est appelée à disparaître à terme. C'est aussi le cas des zones côtières urbanisées. Si la majorité s'accorde sur la nécessité d'éviter d'installer de nouvelles constructions dans les zones menacées, la situation est différente dans les zones déjà urbanisées où les solutions, et les avis, se partagent entre protéger, composer ou se retirer [*Géosciences* n° 3 ; Lenôtre et Pedreros (2006) ; *figure 5*].

Dès les années 2000, la tendance était à l'abandon des structures de protection en dur (épis, etc.) pour laisser la place à des mesures de protection plus douces (rechargement de plages, par exemple). Par ailleurs, ces dernières années, les projets d'étude pour le retrait planifié des zones littorales les plus exposées se sont multipliés [*Géosciences* n° 17 ; Levraut et Oliveros (2013)].

Afin de faire face à ces futurs changements d'origine climatique, une nouvelle forme d'adaptation par anticipation est en train de se mettre en place. Comme le rappellent Levraut et Oliveros [*Géosciences* n° 17 (2013)], il s'agit par exemple de prendre en compte des scénarios d'élévation du niveau de la mer dans le cadre de plans de prévention des risques côtiers *(cf figures 6 et 7)* ou bien dans le cadre de groupes de travail « Adaptation » des schémas régionaux climat-air-énergie ou des plans climat-énergie territoriaux (PECT). La création de l'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (ONERC) dès 2001 a permis l'élaboration d'un plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC), adopté en 2011. La mise en place du portail « Drias » (www.drias-climat.fr/), qui fournit des projections régionales des variables climatiques clés, s'inscrit dans cette dynamique.

Ces approches réglementaires conduisent à intégrer progressivement des informations validées par la communauté scientifique et décrivant l'évolution du climat et ses impacts. Elles sont ainsi susceptibles de stimuler l'émergence d'une demande de « services climatiques », par lesquels des informations et prestations validées sur le climat actuel, passé et futur ainsi que ses impacts seront transférés vers des utilisateurs. Cependant, pour faire émerger des services capables d'évaluer les conséquences géologiques, hydrogéologiques et côtières du changement climatique, il sera nécessaire de développer une nouvelle génération de modèles numériques [*Géosciences* n° 6 : Foerster *et al.* (2007)] et d'outils d'information géoscientifique [*Géosciences* n° 6 : Ledru (2007) ; Bertrand et Bonnefoy (2007)], capables de gérer des jeux de données volumineux et hétérogènes, mais aussi de procéder rapidement à des géotraitements complexes.

Quel que soit le scénario climatique envisagé, la situation locale ou l'ampleur des besoins en matière d'adaptation, un dernier besoin commence à émerger vis-à-vis des métiers des géosciences et plus généralement de l'environnement : celui d'évaluer l'efficacité des mesures d'adaptation envisagées à différentes échelles de temps. Cette demande pose un défi aux outils de modélisation, qui

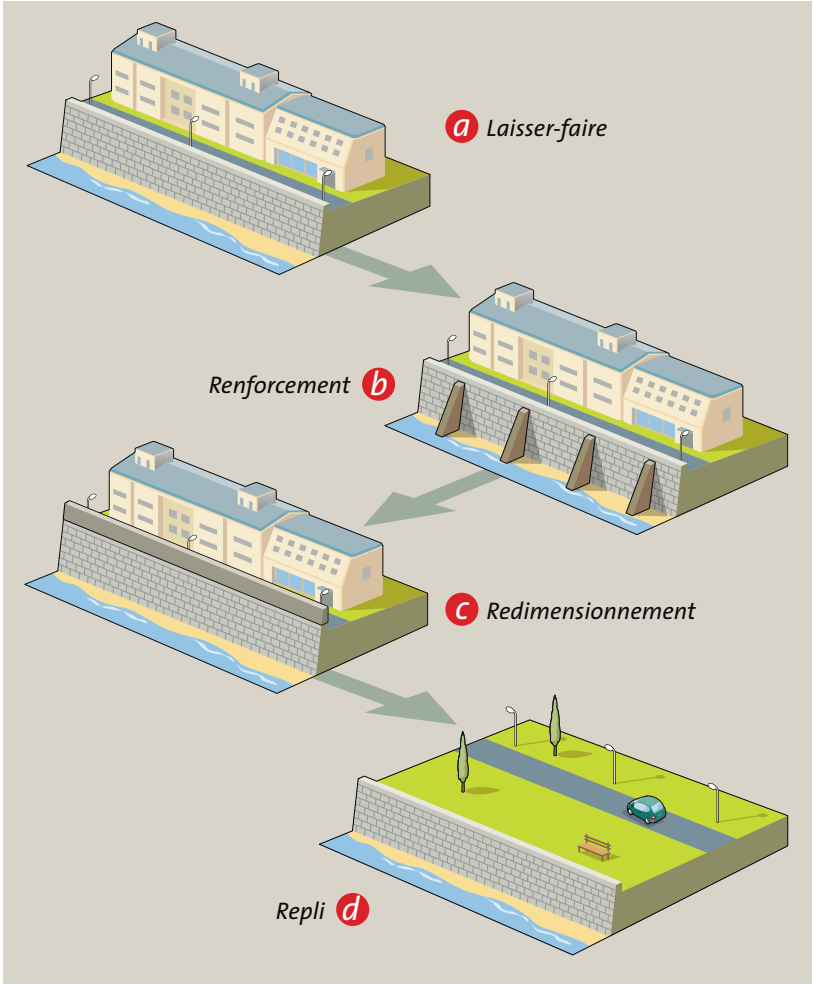


Fig. 5 : Stratégies d'adaptation à l'élévation du niveau marin.
Source : encadré de P. Sergent dans Raucoules *et al.*, 2013 ; *Géosciences* n° 17.

Fig. 6 : Mesures de protection contre les submersions marines à Teignmouth, en Grande-Bretagne.
Photo : G. Le Cozannet.

Fig. 7 : Mise en place d'une porte étanche contre les submersions marines à Teignmouth, en Grande-Bretagne.
Photo : G. Le Cozannet.

doivent s'adapter à ce type de demande, défis cependant déjà relevés dans des cas favorables *(cf. encadrés p. 23 et 24)*. Ainsi, avec des outils de plus en plus précis et intégrant des scénarios régionalisés de changement climatique, il devient possible d'évaluer dans quelle mesure nos actions permettent effectivement de nous adapter aux changements environnementaux à venir.

> *Il émerge aujourd'hui le besoin d'évaluer l'efficacité des mesures d'adaptation envisagées.*

Conclusion

Le changement climatique est déjà perceptible lorsque l'on considère un certain nombre de variables climatiques telles que les températures moyennes ou le niveau de la mer. Mais pour ce qui concerne les risques géologiques induits, ce sont surtout les évolutions à venir qui sont préoccupantes. L'adaptation au changement climatique est rendue nécessaire par le fait qu'une part des changements à venir ne peut être évitée en raison de l'inertie du système climatique. L'étude des impacts nous montre cependant que s'adapter à des changements modérés est possible et dépend beaucoup des choix de développements locaux, régionaux et nationaux. En revanche, des difficultés importantes se poseraient s'il s'agissait de s'adapter à des changements majeurs, tels qu'une élévation du niveau de la mer de 1 mètre en 2100 et davantage les décennies suivantes. C'est pour limiter les risques de subir de tels changements que les États négocient des réductions d'émissions de gaz à effet de serre. Mais est-il possible de limiter ces émissions de façon à éviter un réchauffement au-delà de 2 °C ? C'est le sujet de l'article de Czernichowski *et al.*, ce numéro. ■

Bibliographie : **Bertrand F., Bonnefoy D. (2007)** – Les géor@pports : de la diffusion de données à la diffusion de services. Géosciences n° 7, 106-113. **Cramer W. *et al.* (2014)** – Detection and attribution of observed impacts. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects, Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 979-1037. **De Marsilly G. (2005)** – Résoudre les problèmes de l'eau au XXIe siècle : Quelles recherches et actions conduire ? Géosciences n° 2, 14-25. **Dörfliger N., Perrin J. (2011)** – Ressources en eau : une gestion nécessairement locale dans une approche globale. Géosciences n° 13, 94-101. **Ducharne A. *et al.* (2009)** – Impact du changement climatique sur les ressources en eau et extrêmes hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme. Rapport final du projet RExHySS, Programme GICC, 62 p. http://www.sisyphe.jussieu.fr/~agnes/rexhyss/documents_rapport.php **Explore 2070 :** http://www.developpement-durable.gouv.fr/Hydrologie-souterraine.html; http://www.developpement-durable.gouv.fr/Hydrologie-de-surface.html ; http://www.developpement-durable.gouv.fr/Milieux-cotiers.html **Foerster E. *et al.* (2007)** – La modélisation numérique : un outil majeur pour les risques naturels. Géosciences n° 7, 36-45. **Gillet M. (2006)** – Les conséquences de la dérive climatique : comment s'adapter. Géosciences n° 3, 62-71. **Idier D., Thiébot J. (2013)** – Dynamique des côtes sableuses et phénomènes d'auto-organisation. Géosciences n° 17, 36-45. **Le Cozannet G. *et al.* (2011)** – L'élévation récente du niveau marin et l'érosion côtière : le cas d'îles océaniques du Pacifique. Géosciences n° 14, 92-99. **Ledru P. (2007)** – Apport des systèmes d'Information géoscientifiques à la connaissance géologique. Géosciences n° 7, 6-13. **Lenôtre N., Pedreros R. (2006)** – Impacts du changement climatique sur le littoral. Géosciences n° 3, 36-43. **Levraut A.M., Oliveros C. (2013)** – La politique française du littoral. Géosciences n° 17, 8-17. **Moatar F. *et al.* (2010)** – La Loire à l'épreuve du changement climatique. Géosciences n° 12, 78-87. **Modaressi H. (2006)** – Climate change and ground movements. Géosciences n° 3, 44-49. **Modaressi H. (2009)** – Les risques géologiques. Géosciences : dossier spécial année internationale de la planète Terre, 90-100. **Penequin D. *et al.* (2007)** – Protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine. Géosciences n° 5, 88-99. **Pinault J.L. (2006)** – La sensibilité des eaux souterraines au changement climatique. Géosciences n° 3, 56-61. **Pointet T. (2005)** – Les mesures concrètes pour la mise en œuvre de la directive cadre européenne sur l'eau (DCE) : quels chantiers d'ici 2015 ? Géosciences n° 2, 6-13. **Raucoules D. *et al.* (2013)** – Subsidence et élévation du niveau marin dans les villes côtières : apports de l'interférométrie radar satellitaire. Géoscience n° 17, 46-53. **Sauquet E. (2009)** – Projet IMAGINE 2030 : climat et aménagement de la Garonne : quelles incertitudes sur la ressource en eau en 2030. Rapport de fin de contrat, 125 p. **Stott P.A. *et al.* (2004)** – Human contribution to the European heatwave of 2003. Nature, 432(7017), 610-614. **Vigouroux P., Pointet T. (2007)** – Boire l'eau du robinet ou l'eau en bouteille. Géosciences n° 5, 80-87. **Vincent M. (2006)** – Retrait-gonflement des sols argileux : un aléa géologique lié aux conditions climatiques. Géosciences n° 3, 50-55. **Wesckstein M., Salagnac J.L. (2006)** – Le changement climatique, un double défi pour le bâtiment. Géosciences n° 3, 94-99.

Les ressources et les capacités de stockage du sous-sol offrent des solutions pour atténuer le changement climatique. Par le développement de technologies novatrices, chacune de ces solutions pourra, à sa manière, en accompagnant notamment le développement des énergies renouvelables, contribuer à réduire les émissions de gaz à effet de serre, parvenant même parfois à réduire la concentration en CO_2 de l'atmosphère.

La centrale géothermique islandaise de Hellisheidi abrite un pilote de réinjection dans le sous-sol de CO_2 sous forme dissoute.

© Kelly Reed, Université de Virginie, École d'architecture.

Géosciences et atténuation des rejets de gaz à effet de serre

Isabelle Czernichowski-Lauriol

BRGM, Direction du développement
i.czernichowski@brgm.fr

Patrice Christmann

BRGM, Direction de la stratégie et de la recherche
p.christmann@brgm.fr

Bernard Sanjuan

BRGM, Division Géothermie, Direction des géoressources
b.sanjuan@brgm.fr

Avec la collaboration de :

Anne Gaëlle Bader, André Burnol, Vincent Bouchot, Chrystel Dezayes, Hubert Fabriol, Sylvie Gentier , Olivier Goyeneche, Philippe Rocher et Christophe Tournassat

L'atténuation de l'augmentation des teneurs des gaz à effet de serre dans l'atmosphère pourrait bénéficier du développement de meilleures techniques et pratiques pour lesquelles les géosciences peuvent être particulièrement mobilisées. Elles instruisent notamment de l'importance du recours à la lithosphère les voies d'innovation ou d'évolution à raisonner au regard du changement global et de sa composante climatique.

Ces voies relèvent de deux approches complémentaires : d'une part la réduction de la production de gaz à effet de serre dans les filières, notamment énergétiques, d'exploitation, transformation et consommation et d'autre part le traitement des effluents de gaz à effet de serre pour éviter leurs impacts atmosphériques.

Ces deux volets ont été abordés à la faveur de diverses thématiques traitées et illustrées dans différents numéros de la revue *Géosciences* et un parcours de leur relecture permet d'en redistribuer et actualiser les principales contributions géoscientifiques selon quatre champs majeurs de développement :

– le recours à des sources d'énergie renouvelable dont notamment la géothermie ;
– le stockage dans le sous-sol pour l'exploitation de systèmes ou filières énergétiques non carbonés ;