



ANTICIPER LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES EN NOUVELLE-AQUITAINE

POUR AGIR
DANS LES TERRITOIRES





**Qualité
des milieux
naturels**

Coordination du chapitre : Bernard Legube

EAU

Coordination : Bernard Legube

Rédacteurs : Frédéric Montigny, Paco Bustamante, Gilles Bareille, Magalie Baudrimont, Jérôme Cachot, Gilles Guibaud, Yann Hechard, Jérôme Labanowski, Thomas Lacoue-Labarthe, Bernard Legube, Leslie Mondamert

Contributeurs : Hélène Budzinski, Soizic Morin, Jean Prou

AIR

Coordination Bernard Legube

Rédacteurs : Alain Gazeau, Agnès Hulin, Rafaël Bunes, Bernard Legube

Contributeurs : Éric Villenave

SOL

Coordination : Abad Chabbi

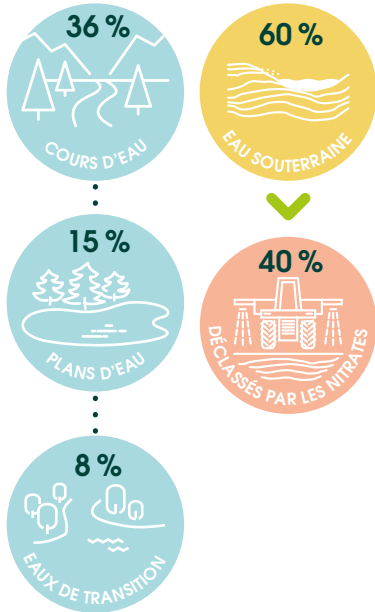
Rédacteurs : Olivier Atteia, Didier Bouchon, Abad Chabbi, Laurence Denaix, Bernard Legube

Contributeurs : Philippe Chery, Sylvain Pellerin, Cornelia Rumpel

L'impact du changement climatique sur la qualité et la pollution des milieux est souvent négligé par rapport à d'autres impacts plus médiatisés (e.g. événements climatiques et hydrologiques extrêmes, santé, trait de côtes, disponibilité des ressources en eau...). Les eaux et l'air de Nouvelle-Aquitaine, et à moindre mesure les sols, déjà significativement pollués, subiront pourtant plusieurs détériorations significatives, qui sont présentées et discutées dans ce chapitre. Certains de ces effets sont déjà visibles et vont s'aggraver dans le contexte climatique prévu. Il s'agit principalement, pour l'eau douce superficielle, de l'augmentation de la température, de la diminution des débits des cours d'eau, de l'évolution des espèces aquatiques et du développement accru de micro-organismes de type cyanophycées, ou pour l'air, de l'augmentation de l'index pollinique et des effets néfastes croissants sur la santé publique. Bien que non réellement démontrés in situ en région, d'autres effets sont fortement prévisibles, comme la diminution de la matière organique des sols et de leur fertilité, l'augmentation des teneurs en polluants dans toutes les masses d'eau, l'augmentation de l'écotoxicité des eaux de surface et l'augmentation de la concentration en ozone dans l'air et autres composés organiques volatils et aérosols. Les travaux de recherche et études sur cette problématique au niveau régional, comme national, sont rares et/ou peu publiés. Une recherche appliquée au « terrain » de la Nouvelle-Aquitaine, sur des sites d'observation scientifiquement et économiquement sélectionnés, est indispensable pour évaluer plus clairement ces impacts du changement climatique, mais également les adaptations à préconiser et les enjeux environnementaux et socio-économiques qui en découleront.

EAU

BON ÉTAT ÉCOLOGIQUE



AUGMENTATION TEMPÉRATURE

→ En 40 ans +2 à 3 °C



→ -5 % d'oxygène dissous
→ Rivalités entre les espèces

BAISSE DÉBIT



→ Moins de dilution de la pollution
→ Polluants dans les sédiments

EXPLOITATION INTENSE DES EAUX SOUTERRAINES



→ Libération du stock existant de molécules mères et métabolites

BESOIN DE...

...PROTÉGER LES RESSOURCES EN EAU

Observation du changement climatique sur la qualité des eaux

→ Limiter les pollutions diffuses

→ Optimiser les prélèvements



→ Augmenter le niveau de collecte et d'épuration des rejets

→ Aménager les cours d'eau

→ Réorganiser la gouvernance de l'eau

...D'ÉTUDES SPÉCIFIQUES



...DE LA RECHERCHE APPLIQUÉE AU « TERRAIN »



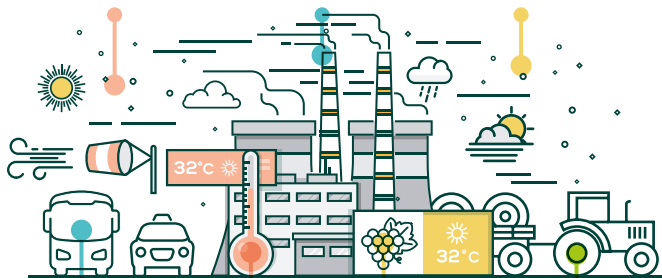
POUR MIEUX APPRÉHENDER LES EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

et protéger la santé publique et la biodiversité

AIR

ÉPISODES DE POLLUTION : 8 JOURS CHAQUE ANNÉE

PARTICULES GAZ À EFFET DE SERRE POLLENS



DIOXYDE D'AZOTE OZONE PESTICIDES AMMONIAQUE

Détérioration de la qualité de l'air dans les prochaines décennies. Augmentations des teneurs en aérosols, allergènes

SOL



HAUSSE DE TEMPÉRATURE

→ PERTE DE CARBONE = SOLS MOINS FERTILE



Augmentation de l'activité biologique
AUGMENTATION DE LA MINÉRALISATION
EFFETS SUR LE CYCLE DE L'AZOTE

→ AUGMENTATION DE LA BIODISPONIBILITÉ DES MÉTAUX



→ AUGMENTATION DU CO₂
Manque de nutriments AZOTE et PHOSPHORE

→ SCÉNARIOS CLIMATIQUES FUTURS
Affecte les populations microbiennes = moins fertiles

1 INTRODUCTION

Les définitions et classifications qui caractérisent les milieux naturels s'appuient généralement sur deux parties : la biocénose, partie organique et vivante, et le biotope, partie minérale qui comprend la lithosphère, l'hydrosphère et l'atmosphère, supports de la biocénose et sources d'énergie. C'est l'aspect qualité du biotope et plus précisément de l'eau, de l'air et du sol dont il est principalement question dans ce chapitre.

La qualité d'un milieu peut être définie par l'aptitude de ses caractéristiques intrinsèques à pouvoir satisfaire les exigences de la biocénose ainsi que, dans le contexte de cet ouvrage, les besoins des usages anthropiques et, bien évidemment, la protection de la santé publique. Plus concrètement et dans le cadre des objectifs de ce chapitre, la qualité des trois milieux (eau, air et sol) est ici évaluée pour la Nouvelle-Aquitaine, en s'appuyant principalement sur des paramètres physico-chimiques et parfois biologiques. L'évolution visible et prévisible de cette qualité, sous le double impact des activités anthropiques et du changement climatique, constitue le cœur du chapitre. Les enjeux sont, en effet, considérables au plan de la santé publique (épisodes de pollution de l'air, pollinisation, qualité de l'eau potable et des eaux de baignade,...), des écosystèmes (migration, développement et reproduction, effet des espèces invasives, eutrophisation...), et de nombreuses activités, comme l'agriculture (stress hydrique, fertilité des sols, lutte contre les développements d'insectes et des moisissures,...), l'aquaculture, la pêche, le tourisme, etc.

Chacun des trois milieux considérés possède ses propres paramètres de qualité, qui peuvent être parfois communs. Par exemple, l'évolution de la qualité de l'air, comme celle de l'eau, est significativement influencée par la nature du sol, sa végétation naturelle et son utilisation agricole et sylvicole. Toutefois, les autres sources de pollution, particulièrement pour l'air et pour l'eau, sont trop nombreuses et trop spécifiques (transports, chauffage, industrie, assainissement domestique, production d'énergie,...) pour les aborder sous un même « chapeau ». Il a donc été choisi de présenter trois sous-chapitres avec leurs propres introductions et conclusions.

Les renvois vers d'autres chapitres de l'ouvrage sont souvent pratiqués pour les autres aspects non traités ici, concernant l'eau (disponibilité de la ressource, modification du littoral) et ses usages (santé, pêche, aquaculture, énergie, agriculture), l'air (santé, villes et territoires) et le sol (agriculture, forêts).

2 L'EAU

INTRODUCTION

La région Nouvelle-Aquitaine se caractérise par la présence de plusieurs types de ressource en eau douce de surface (cours d'eau, grands lacs, étangs, zones humides) et souterraine (nappes superficielles et profondes) ainsi que d'eaux salées et saumâtres (eaux littorales, zones humides). Leur distribution géographique est variée et inégalement répartie sur le territoire, allant des zones de tête de bassin aux exutoires en façade littorale et créant ainsi des milieux aquatiques très diversifiés¹.

Chaque masse d'eau présente une qualité naturelle unique selon les milieux naturels au contact², mais sa qualité globale (mesurée) est souvent influencée par une pollution³ fonction des sollicitations anthropiques liées à l'occupation du territoire. Bien qu'exploitées par l'Homme pour répondre notamment à ses besoins alimentaires, économiques et récréatifs, ces ressources en eau sont vitales pour le milieu naturel car toute source de pollution (unique ou en mélange) peut entraîner des effets négatifs plus ou moins directs sur les écosystèmes (toxicité, déséquilibres de la chaîne alimentaire, hypoxie...). Une description non détaillée, mais instructive, de l'état qualitatif actuel des eaux naturelles en Nouvelle-Aquitaine est présentée ici, suivie de quelques observations sur l'impact déjà mesurable du changement climatique

sur la qualité des cours d'eau. Les principaux effets attendus du changement climatique sont ensuite discutés, avec quelques exemples portant sur certains paramètres de qualité. Finalement les conséquences potentielles sur l'écotoxicité des masses d'eau, ainsi que sur certains usages, sont discutées.

LA QUALITÉ DES EAUX EN NOUVELLE-AQUITAINE

La Directive Cadre sur l'Eau (DCE), mise en application par les schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE), considère que l'altération d'un des paramètres de l'état du milieu, par rapport à des normes de qualité environnementale précises [1] [2], peut provoquer une perturbation générale de tout l'équilibre naturel. Par suite, le bon état qualitatif d'une eau superficielle est celui qui permet une vie animale et végétale riche et variée, tandis que celui d'une eau souterraine est défini par rapport à l'usage pour l'eau destinée à la consommation humaine (EDCH) (cf. *Webcomplément n° 1 de l'Agence Régionale de la Biodiversité de Nouvelle-Aquitaine*). Ce sont principalement les agences de l'eau et les agences régionales de santé qui contrôlent la qualité des eaux.

1 • Tourbières, gaves, vallées alluviales, courants côtiers, zones humides littorales, lacs et étangs, pertuis, bassins, estuaires.

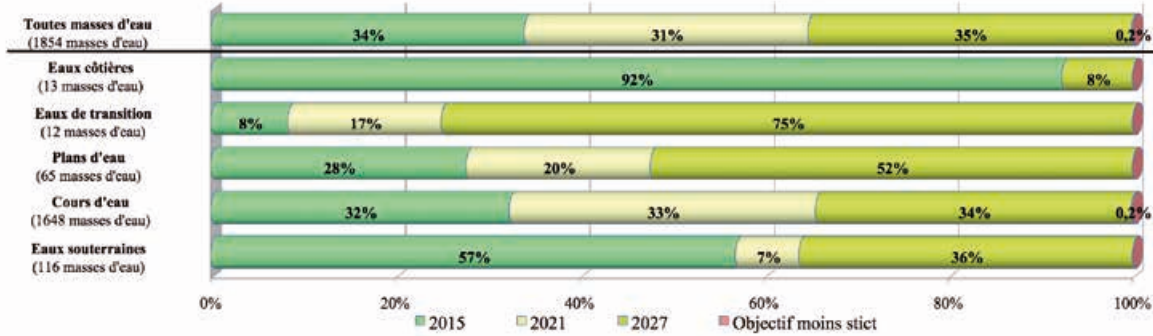
2 • Qualité naturelle caractérisée par des éléments minéraux dissous, matières organiques, particules et micro-organismes. Elle est parfois un obstacle à son utilisation directe.

3 • Pollutions (i) par les macro- et micropolluants domestiques (matière organique, azote, phosphore, résidus de médicaments, cosmétiques, hormones naturelles perturbateurs endocriniens, etc.), agricoles (nitrates, pesticides) et industriels (DCO dure, métaux, HAP, PCB, dioxines, retardateurs de flamme, produits antifouling, perturbateurs endocriniens, etc.), (ii) par les micro-organismes pathogènes (bactéries, virus, protozoaires), (iii) par des particules diverses, ... qui représentent évidemment un obstacle, parfois de taille, aux usages.

UN ÉTAT DES MASSES D'EAU PLUTÔT DÉGRADÉ

L'objectif initial de bon état des eaux, fixé par la DCE, était loin d'être atteint en 2015 en Nouvelle-Aquitaine puisqu'environ 2/3 des masses d'eau présentent aujourd'hui une échéance d'atteinte du bon état reportée⁴ à 2021 ou 2027 (Figure 1).

Les causes de ces dégradations et de déclassement du bon état sont variables suivant les secteurs : pour certains il s'agira de critères quantitatifs, pour d'autres de critères hydro-morphologiques ou qualitatifs.



Sources : Agences de l'eau Loire-Bretagne et Adour-Garonne (SDAGE 2016-2021). Traitement et conception graphique : ARR NA

Figure 1 : Les échéances d'atteinte du bon état des eaux définies en Nouvelle-Aquitaine par les SDAGE 2016-2021.

LES COURS D'EAU NE SONT PAS EN BON ÉTAT

Les cours d'eau, ou masses d'eau de rivière sont majoritairement de qualité inférieure au bon état écologique (Figure 2). Le secteur Nord-Ouest de la Région apparaît nettement dégradé, il correspond aux sous-bassins de la Sèvre Nantaise, du Thouet (affluents aval de la Loire) et au bassin de la Sèvre Niortaise. Ceux présentant un bon état écologique correspondent essentiellement à des têtes de bassins versants, à des petits affluents ou à des cours d'eau de montagne au niveau des Pyrénées et du Massif Central. Outre les critères hydro-morphologiques, les indices biologiques sont les principaux éléments déclassant, notamment l'indice poissons pour les bassins du Nord de la Région. Les teneurs faibles en oxygène et l'excès de nutriments (azote et phosphore) sont également responsables de nombreux déclassements. D'importants progrès ont cependant été réalisés à l'échelle nationale en matière d'assainissement des eaux usées, suite à la directive européenne de 1991 relative aux eaux urbaines. C'est ainsi qu'en ex-Aquitaine par exemple, une amélioration des paramètres physico-chimiques de l'état écologique est nette depuis 30 ans.

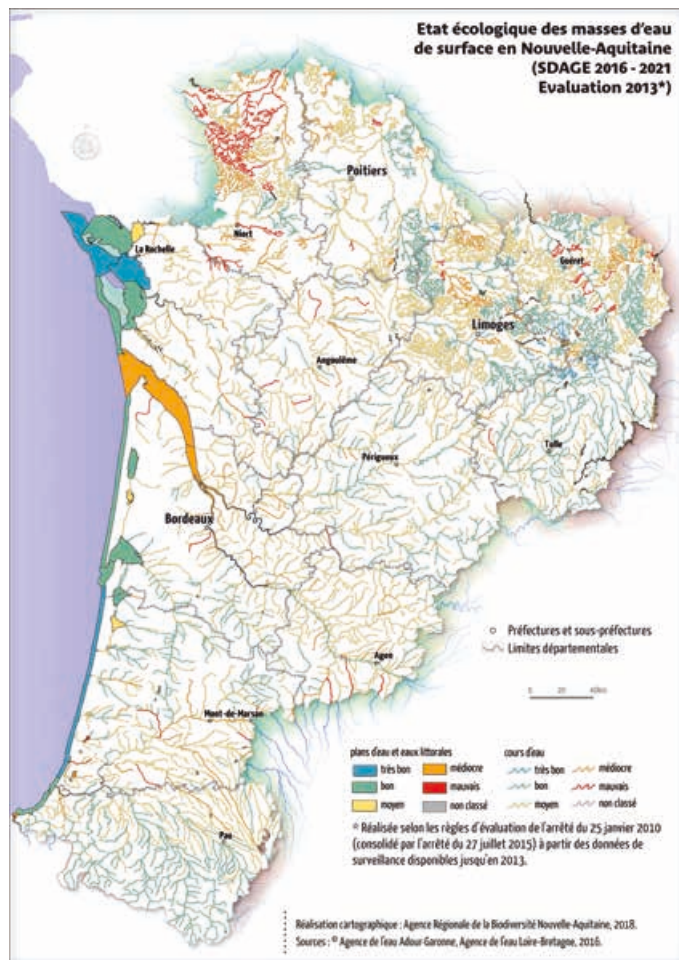


Figure 2 : Carte de l'état écologique des masses d'eau de surface en Nouvelle-Aquitaine (contact : ORE Poitou-Charentes, devenu Agence Régionale de la Biodiversité de Nouvelle-Aquitaine).

4 • Ces reports ont été justifiés principalement du fait de contraintes naturelles (délais de réactions des écosystèmes et des aquifères aux actions correctrices) et techniques (technologies actuelles insuffisantes, délais de mobilisation des acteurs, ou de mise en œuvre des actions).

Pour la Nouvelle-Aquitaine, 54 % des masses d'eau de surface sont en état moyen. Seuls 36 % sont en bon (ou très bon) état écologique (en deçà de l'objectif SDAGE 2015) avec de fortes disparités :

- 3 % sur le sous-bassin des affluents du secteur aval de la Loire ;
- de 10 à 20 % sur les bassins de la Sèvre Niortaise, de la Charente et de la Garonne ;
- de 40 à 50 % sur les bassins des fleuves côtiers (Seudre, Leyre, courants landais,...), de la Dordogne, de la Vienne et de l'Adour.

Bien que l'état chimique des cours d'eau soit plutôt bon, il est important de préciser que les paramètres de qualité pris en compte pour certaines « substances prioritaires » ne sont pas toujours représentatifs des substances réellement présentes et utilisées, notamment pour les produits phytosanitaires retrouvés dans les secteurs concernés par des quasi-monocultures (vigne, arboriculture, maïs) ou en zone périurbaine. Les herbicides interdits depuis 2003 (métolachlore, atrazine et métabolites) ou depuis 2007 (sulfosate) sont toujours présents dans les eaux de surface. Le glyphosate et son métabolite AMPA sont détectés à des fréquences et niveaux très élevés (cf. *Webcomplément n° 2 de l'Agence Régionale de la Biodiversité de Nouvelle-Aquitaine*).

Les têtes de bassin versant ont un rôle majeur pour l'aval des grands bassins versants car, au-delà de leur richesse avérée en biodiversité, elles influencent directement la quantité et la qualité de l'eau à l'aval, sans qu'à l'heure actuelle on puisse en préciser l'ampleur. L'ensemble de ces réseaux hydrographiques de la frange ouest du Massif Central en région Nouvelle-Aquitaine est réputé de bonne qualité mais souvent fragilisé par l'évolution des activités anthropiques et vraisemblablement par les évolutions climatiques [3] [4] (cf. *Webcomplément n° 3, de l'Université de Limoges*). En effet, il a été montré que les biofilms épilithiques (qui se développent sur les rochers dans les masses d'eau) présentent des niveaux d'imprégnation en micropolluants organiques parfois très importants, même en tête de bassin [5] (cf. *Webcomplément n° 4 de l'Université de Poitiers*). Ces biofilms peuvent être considérés comme des capteurs naturels de micropolluants et sont donc révélateurs d'une pollution chronique tout en participant probablement à sa diffusion dans les réseaux trophiques et à sa transformation.

DES CONCENTRATIONS EXCESSIVES EN NITRATES ET EN PESTICIDES DANS LES EAUX SOUTERRAINES

L'état des masses d'eau souterraines (définies par la DCE) est nuancé (60 % en bon état chimique, en accord avec l'objectif 2015). Celles affleurantes qui indiquent un bon état sont localisées sur la partie Est de la Nouvelle-Aquitaine (Massif Central), au Nord-Ouest (socle des Deux-Sèvres), au Sud (Pyrénées)

et sur la côte girondine à la pointe Ouest du Lot-et-Garonne. Celles dont l'état est inférieur au bon état s'étendent sur la partie centrale de la région de la Vienne en passant par les Charentes et la Dordogne jusqu'au Sud du Lot-et-Garonne ainsi que sur un secteur couvrant le Sud des Landes et le Nord des Pyrénées-Atlantiques. Les concentrations excessives en pesticides et en nitrates sont les principales causes du classement en mauvais état chimique. Les pollutions en nitrates s'étendent globalement sur l'ensemble des nappes libres.

Les concentrations moyennes en nitrates relevées dans les eaux souterraines picto-charentaises se stabilisent (autour de 29 mg/L) depuis le début des années 2000 (cf. **Figure 5**). Elles ont néanmoins significativement augmenté en 2013 et 2014, vraisemblablement du fait des précipitations importantes reçues ces années-là. Les nappes libres présentent des teneurs plus élevées (35 mg/L en moyenne de 2000 à 2014), tandis que les nappes captives sont davantage préservées (environ 10 mg/L) même si leurs teneurs augmentent d'année en année. Notons que près de 38 000 km² de la région sont classés en zones vulnérables aux nitrates (toutes masses d'eau), soit 45 % de sa superficie, ce qui est du même ordre de grandeur que le pourcentage concerné sur le territoire français métropolitain. C'est le Nord, principalement le Poitou-Charentes, qui est particulièrement concerné, ainsi que la partie Sud située sur le bassin Adour-Garonne, mais de manière plus éparse.

De nombreux micropolluants organiques sont présents dans les eaux souterraines de Nouvelle-Aquitaine. Les produits phytosanitaires constituent le second paramètre déclassant de l'état chimique (après les nitrates) avec la présence très majoritaire des herbicides non autorisés depuis 2003, comme l'atrazine et (surtout) ses trois principaux métabolites, ainsi que le métolachlore, la bentazone et la simazine. Pour les résidus de médicaments, ce sont la metformine, la carbamazépine et le paracétamol qui sont principalement retrouvés parmi les molécules recherchées, et pour les autres substances, la caféine, le formaldéhyde, un phtalate, les cyanures libres, le bisphénol A et les perfluoro-alcanes sulfonates [6].

DES PLANS D'EAU RAREMENT EN BON ÉTAT

Les plans d'eau (tels que définis par la DCE) sont rarement en bon état écologique. Le principal facteur déclassant reste l'eutrophisation due aux excès de nutriments, en particulier de phosphore. L'état chimique (qui n'inclut pas les nutriments) est moins dégradé, certains plans d'eau présentent néanmoins des concentrations excessives (supérieures aux normes de qualité) en TBT⁵ (lac du Bousquet en Gironde, retenue de Miramont-Sensacq dans les Landes) ou en cadmium (Retenue de Marèges sur la Dordogne).

5 • Tributylétain : largement utilisé comme biocide dans les peintures antisalissure pour la coque des navires notamment, puis soumis à restrictions d'usage depuis 1982 et interdit totalement à partir de 2008.

En Nouvelle-Aquitaine, seulement 15 % des plans d'eau sont en bon état écologique (bien inférieur à l'objectif SDAGE 2015), 10 % en Limousin, 14 % en Poitou-Charentes et 21 % Aquitaine. La majorité (63 %) est en état moyen. En revanche 58 % sont en bon état chimique (37 % restent indéterminés faute de mesures suffisantes).

D'autre part, en Limousin notamment, la forte densité de petits étangs artificiels (non reconnus comme masses d'eau DCE⁶) peut induire des modifications hydro-morphologiques et altérer la qualité des milieux aquatiques : altération ou disparition de certaines zones humides, modification de l'équilibre biologique, piège à sédiment et à nutriments, problématiques d'eutrophisation et de cyanobactéries, entrave à la libre circulation des poissons, etc.

DES EAUX LITTORALES D'ÉTAT TRÈS VARIABLE

Les masses d'eau côtière sont pour la plupart en bon état écologique et chimique : côtes girondines, landaise, basque, îles de Ré et Oléron, Arcachon... Seul le lac d'Hossegor est classé en mauvais état chimique.

Les masses d'eau de transition, correspondant aux estuaires et embouchures des principaux fleuves de la Nouvelle-Aquitaine sont en situation nettement moins favorable. La plupart sont dans un état inférieur au bon état écologique (déclassée par l'indice poissons) et sont majoritairement classées en état médiocre, notamment au Sud par exemple pour les estuaires de l'Adour et de la Gironde. Ce dernier a la particularité de présenter un bouchon vaseux intense et développé, générant des épisodes graves d'anoxie et concentrant les polluants. L'état chimique de ces masses d'eau de transition est également dégradé. Les concentrations supérieures aux normes de qualité en TBT sont responsables du mauvais état chimique des estuaires de l'Adour, de la Bidassoa et de la Gironde (également contaminé par le cadmium). Le secteur aval de l'estuaire fluvial de la Garonne est, quant à lui, déclassé en raison des teneurs en hydrocarbures.

Pour la Nouvelle-Aquitaine, presque toutes les eaux côtières sont en bon état écologique (dont 23 % en très bon état), alors que ce n'est seulement le cas pour 8 % des eaux de transition. Les pourcentages de bon état chimique sont dans la même proportion : 92 % pour les eaux côtières et 25 % pour les eaux de transition (avec 33 % d'indétermination dans ce dernier cas).

La contamination des archives sédimentaires des fleuves alimentant les bassins côtiers, bien que peu prise en compte dans la classification des états écologiques et chimiques, devrait être plus suivie, comme l'ont montré des études récentes sur la contamination par les résidus de médicaments des sédiments fluviaux des pertuis de Marennes-Oléron (cf. *Webcomplément n° 5 de l'Université de Poitiers*).

LES IMPACTS DÉJÀ VISIBLES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA QUALITÉ DES EAUX DE SURFACE

Analyser les impacts déjà visibles du changement climatique sur la qualité des eaux de surface ne peut aujourd'hui raisonnablement porter que sur des paramètres globaux comme la température, voire la salinité pour les eaux de transition. L'acidification de l'eau de mer, donc des eaux littorales, est un autre indicateur significatif avec des impacts manifestes sur les organismes marins notamment. Les observations sur d'autres paramètres et/ou sur la qualité des eaux souterraines sont difficilement exploitables à cause des interférences liées à l'évolution des usages, des pratiques et des politiques de prévention, ainsi que de la durée de leurs effets.

La température des grands cours d'eau est essentiellement contrôlée par les conditions atmosphériques alors que celle des petits et moyens cours d'eau peut dépendre des conditions géographiques et géomorphologiques au niveau de la station de mesure et en amont de celle-ci [8]. Par ailleurs, une fréquence trop faible des mesures peut fausser les moyennes, compte tenu de l'importance et de la rapidité de certaines variations. Malgré ces sources d'erreur, il est constaté en Nouvelle-Aquitaine une augmentation de la température moyenne des eaux de surface depuis ces 30 à 40 dernières années. Par exemple, une analyse des données de « température moyenne annuelle de l'eau » de 3 stations de mesure sélectionnées⁷ dans le nord de la région, montre une tendance à l'augmentation de 1 à 1,5 °C au cours d'une période de 43 ans, soit une moyenne de 0,023 à 0,035 °C par année (Figure 3). Cette tendance est en accord avec les récentes études sur le bassin de la Loire [8] qui prévoient 2 à 3 °C d'augmentation de la température moyenne annuelle des cours d'eau en fin de siècle. Un autre exemple est celui de l'estuaire de la Gironde⁸ pour lequel une élévation de 0,07 à 0,08 °C (moyenne de mai à novembre) par année a été constaté au cours des 35 dernières années (Figure 4) [9], c'est-à-dire bien plus importante.

6 • La directive-cadre sur l'eau indique un seuil minimum de 50 hectares au-dessus duquel tout plan d'eau constitue une masse d'eau.

7 • Les stations ont été sélectionnées de façon à ce que les impacts sur la température des usages, rejets des villes et autres activités soient considérés comme négligeables.

8 • À noter (i) que la station prise en compte figure 4 est sous l'influence des rejets (thermiques) de la centrale nucléaire du Blayais, mais qui peuvent être considérés comme sensiblement constants et (ii) que les températures moyennes annuelles sont surévaluées car 3 mois d'hiver ne sont pas échantillonnés.

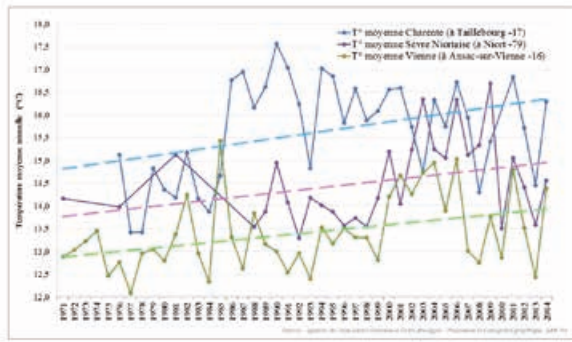


Figure 3 : Évolution de la température de l'eau au cours de la période 1971-2014 pour 3 cours d'eau du nord de la Nouvelle Aquitaine (valeurs : moyenne annuelle ; pointillés : régression linéaire).

Critères de sélection des 3 stations parmi une centaine de stations de 6 cours d'eau : importance du cours d'eau, disponibilité des données, influence négligeable des impacts anthropiques - Moyennes annuelles réalisées à partir des données d'évaluation de la qualité des eaux des Agences de l'Eau (fréquence d'échantillonnage d'une mesure mensuelle environ).

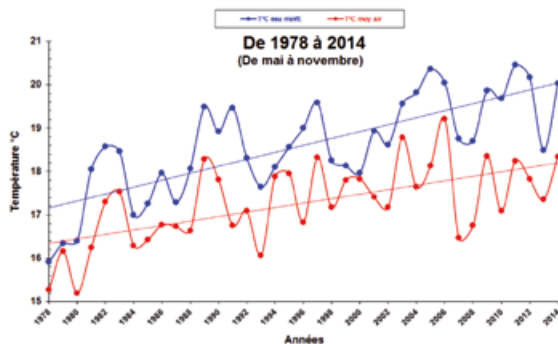


Figure 4 : Évolution relative des températures de l'eau et de l'air au cours de la période 1978 à 2014 au niveau de Blaye dans l'estuaire de la Gironde (période Mai-Novembre).

Pour la salinité, les prélèvements d'eau en général (qui sont peut-être pour partie eux-mêmes des effets indirects du changement climatique) et les variabilités interannuelles des précipitations ne permettent pas de mettre clairement en évidence l'effet direct du changement climatique sur ce paramètre de qualité. Autrement dit, les zones de transition et côtières cumulent des effets directs et indirects sans pouvoir clairement les séparer. Toutefois, certaines observations sur les trajectoires des écosystèmes⁹ peuvent constituer des indicateurs révélateurs de l'augmentation de la salinité dans les eaux littorales (couplées souvent à l'augmentation de la température). C'est ainsi que pour l'estuaire de la Gironde (entre Pauillac et Blaye), les densités respectives de populations d'éperlan et d'anchois s'inversent régulièrement, depuis les 30 dernières années, au profit de l'anchois [10] et qu'il est observé des modifications du zooplancton [11].

Les autres paramètres ne sont pas exploitables et il est nécessaire dès aujourd'hui de sélectionner des zones qui semblent être essentiellement dépendantes du changement climatique pour analyser les données physico-chimiques et biologiques censées en mesurer les effets qualitatifs. C'est une des questions centrales qui restent à résoudre pour suivre les impacts du changement climatique sur la qualité des eaux.

LES IMPACTS PRÉVISIBLES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA QUALITÉ DES EAUX EN RÉGION NOUVELLE-AQUITAINE

La quantité disponible en eau douce et sa qualité sont globalement affaiblies par l'activité humaine (usages domestiques, agricole, industriel, énergétique, etc.). Les impacts du changement climatique ne peuvent qu'amplifier ces faiblesses déjà très importantes en région, comme décrit ci-dessus. La Nouvelle-Aquitaine est l'une des régions françaises qui sera la plus impactée, dès l'horizon 2050, (i) par la baisse du débit des cours d'eau avec des étiages et des assèchs plus sévères qu'aujourd'hui et des précipitations pluvieuses ponctuellement plus importantes, (ii) par l'augmentation de la température des eaux de surface, (iii) par une baisse significative de la recharge des nappes de surface dans certaines zones⁹ et (iv) par une élévation importante du niveau de l'océan. Autant d'impacts qui posent inévitablement les questions de la satisfaction des différents usages et des difficultés (encore plus importantes qu'aujourd'hui) à atteindre les normes de qualité environnementales, voire la question de la pertinence de ces dernières. Ce paragraphe résume les principaux effets attendus, en général et en les illustrant par des études sur certaines classes de paramètres de qualité, puis décline les conséquences potentielles sur l'écotoxicité des eaux de surface. Cependant, les changements des « moteurs » des pressions anthropiques (évolutions de la démographie et des habitudes de vie associées, orientations du développement économique, politiques d'aménagement du territoire, etc.) indirectement liés au climat, ne seront pas abordés ici. Bien que leurs incidences soient indéniables, notamment sur la qualité des ressources en eau, elles sont très complexes et trop liées aux adaptations spontanées, ainsi qu'à l'évolution des perceptions de la valeur des écosystèmes, de la protection de l'environnement et de la nécessité de développement durable.



9 • Comme, par exemple, les évolutions comparées des espèces de poissons anadromes (poissons de mer se reproduisant en eau douce) et des poissons marins.

LES PRINCIPAUX EFFETS DIRECTS ATTENDUS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA QUALITÉ DES EAUX EN NOUVELLE-AQUITAINE

Les principaux effets directs sont les conséquences de l'évolution des cycles hydrologiques des ressources (débits et niveaux), de l'augmentation de la température du couple eau/sol et, pour la zone littorale, de l'augmentation de la salinité dues aux submersions (même temporaires) par l'eau de mer.

La tendance à la diminution des débits des cours d'eau va accentuer évidemment les problèmes de concentrations en polluants des milieux aquatiques, par effet de moindre dilution. À épuration et volumes constants des rejets, les concentrations en macropolluants et micropolluants minéraux et organiques seront inévitablement augmentées dans les eaux superficielles, milieux récepteurs habituels des stations d'épuration des eaux usées et autres rejets.

La modification des cycles hydrologiques aura également des conséquences sur les pollutions diffuses. Les événements climatiques extrêmes entraîneront sans doute une remobilisation plus importante dans les eaux souterraines des polluants venant du sol (source importante de stockage de nitrates, pesticides et métaux), des lessivages plus importants de polluants atmosphériques déposés, une augmentation des matières en suspension « contaminées » et, probablement, des remobilisations des contaminants piégés dans les sédiments et autres milieux en contact avec les eaux.

L'augmentation de la température des eaux superficielles, parfois de près de deux degrés à l'horizon 2050 (cf. ci-dessus pour l'estuaire de la Gironde), entraînera une baisse de l'ordre de 3 à 5 % de la teneur en oxygène, composant fondamental pour la vie des écosystèmes, pour une bonne auto épuration et la limitation de l'eutrophisation. L'augmentation de la température des eaux et du sol, associée à des changements importants des cycles et régimes des précipitations, contribuera à accélérer la remobilisation plus importante des polluants venant du sol vers les nappes (nitrates, pesticides, métaux), ainsi qu'à amplifier les processus d'humification eau/sol, se traduisant par une remobilisation plus importante, sous forme dissoute, du carbone organique, de l'azote et du phosphore. Cette augmentation de la température aura aussi un impact sur les populations microbiennes, bien que mal évalué à ce jour, comme l'érosion de la biodiversité et l'augmentation de la vulnérabilité des communautés de microalgues indigènes, ainsi que la prolifération des micro-organismes pathogènes¹⁰ et des cyanobactéries avec leurs risques de production de toxines associées.

Ce dernier phénomène est d'ailleurs régulièrement observé en période d'eau chaude dû à la diminution d'oxygène dissous et l'augmentation des concentrations en nutriments. Il faut noter à ce sujet que différentes approches de modélisation de l'évolution de la température des cours d'eau des bassins versants de la région doivent continuer à être développées. Si l'approche de modélisation « stationnelle », généralement utilisée, montre de bonnes capacités à simuler le régime thermique des grands cours d'eau, d'autres approches visant à prendre en compte l'influence des apports thermiques de chaque affluent et des eaux souterraines, les rejets des barrages, les effets des zones d'ombrage, etc. doivent être améliorées, notamment pour les petits et moyens cours d'eau [8].

Certains effets supplémentaires mais parfois ambigus du changement climatique sur la qualité des eaux peuvent être mentionnés avec précaution toutefois. Sous l'effet de l'augmentation de la température de l'eau de nombreux processus naturels physico-chimiques et biologiques seront pour certains légèrement, mais significativement, augmentés et/ou accélérés (solubilité des micropolluants organiques et minéraux, réactions d'hydrolyse, photolyse, désorption, complexation, biodégradation, coagulation, sédimentation), ou diminués et/ou ralentis pour d'autres (sorption, solubilité des gaz,...). Par exemple, les augmentations de la température et de l'intensité des rayonnements UV-B reçus par les eaux superficielles [12] [13] pourront favoriser les réactions de dégradation des contaminants organiques, avec toutefois une formation accrue de métabolites et de photo-produits dont les effets sur les écosystèmes

sont loin d'être vraiment connus. Les augmentations de la salinité et de l'acidification des eaux littorales et des eaux de transition vont, par contre, diminuer la solubilité des micropolluants organiques et minéraux, mais augmenter le caractère écotoxique en général, notamment vis-à-vis des organismes peuplant les eaux de transition.

QUELQUES EXEMPLES DE PRÉVISIONS (EN ABSENCE D'ADAPTATION), BASÉES SUR DES OBSERVATIONS ET TRAVAUX RÉCENTS

Les teneurs en matière organique dissoute (MOD) vont s'accroître. Les MOD, principalement naturelles, ont une influence non négligeable sur la qualité de l'eau (pH, spéciation des contaminants chimiques, eutrophisation). Quelle que soit l'origine de ces MOD¹¹, elles seront toutes impactées par le changement climatique, directement ou non [14] [15] [16]. L'augmentation des processus d'humification par la température, le volume des pluies, le changement des radiations UV (*i.e.* solubilisation d'une partie de

10 • Un travail a été fait en Aveyron (région voisine) qui montre cette réduction de la diversité en cas de températures extrêmes (carnicule de 2003) vs autres années, pour des communautés soumises ou non à la pression toxique (contamination polymétallique des cours d'eau du bassin versant de Decazeville). Morin et al. "Cumulative Stressors Trigger Increased Vulnerability of Diatom Communities to Additional Disturbances." *Microbial Ecology* 70 (2015): 585-595.

11 • Origine naturelle allochtone (e.g. lessivage des sols), naturelle autochtone (e.g. décomposition des micro-organismes aquatiques), anthropique (e.g. rejets de stations d'épuration).

la matière organique venant notamment des sols), ainsi que l'amplification des processus d'eutrophisation (*i.e.* MOD issue de la décomposition des algues au-dessous de l'épilimnion) seront les causes principales de l'augmentation des teneurs en MOD dans les eaux.

Cette augmentation, en Nouvelle-Aquitaine comme ailleurs, aura des impacts importants sur la qualité des eaux superficielles avec des conséquences sur les écosystèmes et sur l'usage domestique¹².

Les teneurs en nitrates dans les eaux souterraines pourraient augmenter. C'est le Nord-Ouest de la Nouvelle-Aquitaine qui est le plus impacté par la

pollution par les nitrates dans les eaux souterraines (paramètre de l'état chimique le plus souvent déclassant).

La mise en œuvre en 1991 de la « directive nitrates » a eu un effet de baisse ou de stabilisation des teneurs observées selon les régions françaises. Depuis quelques années il est constaté, notamment en Poitou-Charentes, une nouvelle accélération de ce type de pollution qui rappelle celle de la fin des années quatre-vingt, bien que le nombre de stations de contrôle considérées était nettement plus faible (**Figure 5**). Est-ce un effet d'une augmentation temporairement exceptionnelle (et connue) des précipitations et/ou un effet du changement climatique ?

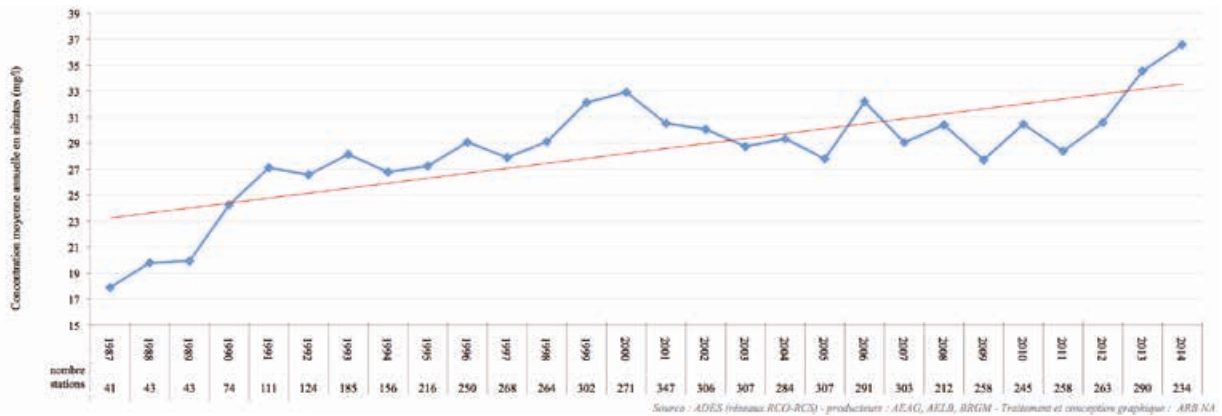


Figure 5 : Évolution de la concentration en nitrates dans les eaux souterraines de Poitou-Charentes, de 1987 à 2014.

Il ne faut pas oublier que si les engrais sont d'une importance capitale pour soutenir l'agriculture moderne, le devenir et le risque à long terme de l'azote dérivé des engrais dans le système plante-sol-eau n'est pas entièrement compris. De récentes études [17] ont révélé que trois décennies après l'application, 12 à 15 % des dérivés azotés d'engrais (marqués isotopiquement) résidaient encore dans la matière organique du sol, tandis que 8 à 12 % avaient déjà été entraînés vers les eaux souterraines et qu'une partie du reste, résidant encore dans le sol, devrait continuer à être absorbé par les cultures et à fuir vers les eaux souterraines sous forme de nitrate pendant au moins cinq décennies, bien plus longtemps qu'on ne le pensait auparavant.



Que deviendront les teneurs en éléments traces métalliques (ETM) dans les eaux de surface ?

Les métaux constituent une source majeure de la pollution minérale des milieux aquatiques. Non synthétiques et indestructibles, beaucoup sont toxiques (notamment ceux considérés comme prioritaires par la DCE) et certains connaissent une émergence due aux nouvelles technologies (e.g. nanoparticules métalliques)

[18].

Bien que leurs concentrations dans les eaux naturelles diminuent généralement depuis le début des années quatre-vingt par la réhabilitation des sites contaminés, le changement climatique jouera probablement un rôle très important sur leur transport (érosion des sols et sédiments, transport vers le milieu marin) et sur les évolutions des gradients biogéochimiques (redox, pH, salinité, température, teneurs en carbone organique, phénomènes microbiens), conduisant à une remise en suspension et un relargage dans les systèmes aquatiques [18 à 23] (cf. *Webcomplément n° 6 de l'Université de Bordeaux*). Les changements dans le régime hydrologique, comme la réduction des apports en neige, l'apparition d'événements pluvieux extrêmes, les périodes de sécheresse prolongée sont également susceptibles de modifier les écoulements souterrains au niveau des anciens sites miniers et/ou de stockage, avec le doute sur la capacité « tampon » de ces fluctuations par les processus biogéochimiques [24] (cf. *Webcomplément n° 7 de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour*).

Les concentrations en micropolluants organiques augmenteront probablement.

Les impacts du changement climatique (décrits ci-dessus) seront très va-

12 • En « potabilisation » des eaux, la MOD est source de nombreux problèmes, comme la présence de couleur, la consommation de réactifs de traitement, la formation de sous-produits de chloration potentiellement cancérigènes, le colmatage des membranes, etc.

riables selon que les micropolluants organiques sont classés comme persistants (POP) ou non (pesticides, résidus de médicaments, détergents...).

Les POP subiront certains effets positifs du changement climatique (volatilisation, photo-dégradation), mais les modifications des cycles hydrologiques et l'élévation de la température de l'air conduiront à une augmentation des apports humides en POP provenant des anciens stocks, entre autres des sédiments (par les crues) et des glaciers (par la fonte) [25 à 27].

Les présences « massives » des herbicides « interdits » et de leurs métabolites connus dans les eaux de Nouvelle-Aquitaine révèlent, d'une part, de la présence d'un grand stock dans les sols et, d'autre part, de l'importance des réactions naturelles de transformations biologiques et abiotiques. Ces réactions de déstockage et de transformation/métabolisation seront sans doute amplifiées par l'augmentation de la température et par l'intensification des précipitations ponctuelles, comme déjà démontrées par certains travaux [28 à 31].

Le risque de développements microbiologiques et de phytoplancton est-il avéré ? Le développement d'espèces phyto-planctoniques et de cyanobactéries (émettant pour certaines des toxines) a été très souvent constaté quand la température et la macropollution (carbone, azote, phosphore) de l'eau augmentent, notamment pour les plans d'eau, mais aussi pour les cours d'eau. L'augmentation de la température liée au changement climatique aura donc nécessairement un impact sur la fréquence et l'intensité du développement du phytoplancton en général et des cyanobactéries en particulier [32]. Il en sera probablement de même pour l'ensemble des micro-organismes indésirables (développement, transmission, virulence des pathogènes pour l'Homme), dans l'eau douce comme dans l'eau de mer, accompagné de l'émergence de certains micro-organismes pathogènes allogènes, notamment tropicaux. L'augmentation possible de la fréquence des tempêtes et des épisodes d'immersion favorisera également ces phénomènes, particulièrement par entraînement et libération de nutriments supplémentaires.

LES CONSÉQUENCES SUR LES RISQUES ÉCOLOGIQUES ET SANITAIRES

Il s'agit ici de présenter principalement les effets du changement climatique sur l'écotoxicité des eaux, donc de discuter le risque écologique. La partie « impacts sur la santé » est décrite dans un autre chapitre de l'ouvrage et est simplement résumée ici

aux risques microbiologiques.



GÉNÉRALITÉS SUR LA TOXICITÉ DES EAUX

La toxicité des eaux, comme celle d'autres milieux, est principalement évaluée au regard de ses implications sur les risques sanitaires (toxicologie humaine) et écologiques (écotoxicologie). Ce sont de très nombreuses données (bio-essais, expérimentations sur mammifères) qui permettent de définir des valeurs guides toxicologiques (VTR¹³, PNEC¹⁴, MAC¹⁵...), conduisant ensuite, par extrapolation (voire à l'aide d'études épidémiologiques), à des normes diverses comme, par exemple, les normes de qualité environnementale des eaux de surface douces et marines (NQE), les valeurs seuils pour les eaux souterraines, les limites et références de qualité de l'eau destinée à la consommation humaine [1] [2].

Les valeurs guides d'écotoxicité dépendent du biote étudié (algues, invertébrés, poissons, mammifères), des effets toxiques recherchés (toxicité directe aiguë ou chronique, toxicité par empoisonnement secondaire) et de l'existence ou non de relation dose/effet (valeur seuil ou probabilité), etc. Il n'est pas possible ici de donner la liste de ces valeurs et leurs significations qui sont largement décrites dans la littérature spécialisée [e.g. 2]. Il est toutefois important de noter [32] que les mécanismes de prise en charge des polluants par les organismes aquatiques, et par conséquent leurs effets potentiels, vont fortement dépendre de la structure chimique des molécules potentiellement toxiques (taille, polarité, liposolubilité...) et de leur spéciation (donc de leur biodisponibilité), des voies d'exposition et des barrières biologiques concernées (épithélium branchial, revêtement cutané, tractus digestif...), des organismes biologiques étudiés et de leurs capacités de métabolisation ou d'élimination.

LES INCIDENCES PRÉVISIBLES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR L'ÉCOTOXICITÉ

Les incidences du changement climatique sur l'écotoxicité sont complexes car multifactorielles. Toutefois, une augmentation probable de la pollution (en absence d'adaptation) couplée à une amplification certaine de plusieurs moteurs réactionnels naturels comme l'augmentation de la température et de la salinité des eaux douces de surface ou l'acidification des océans, accroîtront globalement l'écotoxicité des milieux.

13 • D'après l'ANSES, « une VTR (valeur toxicologique de référence) est un indice toxicologique qui permet, par comparaison avec l'exposition, de qualifier ou de quantifier un risque pour la santé humaine ». Elles sont largement utilisées dans la démarche d'évaluation quantitative des risques sanitaires.

14 • La « Predicted No Effect Concentration - PNEC » est la plus forte concentration d'une substance, sans risque chronique pour l'environnement. C'est donc une estimation de norme de qualité pour la colonne d'eau (douce ou marine) vis-à-vis du polluant considéré. La notion de PNEC est également appliquée aux sédiments et aux sols.

15 • La « Maximum Acceptable Concentration - MAC » correspond à une concentration de polluant admissible mais sur de courtes durées, par exemple lors de pics de pollution.

La présomption d'augmentation des concentrations en contaminants dans les eaux superficielles, pouvant atteindre ou dépasser les valeurs des « PNEC », induira une augmentation du potentiel écotoxique de ces eaux.

On rappelle rapidement ici certains de ces effets : augmentation des matières en suspension et des composés hydrophobes associés lors des crues, diminution de la dilution en régime d'étiage, alternances sécheresses-précipitations en lien avec l'érosion des sols des bassins versants, phénomènes d'hypoxie plus fréquents impactant entre autres la toxicité due aux éléments traces métalliques... Pour les micropolluants organiques, présents aux différentes échelles d'organisation biologique et trophique, certains sont bioaccumulables (les POP en particulier), d'autres peuvent générer des effets (directement ou après biotransformation) sur le vivant sans nécessairement être accumulés. Les pesticides, par exemple, peuvent impacter la composante végétale aquatique [33] et avoir des effets vis-à-vis d'autres organismes (herbicides sur les algues, insecticides sur les poissons). Pour les éléments traces métalliques, c'est toute la chaîne écologique, du phytoplancton aux niveaux d'organisation supérieurs qui est impactée par des effets toxiques divers, ce qui pose donc la question à court terme de la pérennisation de la consommation de la ressource biologique aquatique.

L'amplification des « moteurs » des réactions abiotiques et biotiques modifiera certains mécanismes de toxicité. Les élévations de la température, de la salinité, des teneurs en matières organiques dissoutes et matières en suspension influenceront directement sur la spéciation des contaminants et donc sur leur transfert intercompartiments environnementaux. On peut s'attendre à une augmentation de la biodisponibilité et de la toxicité, en parallèle de l'amplification de ces « moteurs réactionnels » naturels par effet du changement climatique. Pour les pesticides, par exemple, de nombreux travaux ont montré l'augmentation de leur toxicité avec une élévation de la température [34 à 36] et de la salinité [37] [38]. Par ailleurs, les phénomènes naturels de dégradation des polluants organiques vont également s'amplifier, notamment par augmentation de la température de l'eau, du pH pour les eaux eutrophisées (hydrolyse), de l'ensoleillement (photolyse) et du développement bactérien (biodégradation). Ces dégradations conduiront à des métabolites dont on ne connaît pas toujours la structure et la toxicité.

Les effets combinés des augmentations de la pollution et notamment, de la température seront néfastes aux écosystèmes. L'accroissement de température impactera la physiologie, la croissance (en + ou en -), le développement des organismes (malformations, arrêt de développement [35] [36] [38]), le succès d'éclosion, la métamorphose, l'âge de maturité sexuelle... impacts amplifiés par les effets toxiques des contaminants (diminution de la fécondité, de la croissance, de la biodiversité et augmentation de la mortalité [39] [40]).

En période d'étiage, les conditions hypoxiques rencontrées en milieu naturel (liées aux augmentations de la température des eaux et de la durée des périodes d'étiage estivales) conduiront, d'une part, à une hyperventilation des organismes provoquant une plus forte bioaccumulation des contaminants [41] et d'autre part à un affaiblissement des organismes par une diminution de leur métabolisme général de façon à « s'économiser ». En d'autres termes, une réallocation de tout ou partie des ressources énergétiques de l'organisme vers les processus de maintenance (et de détoxification) au détriment des processus de croissance, développement, reproduction, pourrait conduire à des atteintes toxiques plus sévères au niveau cellulaire avec des répercussions aux échelles individuelles et populationnelles [42] [43]. Des travaux sur les effets toxiques de contaminants, combinés à des élévations de température, ont été publiés par les chercheurs de Nouvelle-Aquitaine, par exemple dans **le cadre de bivalves bio-indicateurs filtreurs d'eau douce [44 à 54]** (cf. Webcomplément n° 8 et n° 9 de l'Université de Bordeaux).

L'effet de toxicité « retard », c'est-à-dire la remobilisation lors de périodes de sous-alimentation de contaminants stockés dans les graisses en raison de leur caractère lipophile, pourra être exacerbé. Cet effet, bien connu chez l'ours polaire du fait de son cycle de vie, peut être généralisé à plusieurs espèces [33], dont certaines plus locales comme les esturgeons et les anguilles [55] [56] (cf. Webcomplément n° 10 de l'Université de Bordeaux). Dans un certain nombre de cas, l'impact du changement climatique peut également se traduire par une bioaccumulation moins importante si les réseaux trophiques sont modifiés de telle sorte que les organismes supérieurs se nourrissent sur des proies de niveaux trophiques inférieurs moins contaminées [57].

L'acidification de l'eau de mer va affecter les organismes marins. L'acidification des océans correspond à la baisse du pH de l'eau de mer due à l'augmentation constante dans le milieu marin du CO₂, un acide faible, issu notamment des activités humaines. Le pH, alors de 8,2 à l'ère préindustrielle, est aujourd'hui de 8,05 en raison de l'augmentation de la pression partielle de CO₂ de 280 µatm en 1900 à 400 µatm aujourd'hui. Les modèles du GIEC prédisent des niveaux entre 600 et 800 µatm d'ici la fin du siècle, causant une baisse du pH actuel de 0,3 à 0,4 unité [58 à 60] (cf. Webcomplément n° 11 de l'Université de La Rochelle).

LE RISQUE MICROBIOLOGIQUE

Un autre risque important, souvent moins médiatisé que le risque chimique, est de nature microbiologique, que ce soit pour les milieux aquatiques ou, surtout, pour l'Homme. Dans ce cas, ce sont les incidences du changement climatique sur les maladies infectieuses à transmission hydrique qui sont à craindre et doivent être particulièrement examinées, qu'elles soient dues à un contact direct avec l'eau (e.g. alimentation et hygiène corporelle) ou à la consommation d'aliments contaminés (e.g. conchyliculture).

Les changements climatiques peuvent avoir des conséquences majeures sur l'ensemble des micro-organismes pathogènes de l'eau principalement *via* des inondations (lessivage des sols), des sécheresses et un réchauffement de la température de l'eau. La température est en effet un paramètre clé du développement des bactéries en général, mais aussi pour leur pathogénicité. Les efflorescences de cyanobactéries en sont un exemple révélateur, d'autres exemples pourraient être décrits dans le cas des bactéries d'origine fécale entre autres, des protozoaires et des virus [61] [62] (cf. *Webcomplément n° 12 de l'Université de Poitiers*).

CONCLUSION

Selon les bilans des SDAGE 2015, le bon état écologique est loin d'être atteint pour les eaux de surface, à l'exception des eaux côtières qui sont de bonne qualité. En effet, seulement 36 %, 15 % et 8 % sont en bon état écologique pour respectivement les cours d'eau, les plans d'eau et les eaux de transition (estuaires notamment). L'objectif de bon état total en 2027 ne sera pas évident à atteindre pour ces masses d'eau compte tenu de l'impact prévisible du changement climatique. Il faut noter que l'analyse de nombreux autres indicateurs chimiques et biologiques que ceux de la DCE n'atténue pas ce constat. La société civile est souvent alertée sur la diminution de la disponibilité en eau douce de surface sous l'effet du changement climatique et ses conséquences sur l'ensemble des usages, mais on oublie trop souvent les retombées sur la qualité de ces eaux. Les conséquences physiologiques liées aux augmentations de la température, des nutriments (azote, phosphore, matière organique), voire de la salinité et à la diminution de l'oxygène, impactent déjà la vie des espèces existantes avec des modifications des aires de distribution, des rivalités entre les espèces migrantes et celles déjà présentes. S'ajouteront des augmentations du nombre d'espèces invasives, souvent thermophiles et opportunistes et des risques de maladies liées aux endotoxines et aux parasites. Par ailleurs, à qualité et quantité constantes des rejets anthropiques, l'effet de moindre dilution de la pollution, couplée à une remobilisation probable des polluants déjà présents dans les sédiments, conduira à une augmentation de la micropollution organique et minérale. La fragilisation accrue des milieux, la modification des chaînes trophiques et plus globalement des réseaux écologiques, déjà soumis aux pressions anthropiques, seront donc aggravées au niveau de l'ensemble des traits biologiques et écologiques par l'excès de pollution induit par le changement climatique, en absence de mesures d'adaptation immédiates. La question de la qualité de la ressource pour l'alimentation en eau potable à partir d'eau de surface se posera également surtout lorsque cette ressource est la seule disponible.

Quelles barrières de traitement pour lutter contre l'augmentation probable dans les « eaux brutes » de certains paramètres de qualité, de type parasite, cyanotoxines, matière organique naturelle dissoute (précurseur de sous-produits de désinfection toxiques), micropolluants, etc. ? Le développement de technologies énergivores et/ou le recours plus systématique à des réactifs chimiques pour le traitement de l'eau à potabiliser sont bien sûr des solutions curatives à ces problèmes d'eau brute dégradée, mais à quels coûts et avec quels effets sur la qualité de l'eau potable produite ?

Les masses d'eaux souterraines de Nouvelle-Aquitaine sont en bon état chimique pour 60 % d'entre elles, les 40 % restants sont « déclassés » par les paramètres nitrates et/ou pesticides (Vienne, Charentes, Dordogne, Sud du Lot-et-Garonne, secteur du Sud des Landes au Nord des Pyrénées-Atlantiques). Quel sera l'impact du changement climatique sur cette qualité sachant que les sols détiennent encore des proportions importantes d'engrais et de phytosanitaires (et de leurs métabolites) destinés à « fuir » vers les eaux souterraines, plus encore sous l'effet de l'augmentation de la température et de phénomènes hydrologiques extrêmes ? Face à la baisse de la disponibilité en eau de surface, à l'augmentation importante de la population (par rapport à la moyenne nationale) à proximité du littoral et à l'augmentation de la demande en eau potable par habitant, le report vers les eaux souterraines apparaîtra comme une solution. Au plan de la qualité, les risques majeurs de surexploitation seront alors des transferts amplifiés de polluants vers les nappes profondes et, plus localement, des remontées probables du biseau salé.

Que ce soit pour les eaux de surface ou pour les eaux souterraines, un plan d'adaptation est indispensable pour lutter contre la détérioration très probable de la qualité de ces eaux naturelles sous l'effet du changement climatique. Ce plan consistera principalement à protéger les ressources en eau, à augmenter le niveau de collecte et d'épuration des rejets, à limiter les pollutions diffuses et à optimiser et adapter les prélèvements pour compenser la baisse quantitative des ressources. Il doit être rapidement mis en œuvre sous risque de nuire aux milieux naturels, de ne pas pouvoir atteindre les objectifs DCE et de compliquer la production d'eau potable. Les zones les plus vulnérables de la Nouvelle-Aquitaine devront être ciblées¹⁶ et des sites d'observation stratégique choisis, afin de suivre (par des mesures adaptées) les impacts du changement climatique sur la qualité des eaux de ces zones, ainsi que les effets des mesures d'adaptation.

3 L'AIR

INTRODUCTION ET GÉNÉRALITÉS

L'air que l'on respire (atmosphère) contient essentiellement du diazote (azote), du dioxygène (oxygène), de l'eau, du dioxyde de carbone (gaz carbonique)¹⁷, des gaz rares comme l'argon et, à des teneurs beaucoup plus faibles, du méthane¹⁸, du monoxyde de carbone¹⁹, des oxydes d'azote²⁰, de l'ozone²¹, du dioxyde de soufre²², de l'ammoniac²³, etc. Ces composés ont des durées de vie moyennes très variables²⁴. L'atmosphère gazeuse transporte aussi des aérosols²⁵ qui sont des particules solides ou liquides plus ou moins finement dispersées dans l'air avec des temps de présence de quelques jours. Les sources d'émission de gaz et d'aérosols dans l'atmosphère peuvent être d'origines naturelles (végétation, sols, océans, érosion, éruptions volcaniques, feux de forêts, etc.) ou

anthropiques (combustion de la matière organique, traitement des déchets, transports, productions industrielles, etc.). Les polluants peuvent être primaires lorsqu'ils sont directement issus de sources d'émission (oxydes d'azote, par exemple) ou secondaires quand ils sont formés dans l'atmosphère suite à des processus physico-chimiques (ozone troposphérique²⁶ par exemple).

Suite à la loi Laure (1996), la surveillance de la qualité de l'air est assurée en France par les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA), agréées par le Ministère en charge de l'Écologie. Ces associations surveillent annuellement certains polluants atmosphériques²⁷ réglementés et d'autres non réglementés, mais à enjeux.



17 • CO_2 (ou gaz carbonique), d'origine naturelle ou résultant des processus de combustion.

18 • CH_4 constituant principal du gaz naturel et des gaz issus de la biodégradation anaérobie naturelle ou provoquée des matières organiques.

19 • CO , issu principalement des processus de combustion incomplète (pauvres en oxygène).

20 • NO_x issus principalement des processus de combustion.

21 • O_3 issu principalement dans la basse atmosphère de processus photochimiques en lien avec l'activité humaine, dans la basse atmosphère.

22 • SO_2 libéré dans l'atmosphère terrestre par les volcans et par de nombreux procédés industriels, ainsi que par la combustion de combustibles fossiles.

23 • NH_3 issu principalement des activités agricoles.

24 • Par exemple de 8 ans pour le méthane à 120 ans pour le dioxyde de carbone.

25 • Les particules des aérosols peuvent contenir des acides, des métaux, des composés organiques, de la suie, etc.

26 • L'ozone troposphérique n'est pas directement émis dans l'atmosphère mais formé par une série de réactions photochimiques impliquant les hydrocarbures, les oxydes d'azote et le rayonnement solaire.

27 • D'après la loi LAURE, dite loi LEPAGE du 30/12/96 : « Constitue une pollution atmosphérique, l'introduction par l'homme directement ou indirectement dans l'atmosphère et les espaces clos, de substances ayant des conséquences préjudiciables de nature à mettre en danger la santé humaine, à nuire aux ressources biologiques et aux écosystèmes, à influencer sur les changements climatiques, à détériorer les biens matériels et à provoquer des nuisances olfactives. »

Les paramètres qui font l'objet d'une réglementation en France sont les groupes de particules de tailles moyennes inférieures ou égales à 10 µm (PM₁₀) et à 2,5 µm (PM_{2,5}), les oxydes d'azote, le plomb, le dioxyde de soufre, l'ozone, le monoxyde de carbone, le benzène, certains métaux et métalloïdes (As, Cd, Ni) et un hydrocarbure aromatique polycyclique (benzopyrène). Plusieurs niveaux (ou normes de qualité) à maintenir ou à ne pas dépasser sont précisés dans un décret [63], exprimés en concentration dans l'air ambiant ou en masse de dépôt sur les particules pour un temps donné. L'objectif de qualité est le niveau à atteindre à long terme et à maintenir (moyenne sur l'année civile) afin d'assurer la protection de la santé humaine et de l'environnement. Il est parfois accompagné d'une valeur cible pour la protection de la santé humaine ou pour la protection de la végétation. Le seuil d'information et de recommandation est le niveau (en moyenne horaire ou journalière) au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé humaine de groupes particulièrement sensibles. Il est très souvent accompagné d'un seuil d'alerte (niveau plus élevé) qui s'applique à toute la population. Les valeurs limites (en moyenne horaire, journalière ou annuelle civile) sont les niveaux à ne pas dépasser sur des périodes définies pour la protection de la santé humaine ou de la végétation.

Les lignes directrices (ou valeurs guides) de l'OMS [64] sont aussi très utilisées dans les bilans des associations de surveillance. Ces valeurs guides sont souvent accompagnées de cibles intermédiaires associées à des risques de mortalité.

À partir des données recueillies, des outils de modélisation permettent ensuite de déterminer la pollution à différentes échelles et ainsi de prévoir les pics de pollution et d'estimer les niveaux de pollution sur des zones dépourvues de points de mesure. Un premier pas indispensable, mais dont il faut amplifier le rôle avec plus de paramètres suivis et des méthodologies rigoureuses pour l'usage scientifique [32].

La détérioration de la qualité de l'air est évidemment en lien direct avec le développement démographique et économique mondial, mais le changement climatique, intimement lié aux émissions polluantes atmosphériques, contribuera probablement à accentuer cette détérioration. Toutefois et malgré la littérature scientifique abondante sur la relation « qualité de l'air/climat », les impacts du changement climatique sur les émissions de polluants atmosphériques sont encore relativement incertains, car dépendants de la localisation géographique [65]. L'ensemble des scénarios publiés tend néanmoins vers une détérioration de la qualité de l'air, particulièrement illustrée par les évolutions dans les prochaines décennies des concentrations d'ozone et d'aérosols atmosphériques, ayant

eux-mêmes un impact sur le changement climatique [32]. En Europe du Nord, le climat plus humide sera favorable à l'amélioration de la qualité de l'air, alors qu'en Europe du Sud, la présence de plus en plus courante de grandes vagues de chaleur et d'épisodes de sécheresse devraient affecter la qualité de l'air, comme par exemple sur les concentrations d'ozone ou de particules issues des feux de forêt [66]. Pour la Nouvelle-Aquitaine, en absence de modélisations prédictives sur les concentrations en polluants atmosphériques, seule une transposition des observations à grande échelle peut être abordée ici, en la confrontant aux tendances observées ces dix dernières années sur les espèces réglementées [32].

LA QUALITÉ DE L'AIR EN NOUVELLE-AQUITAINE : BILAN ET IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

LA POLLUTION DE L'AIR EN NOUVELLE-AQUITAINE

L'ATMO Nouvelle-Aquitaine est issue du regroupement des trois associations de surveillance des ex-régions (AIRAQ en Aquitaine, ATMO en Poitou-Charentes et LIMAIR en Limousin). Elle dispose de 55 stations fixes de différente typologie qui permettent de mesurer en permanence une vingtaine de paramètres afin de mieux connaître l'évolution de leur concentration (ozone, dioxyde de soufre, oxydes d'azote, monoxyde de carbone, ammoniac, composés organiques volatils non méthaniques, certains métaux et métalloïdes, groupes de particules, polluants organiques divers) et elle réalise les estimations de leurs émissions²⁸. Pour ce qui concerne les GES²⁹, les mesures sont réalisées par le réseau européen ICOS (Integrated carbon observation system).

Le **Tableau 1** présente le bilan des principales émissions de polluants primaires en 2012, par sources fixes et mobiles [67]. Les émissions annuelles de GES ne sont pas incluses dans ce tableau, car déjà présentées en préambule de cet ouvrage (**Focus « Émissions de gaz à effet de serre »**), globalement et par secteur à partir des données de l'AREC Nouvelle-Aquitaine (Agence Régionale d'Évaluation environnement et Climat)³⁰.

28 • Afin, notamment, de connaître les quantités rejetées et d'identifier les principaux émetteurs pour étudier les possibilités d'amélioration.

29 • Les gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, méthane, protoxyde d'azote, fluorés) sont considérés comme des polluants lorsqu'ils sont en excès.

30 • Il faut noter que les quantités totales de GES estimées par l'ATMO NA sont plus faibles que celles estimées par l'AREC, les modèles utilisés étant différents.

ÉMISSIONS	INDUSTRIE MANUFACTURIÈRE, DÉCHETS, CONSTRUCTION	EXTRACTION, DISTRIBUTION, TRANSFORMATION	RÉSIDENTIEL, TERTIAIRE, COMMERCIAL	AGRICULTURE, SYLVICULTURE	TRANSPORTS ROUTIERS	AUTRES TRANSPORTS	BIOTIQUE	TOTAL NOUVELLE-AQUITAINE
SO ₂	7,19	0,35	2,48	1,3	0,11	0,85	0	12,28
NO _x	12,38	0,75	9,91	20,25	73,0	3,32	2,60	122,22
CO	19,79	2,84	192,28	26,29	76,47	1,05	0	318,72
NH ₃	1,28	0	0	94,33	0,84	0	0	96,45
COVNM*	19,76	1,79	39,71	3,9	7,16	0,24	174,88	247,44
TSP **	14,66	0,07	12,64	28,22	12,26	1,73	-	69,57
PM ₁₀	6,96	0,06	11,85	10,97	7,97	0,71	-	38,52
PM _{2,5}	3,85	0,06	11,56	5,82	5,68	0,33	-	27,30

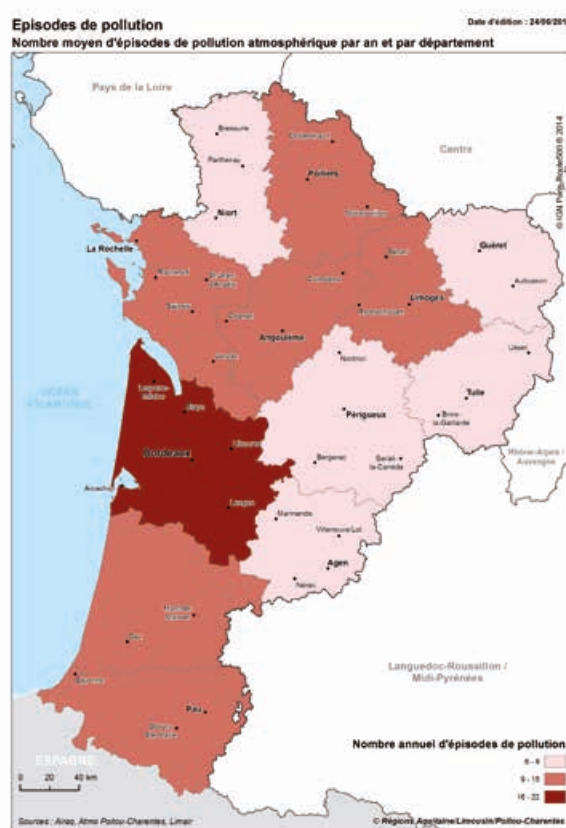
*COVNM : Composés Organiques Volatils Non Méthaniques.

**TSP : Particules totales en suspension (Total Suspended Particles).

Tableau 1 : Bilan des émissions de polluants primaires, en milliers de tonnes, en Nouvelle-Aquitaine pour l'année 2012 (bilan établi par l'ATMO Nouvelle-Aquitaine).

L'ATMO Nouvelle-Aquitaine mentionne que les départements de la région enregistrent des épisodes de pollution³¹ pendant près de 8 jours en moyenne chaque année (**Figure 6**)³² avec deux fois plus en Gironde que dans les autres départements. En cause dans 96 % des cas depuis 2013, les particules en suspension PM₁₀. Une dizaine d'épisodes de pollution à l'ozone ont été enregistrés sur les trois dernières années notamment sur les départements du sud et de l'ouest de la région, épisodes favorisés par l'ensoleillement et la chaleur. Un épisode de pollution au dioxyde de soufre a été détecté sur la zone industrielle de Lacq.

Figure 6 : Le nombre annuel d'épisodes de pollution en Nouvelle-Aquitaine, par département. Crédit photo : Atmo Nouvelle-Aquitaine.



31 • Le terme « épisode de pollution », utilisé notamment dans les arrêtés préfectoraux, est défini comme la « période au cours de laquelle la concentration dans l'air ambiant d'un ou plusieurs polluants atmosphériques est supérieure au seuil d'information et de recommandation ou au seuil d'alerte ».

32 • Des détails et compléments peuvent être obtenus auprès de www.atmo-nouvelleaquitaine.org

Suite à la Loi Grenelle II, les schémas régionaux Climat-Air-Énergie [68] imposent de mettre en place la cartographie des zones sensibles en termes de dépassement des valeurs réglementaires en polluants atmosphériques (à l'exception de l'ozone), de façon à notamment anticiper au mieux l'impact des changements climatiques sur la qualité de l'air. En Nouvelle-Aquitaine, ce travail a mis en évidence l'importance du couloir routier Nord-Sud (vers l'Espagne) et dans une moindre mesure l'axe Bordeaux-Toulouse, qui se traduisent par des surémissions d'oxydes d'azote dus au transport routier [69]. En recoupant ces trajets avec la carte des zones protégées (protection de biotope, réserve naturelle, parc national), ce travail a abouti à définir la cartographie des communes dites sensibles, où la qualité de l'air sera jugée prioritaire dans les prochaines années (Figure 7)³³.

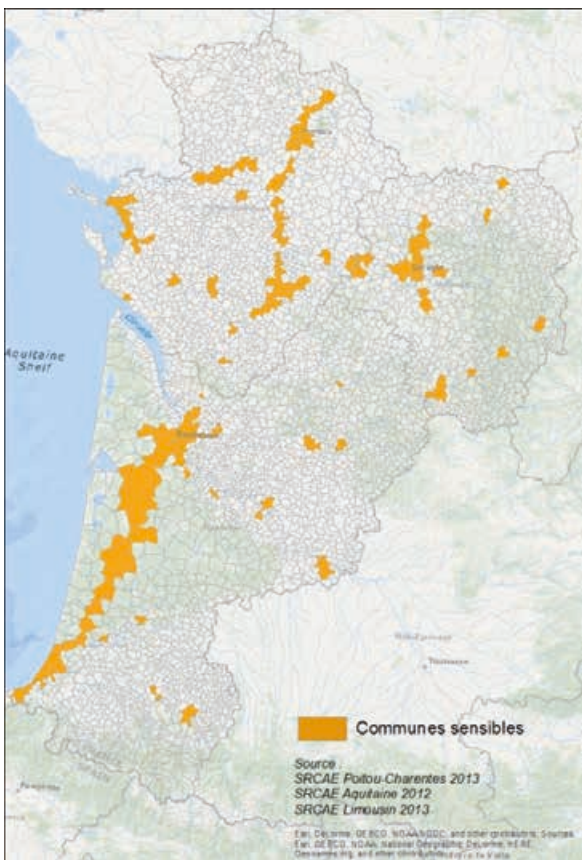


Figure 7 : Communes sensibles à la dégradation de la qualité de l'air. Crédit photo : Atmo Nouvelle-Aquitaine.

Pour les polluants les plus importants, ainsi que pour les GES, le lecteur peut générer lui-même des cartes régionales d'émission depuis le site internet de l'ATMO Nouvelle-Aquitaine : emissions-polluantes.atmo-nouvelleaquitaine.org

UN IMPACT INCERTAIN DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES ÉMISSIONS DE PARTICULES

En 2012 en Nouvelle-Aquitaine, les émissions de PM_{10} s'élevaient à plus de 38 000 tonnes et celles de $PM_{2,5}$ à plus de 27 000 tonnes, ce qui représente respectivement 6,6 kg et 4,7 kg par habitant sur l'année, au-dessus des moyennes nationales (respectivement 5,2 kg et 3,4 kg/hab/an). Plus de la moitié de ces émissions sont localisées sur les cinq départements Gironde, Charente-Maritime, Landes, Pyrénées-Atlantiques et Dordogne. Le secteur résidentiel reste le principal émetteur de $PM_{2,5}$ sur l'ensemble des départements, la Gironde étant évidemment le département le plus émetteur. Les émissions de PM_{10} sont à l'origine de 96 % des épisodes de pollution depuis 2013. Leurs moyennes annuelles dépassent la valeur guide de l'OMS ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) pour une station sur deux, tout en restant inférieures à l'objectif de qualité français ($30 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Les émissions de $PM_{2,5}$, qui sont jugées les plus préoccupantes pour les effets sanitaires sur les systèmes respiratoires et cardio-vasculaires, présentent des moyennes annuelles qui dépassent la valeur guide de l'OMS et l'objectif de qualité français ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$), sur toutes les stations de surveillance, sans atteindre les valeurs réglementaires critique ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et limite ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Depuis 2008, une légère baisse des particules est observée, notamment des PM_{10} , mais seulement au niveau des stations trafic routier (cf. Figure 8), ce qui correspond à une amélioration des procédés de combustion et des méthodologies de traitement des effluents atmosphériques. Les niveaux urbains baissent plus lentement alors que les niveaux ruraux stagnent.

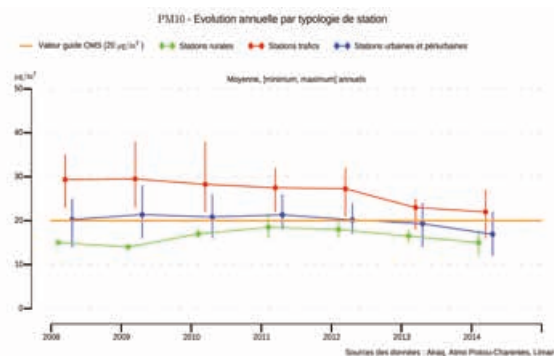


Figure 8 : Évolution des concentrations moyennes annuelles des PM_{10} par typologie de station, en Nouvelle-Aquitaine, de 2008 à 2015.

33 • Malgré tout l'intérêt de cette démarche de zonage, celle-ci est néanmoins limitée par la non-prise en compte de l'ozone dont les émissions ne peuvent être réglementées directement, mais dont la concentration sera un des enjeux majeurs, avec celle des particules fines, en termes d'impact du changement climatique sur la qualité de l'air au niveau régional.

Le changement climatique favorisera les émissions des plus grosses particules issues de l'érosion des sols par les épisodes de sécheresse. À contrario celles provenant de l'utilisation de chauffage au bois seront atténuées. Toutefois, la masse des particules atmosphériques est-il le paramètre le plus pertinent pour juger de leur impact, par rapport au suivi de leur distribution en taille? En effet, les particules ultrafines ou PUF (de diamètres inférieurs à 0,1 µm) ont un impact direct très important sur la santé par leur pouvoir de pénétration dans le système respiratoire jusqu'aux alvéoles pulmonaires, voire dans le sang, alors que leur masse est négligeable par rapport à celles de particules plus grossières micrométriques. Ces PUF ont fait l'objet de mesures exploratoires³⁴ en région depuis 2012, en site urbain (Talence-33) et en site industriel (Mourenx-64). Ces mesures ont montré, d'une part, l'influence du trafic routier sur les granulométries les plus fines, et d'autre part, le rôle des aérosols secondaires en lien avec les émissions industrielles de dioxyde de soufre et la formation de sulfates.

Quel sera l'effet du changement climatique sur les particules fines, notamment dans les aérosols secondaires? La question est très complexe et la réponse est incertaine [32]. Des travaux de recherche ont montré qu'une hausse de la température peut réduire la concentration des PUF dans les aérosols secondaires grâce à la plus grande volatilisation du nitrate d'ammonium (un de leurs composants majeurs), mais qu'un effet inverse est attendu du fait de l'augmentation des concentrations en sulfates [70]. L'effet du changement climatique sur les aérosols n'est pas encore bien évalué et la réciprocity également, c'est-à-dire l'effet des aérosols sur le climat [65]. Ce domaine est la cible d'un effort de recherche important de la part de la communauté scientifique [32] [71] qui conclut en général aujourd'hui qu'une nette réduction des émissions/générations d'aérosols aggraverait par contre le réchauffement climatique [72] [73].

LES ÉMISSIONS D'OXYDES D'AZOTE DEVRAIENT CONTINUER À DIMINUER

Le dioxyde d'azote (NO₂) est le principal composant du groupe des oxydes d'azote (NO_x). Il est suspecté d'être à l'origine de certains symptômes bronchiques chez les enfants asthmatiques [64]. En Nouvelle-Aquitaine, peu de stations (3 à 5 %) dépassent la valeur guide de l'OMS et l'objectif de qualité français pour le dioxyde d'azote (40 µg/m³). Cela concerne les zones urbaines sujettes au trafic et au transport routiers; principales sources d'émissions, soit 58 à 77 % selon les départements. Les émissions régionales d'oxydes d'azote en 2012 ont été de 122 000 tonnes, soit 21 kg par habitant (moyenne nationale ≈ 17 kg/hab/an). La Gironde et la Charente-Maritime concentrent près du tiers de ces émissions.

Les concentrations en dioxyde d'azote dans l'atmosphère enregistrent une nette diminution globale en Nouvelle-Aquitaine (Figure 9), due à l'optimisation des procédés de combustion industrielle et des systèmes de chauffage et à la baisse de la consommation en carburant des véhicules malgré l'augmentation du trafic. Notons que lors de l'épisode de canicule en 2003, il n'a pas été mesuré de hausses notables de concentrations en NO_x à cette période sur l'Aquitaine [74].

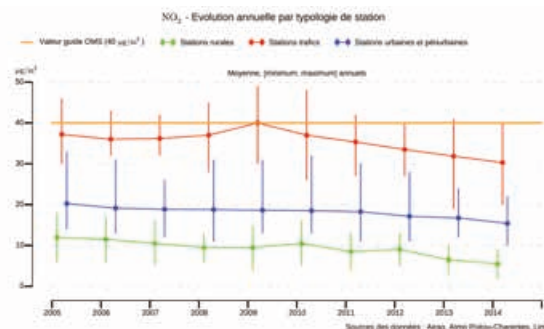


Figure 9 : Évolution des concentrations moyennes annuelles en dioxyde d'azote (NO₂) par typologie de station, en Nouvelle-Aquitaine, de 2008 à 2015.

LES TENEURS EN DIOXYDE DE SOUFRE RESTERONT FAIBLES

Le dioxyde de soufre (SO₂) est suspecté (avec une certaine incertitude) de provoquer des maladies respiratoires et des pathologies cardiaques [64]. En région, les concentrations moyennes annuelles sont bien inférieures à l'objectif de qualité français (50 µg/m³), y compris sur les sites industriels. Près des trois quarts des émissions (12 000 tonnes en 2012) sont dues à l'industrie manufacturière (46 %) et à la transformation d'énergie (27 %), majoritairement en Gironde et Pyrénées-Atlantiques (60 % des émissions). En dehors de ces zones, les teneurs restent très faibles.

Malgré les effets démontrés de la hausse de température sur le cycle de vie des acides dans l'atmosphère, conduisant à une importante augmentation de la production de sulfates [75], la législation sur les émissions industrielles a entraîné une telle baisse des émissions de SO₂ (-50 à -60 % en 10 ans en Nouvelle-Aquitaine, liés à la diminution progressive des activités de Lacq) que ce dernier impact restera beaucoup plus déterminant que celui possible du changement climatique. Notons que cette diminution des aérosols sulfatés aura un impact notable sur le changement climatique par augmentation du rayonnement solaire reçu en surface [73].

34 • Contrairement aux mesures classiques de particules dans l'air (PM₁₀ ou PM_{2,5}), exprimées en unité de masse (µg/m³), le type d'appareil utilisé fournit des indications sur le nombre de particules dont le diamètre est compris entre 20 et 800 nm dans l'air, distinguées en 6 classes de granulométrie.

LES ÉMISSIONS D'OZONE VONT AUGMENTER SOUS L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

L'ozone (O_3) provoque des inflammations pulmonaires graves, démontrées par les études épidémiologiques reliant la morbidité respiratoire aux concentrations d'ozone dans l'air [64]. Bien que relativement stables en Nouvelle-Aquitaine depuis une dizaine d'années, les niveaux maxima annuels mesurés (moyenne sur 8 heures) sont supérieurs à l'objectif de qualité français ($120 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et à la valeur guide de l'OMS ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sur la quasi-totalité des sites de mesure (Figure 10). La norme relative à la protection des végétaux est rarement respectée. Des pics de pollutions sont également constatés sur une part significative du réseau de surveillance, principalement sur le sud et l'ouest de la région.

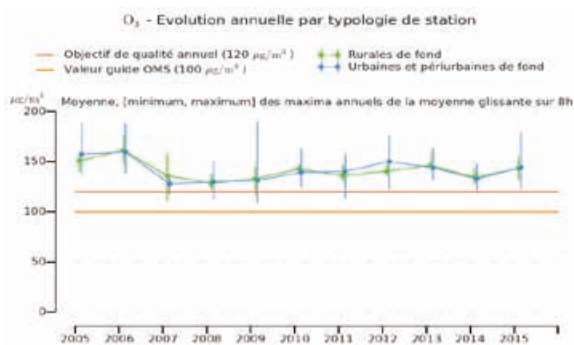


Figure 10 : Évolution des maxima annuels des concentrations en ozone (O_3) par typologie de station, en Nouvelle-Aquitaine, de 2008 à 2015.

La concentration moyenne d'ozone de surface devrait augmenter d'ici la deuxième moitié du XXI^e siècle de 5 à 10 ppb (soit 10 à 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) aux latitudes moyennes [76], du fait principalement de l'augmentation d'épisodes de sécheresse et d'ensoleillement qui vont favoriser la photochimie et donc la formation d'ozone [77] et ce malgré l'augmentation de la concentration en vapeur d'eau (qui décompose l'ozone). À cette augmentation, dite « de fond hémisphérique » s'ajoutera la perturbation, sous l'effet du changement climatique, de différents composés précurseurs, comme les oxydes d'azote, les composés organiques volatils et semi-volatils ou le protoxyde d'azote [32]. Même si les émissions de dioxyde d'azote et de composés organiques volatils (à l'origine de la formation de O_3) sont limitées, l'augmentation de la concentration d'ozone de fond pose un vrai problème car elle pourrait réduire l'efficacité des mesures locales de contrôle des émissions, rendant les objectifs de qualité de l'air encore plus difficiles à atteindre [32][78], avec des conséquences importantes à la fois sur la santé mais aussi sur les écosystèmes.

LES ÉMISSIONS DE COMPOSÉS ORGANIQUES VOLATILS ET SEMI-VOLATILS AUGMENTERONT PROBABLEMENT

Les composés organiques volatils (COV) et semi-volatils (COSV) proviennent de sources anthropiques et biogènes (autres que le méthane). Précurseurs importants d'aérosols organiques secondaires [51], ils sont capables de produire des oxydants photochimiques (comme l'ozone) par réaction avec des oxydes d'azote sous l'effet du rayonnement solaire. Certains (composés mono-aromatiques, dont le benzène) sont cancérigènes, mutagènes ou teratogènes.

Les émissions des COV et COSV biogéniques devraient augmenter d'ici 50 ans du fait de l'effet de fertilisation du CO_2 sur la végétation et de la hausse des températures [32] [78]. Celles supplémentaires de COV anthropiques par évaporation (transport routier, remplissage de réservoirs) vont également augmenter avec la température jusqu'à 30 % d'ici la fin du XXI^e siècle [79].

Les pesticides dans l'air ?

Les contrôles de pesticides dans l'air de Nouvelle-Aquitaine ont débuté dès 2001, en faisant varier plus récemment les types de sites étudiés (proximité des vignes, des vergers, zones de grandes cultures, centres urbains)³⁵. Ils sont présents dans l'air des zones rurales, notamment viticoles, mais également en zone urbaine au centre des villes, comme Bordeaux ou Poitiers. Les herbicides dominent dans l'air des grandes cultures (notamment pendiméthaline), les concentrations en fongicides (notamment chlorothalonil et folpel) dépendent fortement des conditions climatiques et sont globalement plus élevées dans l'air des zones viticoles où l'on retrouve aussi les concentrations les plus élevées en insecticides (notamment chlorpyrifos éthyl). Les cumuls hebdomadaires pour une soixantaine de pesticides contrôlés sont compris entre 2 ng/m^3 (en site de fonds pour les grandes cultures) à près de 20 ng/m^3 (à proximité des vignes).

La tendance pluriannuelle en Nouvelle-Aquitaine dépend des usages et de la météorologie. Les teneurs des herbicides et des fongicides mesurés n'évoluent pas significativement, alors que celles des insecticides diminuent, étrangement, au fil des années, pour les molécules suivies. Pourtant, le constat, ces dernières années, d'une succession d'invasions d'insectes et de moisissures et la certitude d'une accélération du taux d'entrée d'exotiques et de leur établissement en Europe, ainsi qu'une accélération de l'évolution de ceux existants, posent bien sûr la question de l'utilisation éventuellement accrue d'insecticides et de fongicides sous l'impact du changement climatique, et par suite de l'augmentation de leur présence dans l'air.

35 • La base de données actuelle des pesticides sur la grande région comporte plus de 40 000 données d'analyses, réparties selon 219 molécules et 34 sites différents.



LES AUTRES POLLUANTS ATMOSPHÉRIQUES

Pour les autres polluants réglementés (monoxyde de carbone, benzène, métaux, hydrocarbures aromatiques polycycliques), les niveaux mesurés ne montrent pas de dépassement ou de risque de dépassement des valeurs réglementaires sur la période 2011-2016, à une exception près (cadmium à proximité d'un site industriel en cessation récente d'activité).

L'ammoniac (NH_3) n'est pas soumis à une réglementation dans l'air ambiant, mais c'est un précurseur important de particules secondaires. Il réagit avec les composés acides tels que les oxydes d'azote ou de soufre provenant de l'ensemble des sources anthropiques, pour former des particules très fines de nitrate ou de sulfate d'ammonium. En 2012, les émissions d'ammoniac (essentiellement d'origine agricole) se sont élevées à près de 100 000 tonnes sur l'ensemble de la région, ce qui représente plus de 17 kg par habitant et par an (moyenne nationale : ≈ 11 kg).

L'INDEX POLLINIQUE MOYEN ANNUEL NE CESSE D'AUGMENTER EN RÉGION

Les pollens allergisants constituent, au sens du code de l'environnement, une pollution de l'air qui représente un problème surtout printanier et estival, notamment dans les zones de grandes cultures de graminées (Figure 11). En Poitou-Charentes, l'ambrosie, plante invasive dans les zones de grandes cultures, provoque de très fortes allergies (conjonctivites, asthme, rhinites). Sur les deux dernières années, Angoulême apparaît la ville la plus concernée. *A contrario*, les villes de Bayonne, La Rochelle et Pau semblent peu touchées par cette plante.

L'augmentation de l'index pollinique observée en Nouvelle-Aquitaine (environ 15 % de 2007 à 2016), va probablement continuer à progresser sous l'impact du changement climatique.



Risques d'allergies aux pollens

Date d'édition : 25/06/2015

Nombre moyen de semaines ayant connu un risque allergique ≥ 3

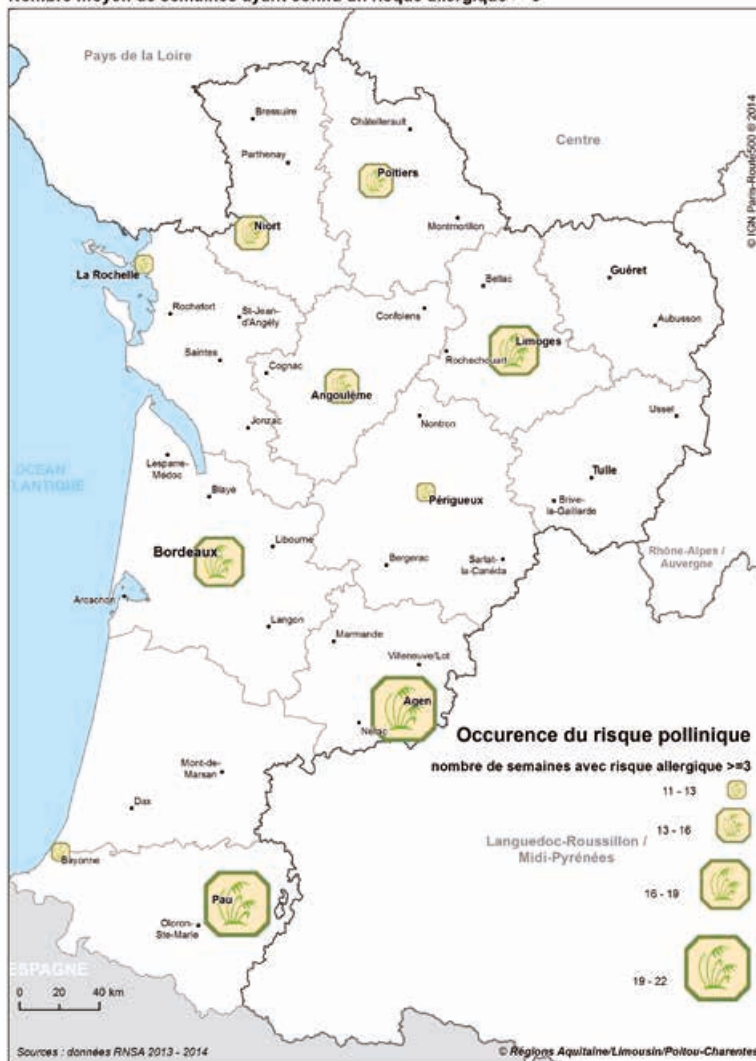


Figure 11 : Carte régionale actuelle des risques allergiques. Crédit photo : Atmo Nouvelle-Aquitaine.

LES GAZ À EFFET DE SERRE (GES)

Selon les sources et les années ciblées, les émissions de GES en Nouvelle-Aquitaine sont estimées, en équivalent CO_2 , entre un peu plus de 7 tonnes par habitant (en 2012, d'après l'ATMO NA) et un peu moins de 9 tonnes par habitant (en 2015, d'après l'AREC NA), à comparer avec la moyenne mondiale d'environ 4 à 5 tonnes par habitant et par an.

Parmi les principaux GES, selon les sources (ATMO ou AREC) et les années, entre 70 et 75 % des émissions régionales, exprimées en équivalents CO_2 , sont imputables au dioxyde de carbone, qui incombe pour moitié au transport et pour un quart au résidentiel et tertiaire. Les autres GES importants, exprimés en équivalents CO_2 ³⁶, sont le méthane (CH_4) qui représente de l'ordre de 15 % des rejets, le protoxyde d'azote (N_2O), de l'ordre de 9 à 11 % (selon les sources et les années) et les gaz fluorés, de l'ordre de 5 %.

36 • Par rapport à la référence CO_2 , les potentiels de réchauffement global (PRG) des autres GES, en kg équivalent CO_2 /kg de GES, sont de 23 pour le méthane, 310 pour le protoxyde d'azote et d'environ 1 000 à 23 000 pour les gaz fluorés (selon les types de gaz).

Le méthane et le protoxyde d'azote sont dus très majoritairement (85 à 90 %) à l'agriculture, en particulier l'élevage pour le méthane et les cultures à engrais pour le protoxyde d'azote. Les gaz fluorés sont dus majoritairement au secteur tertiaire.

D'après le Ministère (MEDDE puis MTES), les émissions de GES en France ont diminué de 11 % entre 1990 et 2013, mais ceci est principalement lié à la diminution des émissions industrielles, malgré

l'augmentation des émissions liées au transport et au secteur résidentiel. En Nouvelle-Aquitaine, ce sont les mêmes tendances, observées depuis une vingtaine d'années et qui se poursuivront très probablement compte tenu des engagements nationaux en vue de l'atténuation du changement climatique. Le **Tableau 2** présente des éléments d'appréciation (commentaires) qui doivent être peaufinés et détaillés à partir d'éléments chiffrés pas suffisamment disponibles actuellement.

SECTEUR	TENDANCE GÉNÉRALE	COMMENTAIRES
Industrie/Énergie	Baisse des émissions	Causes : diminution de l'activité industrielle, maîtrise de la consommation d'énergie, évolution du mix énergétique avec une baisse des énergies émettrices au profit de l'électricité
Résidentiel/ Tertiaire	Hausse des émissions	Causes : augmentation de la population non compensée par une évolution du mix énergétique au profit de l'électricité, augmentation de l'activité du secteur tertiaire
Transports	Hausse des émissions	Causes : augmentation du trafic en général, routier en particulier (principal émetteur) pas entièrement compensée par une diminution de la consommation unitaire des véhicules et par une introduction d'une part de « biomasse » dans les carburants (biocarburants dont les émissions de GES sont considérées comme quasi-nulles)
Agriculture	Baisse des émissions	Causes : Tendance à la baisse de l'activité du secteur agricole (cheptel, surfaces cultivables)

Tableau 2 : Tendances générales d'évolution des émissions de GES en Nouvelle-Aquitaine, ces 20 dernières années (d'après l'ATMO Nouvelle-Aquitaine).

CONCLUSION

En valeur moyenne par habitant, la pollution atmosphérique en Nouvelle-Aquitaine est plus élevée qu'en France, notamment au niveau des particules (96 % des épisodes de pollution), du dioxyde d'azote et de l'ammoniac. Les objectifs français de qualité, comme les valeurs guides de l'OMS, sont souvent dépassés en Nouvelle-Aquitaine vis-à-vis des paramètres concernant les particules et, surtout, l'ozone. La plupart des polluants atmosphériques montrent une tendance à la diminution sur ces dix dernières années, sauf pour l'ozone et les composés organiques volatils et semi-volatils. Les pesticides sont présents dans l'air à des teneurs importantes surtout à proximité des zones viticoles et la recrudescence très probable d'invasions d'insectes et de moisissures sous l'impact du changement climatique ne laisse pas présager d'une diminution de l'utilisation des insecticides et des fongicides. Les émissions de gaz à effet de serre (en équivalent CO₂ par habitant) en Nouvelle-Aquitaine sont supérieures à la moyenne française, leur évolution tend vers une diminution depuis près de 20 ans. L'index pollinique en revanche ne cesse d'augmenter.

Bien que climat et qualité de l'air soient intimement liés et qu'il paraisse indispensable que les politiques de gestion des émissions anthropiques prennent en compte ces deux enjeux majeurs, il est extrêmement difficile de les traiter par une seule approche, simultanément [32]. Malgré la littérature scientifique internationale abondante sur la relation « qualité de

l'air/climat », il n'est pas complètement admis que résoudre les problèmes liés à la qualité de l'air ait un impact positif sur le réchauffement climatique, et inversement [32] [80]. Les observations et les scénarios publiés laissent néanmoins envisager une détérioration de la qualité de l'air sous l'effet du changement climatique, dans les prochaines décennies. En Nouvelle-Aquitaine, comme sur l'ensemble des régions qui seront particulièrement impactées par le changement climatique, ce sont notamment des augmentations des teneurs en ozone, composés organiques volatils (et semi-volatils), aérosols, allergènes qui sont les plus probables, ainsi que plus spécifiquement pour cette région agricole, des augmentations des teneurs en insecticides et fongicides.

Il est important de noter que certains éléments de conclusion reposent essentiellement sur des transpositions d'observations issues d'une échelle plus globale, couplées à quelques tendances d'observations régionales et qu'il y a un manque flagrant d'études spécifiques régionales dans ce domaine, malgré l'impact reconnu de cette pollution sur la santé humaine et les écosystèmes [32]. Des mesures spécifiques sur les polluants les plus critiques, réalisées sur des sites d'observation judicieux, sont absolument indispensables si la société civile souhaite obtenir de la part des scientifiques un rapport prévisionnel plus fiable dans les prochaines années.

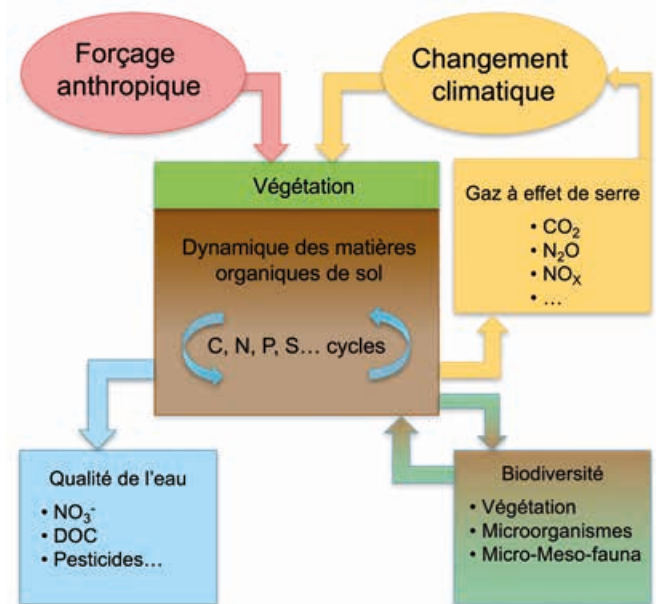


4 LE SOL

INTRODUCTION

Dans de nombreuses régions du Sud de l'Europe, le changement climatique intensifie la pression qui pèse sur les ressources du sol en exacerbant le déclin actuel de la qualité des sols et en pouvant conduire, dans le cas extrême, à la désertification. La Commission européenne a donc récemment adopté une stratégie sur la protection des sols dans le but de garantir que les sols européens restent sains et capables de soutenir les activités humaines et les écosystèmes [81]. C'est pourquoi de nombreux pays européens entendent évaluer la contribution réelle de la protection des sols à l'atténuation du changement climatique, ainsi que, réciproquement, les effets du changement climatique sur la productivité des sols. Malgré un manque notable de données dans ce domaine, ce sous-chapitre donne un aperçu de ce que pourrait induire le changement climatique sur l'épuisement de la matière organique du sol, sur l'augmentation (ou non) de la mobilité vers les eaux des pesticides et des métaux et sur la microbiologie des sols.

environnementales et écologiques des sols comme la fertilité, l'activité biologique et les échanges de gaz avec l'atmosphère ainsi que les pertes *via* lessivage vers l'hydrosphère.



MATIÈRE ORGANIQUE DES SOLS (MOS)

La MOS est l'une des composantes les plus complexes et les plus dynamiques des sols. Il s'agit d'un mélange de résidus végétaux et animaux, d'organismes vivants allant des matières organiques fraîches jusqu'aux matières organiques dégradées en interaction avec la phase minérale (notamment les métaux). La présence des MOS dans les sols est particulièrement importante pour plusieurs fonctions

Figure 12: Impact de forçage anthropique et changement climatique sur la dynamique des matières organiques du sol et flux environnementaux, d'après (82).

Il existe donc une boucle de rétroaction entre les variables d'état du système sol-végétation et les composantes de la biodiversité qui pilotent l'évolution à moyen-long terme du système. La dynamique des MOS et les couplages entre cycles carbone/azote/ autres éléments qui en résultent déterminent l'importance des émissions vers l'atmosphère et vers l'hydrosphère (Figure 12).

Pour le sol en général, du point de vue agricole ou vis-à-vis des écosystèmes, la MOS est importante pour le cycle des éléments nutritifs, la rétention de l'eau et la structure du sol.

Cet ensemble d'interactions est donc au centre de la problématique scientifique de l'infrastructure de recherche du SOERE- ACBB³⁷ [83], ce qui implique à la fois une analyse sur le long terme et une approche résolument pluridisciplinaire afin d'anticiper les risques liés à l'intensification des agroécosystèmes dans le contexte de changements climatiques et particuliers les événements extrêmes.

DES EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE COMPLEXES ET MAL QUANTIFIÉS

Les effets du changement climatique sur les MOS sont complexes et mal quantifiés pour des raisons liées à la complexité des processus éco-systémiques impliqués. En effet, les phénomènes météorologiques extrêmes comme les sécheresses et les inondations, rendent le compartiment MOS plus vulnérable et changent, peut-être irréversiblement, sa nature et sa fonction selon le mode d'usage des sols. Certaines études ont montré que le compartiment MOS est vulnérable au réchauffement climatique et que sa perte potentielle peut amplifier un réchauffement supplémentaire [84].

Parmi les facteurs qui influent sur la décomposition des MOS, la température, l'humidité du sol (teneur en eau) et les apports en carbone de la plante sont parmi les plus pertinents. La théorie prédit que la sensibilité à la température de la décomposition des MOS devrait augmenter à mesure que le degré de complexité du substrat augmente. Comme la majeure partie des MOS est composée de molécules organiques à longue chaîne formées et stockées de longue date, une augmentation de la température devrait affecter avant tout ces anciennes et majoritaires fractions organiques, ainsi que leur stockage. Cependant, les études sur ce sujet sont parfois contradictoires, si bien que les effets de la température sur les différentes fractions des MOS sont encore incertains. Par ailleurs, la plupart des études ont mis l'accent sur les effets de la température ou ceux de l'eau séparément mais pas assez sur l'effet combiné des deux. Enfin, un autre facteur qui doit être pris en considération est l'activité microbienne, c'est-à-dire les compositions et les fonctions des communautés microbiennes impliquées dans la dégradation des MOS.

COMMENT MIEUX APPRÉHENDER LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ?

Pour comprendre les effets du changement climatique sur le compartiment MOS du sol, il faut étudier comment et à quelle vitesse réagira le stock de carbone organique du sol à ce changement. Les rétroactions entre le carbone organique du sol et le climat ne sont pas suffisamment comprises pour répondre à ces questions. L'utilisation de modèles numériques sur le cycle de carbone dans le sol permet toutefois de les explorer, en évaluant les options de gestion et en analysant les stratégies de séquestration du carbone. Il faut noter cependant que ces modèles reposent sur des hypothèses parfois contestées, voire réfutées par des travaux récents de recherche [85] découlant de nouvelles techniques isotopiques, spectroscopiques et moléculaires ainsi que d'expériences sur le terrain à long terme. Une meilleure connaissance des rétroactions entre le climat et l'écosystème passe nécessairement par des programmes de recherche devant porter sur des horizons temporels suffisamment longs et une couverture spatiale suffisamment large [86] [87] (cf. *Webcomplément n° 13 de l'INRA*).

ENGRAIS AZOTÉS

L'azote du sol est un facteur limitant pour la production agricole de nombreux sols et une fertilisation azotée est souvent nécessaire pour augmenter les rendements et soutenir la production alimentaire [88]. Dans l'agriculture d'aujourd'hui, les besoins en azote sont comblés par l'utilisation massive des engrais minéraux malgré les conséquences environnementales qui en découlent notamment sur la présence excessive de nitrates dans les eaux. En effet, seulement 17 % de l'azote provenant des engrais minéraux sont consommés par les humains dans les aliments [89], les pertes sous forme soluble ou gazeuse après application aux sols sont donc importantes³⁸. L'utilisation des engrais minéraux génère des émissions de protoxyde d'azote (N₂O) qui ont été estimées à 2,5 % des doses appliquées [90] faisant de l'agriculture un des plus grands émetteurs de ce puissant gaz à effet de serre en France (cf. *Webcomplément n° 14 de l'INRA*). Les effets du changement climatique sur le cycle de l'azote et, par suite, sur le stockage du carbone dans les sols représentent un besoin majeur de recherche. La réponse des plantes à l'élévation du CO₂ atmosphérique associé aux risques de manque des nutriments, dont l'azote, et comment cela influencera les niveaux des MOS, reste d'autres enjeux majeurs pour la recherche.



37 • SOERE-ACBB : Système d'Observation et d'Expérimentation sur le long terme pour la Recherche en Environnement – Agroécosystèmes, Cycles Biogéochimiques et Biodiversité.

38 • En France, les excédents ont été estimés en 2010 à une moyenne de 32 kg ha⁻¹ de la superficie agricole (cf. chapitre Agriculture). Ces surplus peuvent acidifier le sol, générer des pollutions de l'eau et de l'atmosphère avec un impact négatif sur la santé humaine et l'environnement.

PESTICIDES

LES PESTICIDES DANS LES SOLS

Très peu de données existent sur les concentrations de pesticides dans les sols, car bien que les concentrations mesurées soient significatives après épandage, elles deviennent analytiquement très faibles par la suite.

En effet, ces molécules sont sujettes à une très forte rétention par les sols et plus particulièrement par la matière organique avec une immersion progressive dans les agrégats du sol, les rendant non extractibles chimiquement, donc difficilement analysables. La contamination des eaux superficielles provient majoritairement du ruissellement lors d'épisodes pluvieux importants et celle des eaux souterraines, en général d'un transfert rapide par les macropores ou dans des sols très perméables. Durant ces transferts les molécules peuvent être biodégradées conduisant à un flux de métabolites plus important, plus rémanents et aussi (voir plus loin) toxiques que les molécules mères.

LES ÉLÉMENTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE PEUVENT INFLUENCER LE DEVENIR DES PESTICIDES

En absence d'éléments permettant d'établir comment l'évolution de la microbiologie des sols impactera la mobilité des pesticides (et/ou de leurs métabolites), seuls les effets de la température et des événements pluvieux intenses sont abordés dans ce paragraphe.

Outre l'augmentation des teneurs dans l'air pour les pesticides les plus volatils et l'influence des événements hydriques extrêmes sur leur lixiviation, l'effet direct du réchauffement des sols devrait être négligeable sur le devenir des pesticides dans les sols. Par contre ce réchauffement devrait conduire à une minéralisation plus importante de la matière organique (cf. ci-dessus) et, par suite, à une rétention plus faible des pesticides dans les sols. Cet effet pourrait se faire sentir en grande culture mais pas forcément sur certaines des plus importantes sources de pesticides dans la région Nouvelle-Aquitaine, qui possèdent des teneurs faibles en matière organique (viticulture en général et maïsiculture dans les Landes). Pour les sols viticoles en particulier, la minéralisation des faibles teneurs présentes en matière organique est, de plus, fortement ralentie par la présence importante de cuivre issue de la bouillie bordelaise dans ces sols.

Le deuxième effet du changement climatique pourrait se faire sentir par un accroissement des intensités pluviométriques lors des événements extrêmes. Dans ce cas, il y aurait une augmentation des flux vers les eaux superficielles et éventuellement vers les eaux souterraines en présence de sols avec macropores. Si, outre ces événements, le changement climatique conduit à une plus grande sécheresse en été, cela

ne devrait pas modifier notablement le devenir des pesticides car les pesticides sont déjà très peu mobiles durant cette période.

Finalement et d'une façon plus générale, les objectifs de réduction des pesticides³⁹ et la demande sociétale à ce sujet devraient en fait advenir sur un temps *a priori* plus court que l'évolution climatique. On peut donc espérer que le flux de pesticides vers les sols diminuera significativement d'ici une ou deux décennies, donc sur une période plus courte que les effets potentiels du changement climatique. Cependant des périodes plus sèches sur une partie de l'année peuvent conduire à une exploitation plus intense des ressources en eaux souterraines, comme c'est déjà le cas sur la région bordelaise où un transfert des pompages de l'aquifère éocène plus profond vers l'oligocène plus proche de la surface a augmenté le risque pesticide.

MÉTAUX

LES MÉTAUX DANS LES SOLS

Les sols sont des milieux accumulateurs de métaux, qui proviennent soit du fond géochimique suite à l'altération des roches, soit d'activités anthropiques. Qu'ils soient oligoéléments, tels le cuivre ou le zinc, ou non-essentiels, comme le cadmium ou le plomb, tous les métaux sont toxiques pour les organismes vivants au-delà d'un certain seuil quand ils sont bio-disponibles. Autrement dit, ils doivent être présents sous la forme d'ions libres (Cu^{2+} , Cd^{2+} ...), donc passer en solution, ce qui leur permet ainsi de traverser des membranes biologiques et de s'accumuler dans les organismes vivants.

Dans les sols de Nouvelle-Aquitaine, les concentrations en métaux sont très variables. Du fait de leur substrat géologique, les sols des Landes sur substrat sableux présentent des concentrations très faibles en métaux. En Charentes, les sols sur substrat calcaire ont des concentrations élevées en cadmium (**Figure 13**). Au niveau du seuil du Poitou, les « terres rouges » sont riches en chrome, nickel, plomb et cobalt. À ces teneurs naturelles s'ajoute l'effet de l'usage des sols. Ainsi, les sols viticoles, arboricoles ou maraîchers présentent aujourd'hui des concentrations élevées à très élevées en cuivre (**Figure 13**) du fait de l'usage, depuis plus de cent ans, de la bouillie bordelaise utilisée comme fongicide contre le mildiou.

Les métaux s'accumulent dans les fractions les plus fines des sols (< 2 μm) par exemple par sorption sur les phyllosilicates (rétention des métaux par effet de charge) ou par complexation sur les oxydes de fer ou manganèse. La matière organique des sols est un autre compartiment particulièrement important du fait de sa forte capacité à fixer les métaux, notamment le cuivre ou le plomb.

39 • Les plans nationaux « santé et environnement » prévoient des objectifs de réduction de 50 % des apports de pesticides.

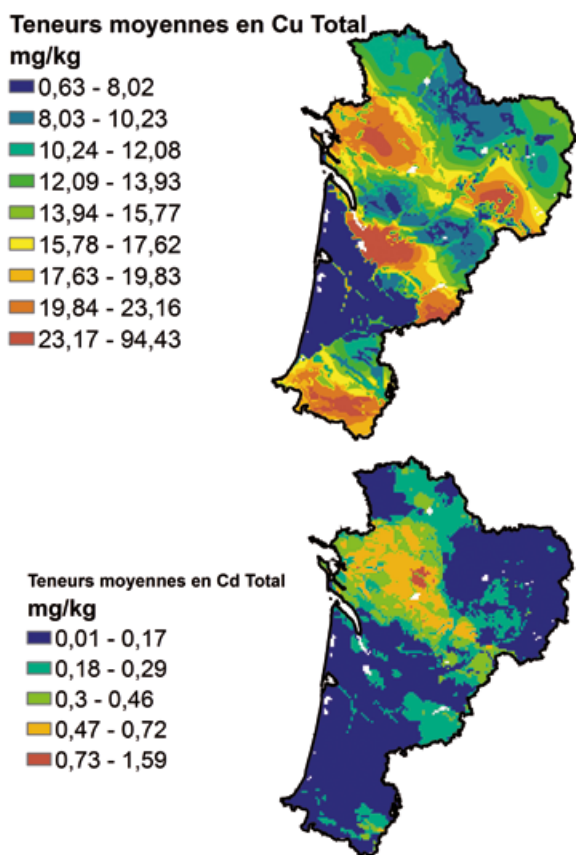


Figure 13 : Cartes des teneurs en cuivre et en cadmium dans les sols de Nouvelle-Aquitaine (91).

LES ÉLÉMENTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE POUVANT INFLUENCER LE DEVENIR DES MÉTAUX

L'effet de la température sur la biodisponibilité des métaux est aujourd'hui mal connu et mal quantifié. Une augmentation de la température du sol peut conduire à augmenter la vitesse ou l'intensité de la minéralisation des matières organiques des sols. Les métaux préalablement fixés seraient alors libérés en solution, ce qui pourrait augmenter leur biodisponibilité. Cependant, si cette minéralisation libère aussi des matières organiques solubles qui complexent les métaux dans la solution du sol, la concentration en ions libres en solution, et donc la biodisponibilité, peut rester stable voire diminuer. Le pH est également un paramètre important, jouant sur la disponibilité des métaux. De manière très générale, en milieu acide les métaux sont plus biodisponibles qu'en milieu alcalin. L'activité biologique, de par la respiration microbienne notamment, peut faire évoluer le pH et jouer ainsi sur la biodisponibilité des métaux.

Les épisodes climatiques extrêmes, tels que des périodes très pluvieuses suivant des sécheresses intenses, conduiront à augmenter l'érosion superficielle et les transferts colloïdaux verticaux⁴⁰, et ainsi à diffuser la contamination métallique, soit vers les

aquifères superficiels, soit vers la profondeur des sols [91]. L'engorgement des sols peut également conduire à la dissolution partielle des oxydes dans des conditions anoxiques (en absence d'oxygène), en libérant les éléments métalliques sous une forme réduite, comme par exemple le fer ou le manganèse.

MICRO-ORGANISMES ET MACROFAUNE DU SOL

La symbiose est considérée comme un mécanisme majeur de l'évolution des espèces, notamment l'association avec les micro-organismes (appelée « microbiome ») qui est particulièrement révélatrice d'un changement conceptuel sur ce qu'est un organisme vivant. Ce changement d'échelle doit être également pris en compte dans le fonctionnement des écosystèmes et plus particulièrement sur les services écosystémiques rendus par la biodiversité. C'est particulièrement crucial pour les agrosystèmes, au vu des enjeux sociétaux actuels (changements globaux incluant les changements climatiques) pour lesquels il convient de trouver des solutions durables⁴¹.



IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR L'ABONDANCE ET LA FONCTION DES COMMUNAUTÉS

De par leur physiologie, leur sensibilité à la température et leurs taux de croissance différents [92] [93] [94], les communautés des sols seront affectées par le changement climatique. Leur abondance relative, leurs fonctions et les rôles qu'elles occupent dans l'écosystème pourraient être modifiés, comme par exemple, pour les groupes microbiens spécifiques qui régulent des fonctions telles que la fixation de l'azote, la nitrification [95], la dénitrification [96] [97] et la méthanogenèse [98].

IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES INTERACTIONS PLANTES-MICRO-ORGANISMES

Les conséquences des interactions entre les plantes, leur communauté microbienne associée et le changement climatique sur les fonctions de l'écosystème sont encore mal comprises [99] [100]. Toutefois, comme les interactions entre les plantes et les communautés du sol sont des « contrôleurs » importants de l'azote et de la dynamique du carbone (exemple des communautés microbiennes associées à la racine [101] [102] [103]), des changements dans la communauté microbienne du sol devrait avoir des effets durables sur l'établissement et l'équilibre du carbone du sol et donc sur les rendements. Par ailleurs, il a été

40 • Transferts verticaux des particules très fines (colloïdales) auxquelles sont associés des métaux.

41 • Le concept émergent d'agroécologie tend justement à analyser la dynamique des systèmes agricoles en prenant en compte les interactions du vivant à différentes échelles spatiales et temporelles pour en améliorer les performances de production et en garantir leur durabilité et leur résilience face aux perturbations.

montré [104] que des changements dans les précipitations altèrent la communauté du sol et sa fonction, mais que cet effet de la précipitation varie selon la plante dont le sol a été prélevé. Enfin, des études récentes suggèrent que les réactions rapides de la communauté des sols environnants peuvent amortir les plantes contre le stress à la sécheresse [105].

INFLUENCE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES INTERACTIONS MICRO-ORGANISMES-MICRO-ORGANISMES

Les micro-organismes forment des réseaux complexes d'interactions qui répondent continuellement aux changements de ressources. Par exemple, les champignons mycorhiziens⁴² peuvent servir à modifier les communautés bactériennes vivantes avec pour conséquence de faire varier le transfert d'azote des mycorhizes à la plante [106] ainsi que la décomposition de la matière organique [107] [108] [109] (cf. Webcomplément n° 15 de l'Université de Poitiers). La hausse des températures conduit à une augmentation de l'attribution du carbone aux organes principaux (que sont les hyphes mycorhiziennes) des champignons colonisateurs des racines des plantes. Cette augmentation peut faire passer l'association mycorhizienne de symbiotique à parasitique [110]. Les changements dans ces interactions entre les mycorhizes et les plantes peuvent provoquer une altération de la composition microbienne du sol [111] [112] et de l'activité [108], avec pour conséquence d'exacerber l'interaction négative ou positive entre la plante et sa communauté associée. D'autres interactions entre les bactéries et les champignons dans la communauté de vie libre sont susceptibles de modifier les fonctions de l'écosystème et les réactions de carbone, mais cela a été moins exploré.

MACROFAUNE

Dans une approche systémique, il convient également de prendre en compte les associations symbiotiques présentes chez les tous les organismes, y compris les animaux [113], présents dans les agrosystèmes. La macrofaune du sol est, dans ce cadre, particulièrement intéressante de par ses impacts sur les cultures et sur l'activité biologique du sol [114]. Ainsi, de nombreux arthropodes, qu'ils soient auxiliaires ou ravageurs, hébergent des endosymbiotes (symbiotes intracellulaires) qui apportent à l'hôte des nutriments essentiels à son développement. En plus de ces symbiotes nutritionnels de nombreux arthropodes sont également infectés par des symbiotes facultatifs ou secondaires qui contribuent également à des traits écologiques majeurs tels que la reproduction [115], la résistance à des ennemis naturels, la capacité d'adaptation à des changements environnementaux ou l'utilisation de ressources particulières [116]. Un exemple intéressant est celui des cloportes qui, à l'égal des vers de terre, constituent d'excellents bio-indicateurs de qualité des agrosystèmes [117 à 119] (cf. Webcomplément n° 16 de l'Université de Poitiers).

CONCLUSION

La hausse de température entraînera notamment une augmentation de l'activité biologique des sols, donc de la minéralisation de la matière organique présente, conduisant à une perte de carbone plus importante⁴³ avec répercussions importantes sur la fertilité des sols et sur l'agriculture, ainsi que de probables effets sur le cycle de l'azote. Par ailleurs, la réponse des plantes à l'élévation du CO₂ atmosphérique peut entraîner des risques de manque des nutriments comme l'azote et le phosphore.



Bien que les objectifs de réduction d'utilisation des pesticides et que la demande sociétale devraient advenir sur un temps *a priori* plus court que l'évolution climatique, des périodes plus sèches sur une partie de l'année pourront conduire à une exploitation plus intense des ressources en eaux souterraines, ce qui induirait l'utilisation de ressources qui peuvent contenir plus de pesticides.

Pour les métaux dont les sols sont des milieux accumulateurs, de par leur complexation aux matières minérales et organiques, les effets de la température sur ces matières risquent d'augmenter la biodisponibilité des métaux, donc la toxicité. L'accroissement de la fréquence des précipitations extrêmes contribuera à augmenter leur mobilité. Enfin, les scénarios climatiques futurs peuvent également affecter les populations microbiennes dans le sol avec beaucoup de conséquences potentielles, y compris la perte du carbone du sol, des changements dans le sol aux niveaux de la production de GES et des modifications au niveau des rétroactions sol-plante avec des retombées importantes sur la fertilité du sol.

Globalement, l'évolution de la qualité du sol naturel sous l'impact du changement climatique associée au concept de production agricole durable et sécuritaire reste un domaine qui présente encore de nombreux enjeux majeurs pour la recherche, afin notamment :

- de mieux préciser les niveaux des matières organiques des sols et leur impact sur le stockage du carbone ;
- de trancher entre le scénario de la bombe à retardement « métaux » ou celui de la stabilité de ces contaminants ;
- de mieux comprendre l'ensemble des interactions entre faune, microbiome et plantes, notamment les impacts des interactions sol-microbes sur le changement climatique et sur le cycle du carbone par rapport aux modes d'usages des sols.

42 • La mycorhize est une association symbiotique entre des champignons et les racines des plantes.

43 • On estime que la canicule que l'Europe a connue en 2003, avec des températures de parfois 6 °C supérieures aux moyennes, a entraîné la libération de jusqu'à deux fois le montant annuel des émissions de carbone produites par la combustion de carburants fossiles.

5 CONCLUSION

La recherche en physico-chimie analytique de ces trois dernières décennies (à laquelle les équipes de la Région Nouvelle-Aquitaine ont largement contribué) a conduit au développement d'outils tellement sensibles que des ultratrace de polluants chimiques peuvent être aujourd'hui quantifiées, quel que soit le milieu étudié. C'est un atout considérable que les agences et autres organismes en charge du contrôle de l'état des milieux naturels ont mis à profit pour mesurer la pollution (tant dans le biotope que dans la biocénose), même si parfois la communication médiatique qui en découle oublie de relativiser les très faibles échelles de concentrations mesurées. C'est aussi grâce à la recherche en général que les origines de cette pollution (impact des activités anthropiques sur la pollution et réciproquement), les mécanismes d'évolution des polluants dans le milieu naturel, leurs effets écotoxiques et sur la santé humaine... sont globalement connus. C'est ce qui a permis de définir des seuils, normes et autres objectifs à ne pas dépasser ou à atteindre, ainsi que de mettre en œuvre des politiques et des moyens de prévention et de lutte.

Les milieux naturels de la région Nouvelle-Aquitaine, comme dans toutes les régions françaises, sont plus ou moins contaminés par différents polluants. Cette pollution est bien sûr spécifique au milieu considéré et dépendante des zones géographiques (urbaines ou rurales) ainsi que des activités s'y pratiquant (urbanisation intensive, transport, industrie, grandes cultures, viticulture...). On incite le lecteur à se reporter aux conclusions des parties « Eau » et « Air » traitées dans ce chapitre pour plus d'informations sur l'état actuel de ces deux milieux ; les données sur la pollution des sols étant en nombre trop faible pour évoquer précisément leur état sur l'ensemble de la région.

Dans ce domaine des milieux naturels, les efforts nationaux et régionaux en matière de prédiction des impacts du changement climatique portent principalement sur l'augmentation de la température de l'air, la diminution des ressources en eau disponibles, les événements climatiques et hydrologiques extrêmes, l'érosion côtière, la productivité agricole, etc. au sujet desquels la société civile est souvent alertée. On oublie trop souvent d'évoquer les retombées sur la qualité des milieux. On se doute bien que le changement climatique avéré aura des impacts sur cette qualité, puisque certains effets sont déjà visibles, en particulier dans le domaine de l'eau douce superficielle (augmentation de la température, évolution des espèces aquatiques, développement de micro-organismes de type cyanophycées, diminution des débits des cours d'eau et de la dilution des polluants, eutrophisation...) ou de l'air (augmentation de l'index pollinique, effets sur la santé publique, etc.), et que d'autres sont prévisibles, même si non réellement démontrés *in situ* en région (modification de la matière organique des sols, augmentation des teneurs en polluants dans les eaux souterraines, augmentation de l'écotoxicité des milieux aquatiques superficiels, augmentation de la concentration en ozone, des composés organiques volatils et des aérosols dans l'air...). Pour plus de détails, le lecteur se reportera aux conclusions de chaque partie de ce chapitre (eau, air, sol), ainsi qu'à celles d'autres chapitres de cet ouvrage, notamment sur la disponibilité des ressources en eau, la santé et l'agriculture.

Il a été demandé à certains collègues hors région Nouvelle-Aquitaine de relire attentivement ce chapitre sur la qualité des milieux et de donner des avis en suggérant des améliorations, ce qu'ils ont fait et ce dont nous les remercions vivement. Il a été, bien sûr, tenu compte de leurs principales suggestions dans la rédaction finale. Il est toutefois intéressant de mentionner ici que leur première impression générale (que nous partageons en partie) était que ce chapitre s'efforce d'avancer dans un secteur insuffisamment connu tant les modifications, liées au changement climatique, des pollutions (sources, types, évolutions naturelle et provoquée...) et de leurs effets (notamment toxiques) sont multiples et « enchevêtrés ». Cet enchevêtrement rend difficile la mise en place d'une stratégie cohérente et pertinente pour agir efficacement en faveur de la qualité et peut, en outre, morceler les responsabilités, source d'inactions. Faute de vision globale et systémique malgré le potentiel régional important en recherche, le risque à éviter est de ne pas pouvoir répondre aux questions « où est l'ennemi ? » et « où sont les responsabilités ? ». En d'autres termes, un besoin de recherche appliquée au « terrain » de la Nouvelle-Aquitaine est indispensable pour évaluer plus clairement les impacts du changement climatique sur la qualité des milieux, les adaptations à préconiser et les enjeux environnementaux et socio-économiques qui en découleront. Quelques exemples sont cités dans le corps du chapitre. Cette connaissance territoriale est obligatoire, sous peine de ralentir, voire de fausser, tous les plans d'adaptation, d'aménagement du territoire et d'optimisation des usages de l'eau et des sols dans le contexte du changement climatique.