

Comité scientifique et technique GENEM

Gestion des éléments nutritifs et des émissions vers les milieux



Avis du Comité scientifique et technique (CST)

« Gestion des éléments nutritifs et des émissions vers les milieux »

Avis et recommandations concernant l'intégration de l'effet du changement climatique dans la mise en œuvre de la Directive « Nitrates » en France et en particulier dans les programmes d'actions « Nitrates »

26 juin 2025

I – Contexte

La directive 91/676/CEE dite directive « Nitrates » a pour objectif la lutte contre la pollution diffuse par les nitrates d'origine agricole et l'eutrophisation et les risques d'eutrophisation. Elle prévoit une surveillance des masses d'eau à une fréquence quadriennale, la désignation de zones vulnérables aux nitrates et la mise en place de programmes d'actions « Nitrates » dans ces zones. Ce zonage et les programmes d'actions associés sont réexaminés tous les quatre ans à l'aulne des résultats de la campagne de surveillance et le cas échéant révisés.

En France, la surveillance a lieu une année tous les 4 ans, le programme d'actions est défini au niveau national et décliné au niveau régional. Les captages dont la teneur en nitrates est supérieure à 50 mg/L, ou comprise entre 40 mg/L et 50 mg/L en tenant compte de l'évolution de cette teneur au cours des dernières années, sont désignés comme « zones d'actions renforcées » au niveau régional.

Lors de la réunion de septembre 2021 du groupe européen d'experts « Nitrates », la Commission européenne a invité le JRC¹ à présenter ses travaux en cours sur les sécheresses estivales qu'a

¹ JRC : Joint Research Centre, Centre commun de recherche de la Commission européenne.

Le Comité scientifique et technique (CST) « Gestion des éléments nutritifs et des émissions vers les milieux » (GENEM) est un groupe d'experts indépendants réuni sous l'égide des ministères en charge de l'Agriculture et de l'Environnement. Il est constitué, par ordre alphabétique, de : Magalie BOURBLANC, Luc DELABY, Jean-Louis DROUET, Anaïs DURAND, Sylvain FORAY, Nadine GUINGAND, Melynda HASSOUNA, Christine LE SOUDER, David LEDUC, Charlotte LEPITRE, Laurence LOYON, Raymond REAU, Julien TOURNEBIZE, Christophe VANDENBERGHE.

connues l'Europe ses dernières décennies. Elle a souligné l'importance du changement climatique sur le cycle des nutriments et a demandé aux États membres de mieux intégrer le changement climatique dans la mise en œuvre de la directive « Nitrates ». Elle a souligné la nécessité d'appliquer le principe de précaution et de réfléchir aux mesures politiques possibles au regard de l'augmentation prévisible de l'occurrence de phénomènes météorologiques extrêmes. La Commission a engagé un recensement des mesures et bonnes pratiques mises en œuvre par les États membres et a programmé un nouveau temps d'échange sur le sujet.

L'objectif premier de la Commission européenne semble être avant tout que les mesures prises dans le cadre des transpositions nationales de la directive « Nitrates » évoluent autant que nécessaire de façon à permettre de garantir, dans un contexte de changement climatique, l'objectif de limiter les pertes de nitrates d'origine agricole dans le milieu aquatique par lixiviation. Son approche est plutôt celle de l'intégration du changement climatique dans chaque réglementation nationale « Nitrates », sous l'angle de *l'adaptation au changement climatique* (accroissement de l'occurrence des phénomènes extrêmes, réchauffement global). On peut également le voir selon le prisme de *l'atténuation*, dans la mesure où les mesures visant à réduire les pertes de nitrates d'origine agricole peuvent aussi permettre, pour certaines, de réduire les émissions de GES.

Certaines dispositions de la déclinaison française de la directive « Nitrates » concourent déjà à la prise en compte du changement climatique (adaptation et/ou atténuation) dont notamment :

- le nouveau dispositif de flexibilité agro-météorologique introduit dans le PAN 7 ;
- la mesure spécifique imposant la couverture des sols en interculture (non-obligatoire au titre de la Directive « Nitrates » mais mise en œuvre en France) ;
- la mesure de gestion équilibrée de la fertilisation azotée basée sur un historique des rendements de chaque exploitation.

II – Questions posées

Quels sont les effets du changement climatique sur la lixiviation des nitrates d'origine agricole ? Quelles problématiques cela pose-t-il pour les mesures du programme d'actions « Nitrates » dans une perspective d'adaptation au changement climatique (pour garantir la poursuite des objectifs de la directive) en premier lieu et d'atténuation en second lieu ?

Quelles sont les recommandations du CST sur les pistes d'évolutions des mesures du programme d'actions à envisager et sur le besoin d'étude associée le cas échéant et les méthodologies associées ?

III – Avis du CST GENEM

La réponse du CST aux questions posées est organisée en trois parties :

- une analyse succincte de l'état de l'art sur les effets du changement climatique sur la lixiviation des nitrates d'origine agricole et les lacunes éventuelles ;
- l'avis et les recommandations du CST sur les problématiques que le changement climatique pose pour la réglementation « Nitrates » française et plus spécifiquement pour chaque mesure du programme d'actions national, en termes d'adaptation des mesures au changement climatique et aussi, dans une moindre mesure, d'atténuation des émissions vers les milieux ;
- des recommandations générales du CST allant vers une transformation systémique de la réglementation « Nitrates ».

1. Etat de l'art sur les effets du changement climatique sur la lixiviation des nitrates d'origine agricole et lacunes éventuelles

1.1. Tendances climatiques

Les principales hypothèses d'évolution du climat (ex : IPCC, 2022 ; Devot et al., 2023 ; Soubeyroux et al., 2025 dans le cas particulier de la France) indiquent une augmentation moyenne des températures (de 1°C, 2°C, voire davantage par rapport à l'ère pré-industrielle) et des concentrations en CO₂ à la surface du globe dans les prochaines décennies, avec des différences régionales marquées telles que i) une augmentation des précipitations (et de l'humidité) aux latitudes boréales et tempérées du nord de l'Europe et dans les régions montagneuses, ii) une diminution des précipitations aux latitudes tempérées et subtropicales du sud de l'Europe, avec des températures extrêmes et de graves sécheresses, ou encore iii) des chaleurs extrêmes et davantage de fortes précipitations en Europe centrale, comme cela a déjà pu être constaté, notamment en France métropolitaine récemment en 2023 et 2024. De récents travaux vont même jusqu'à montrer que les extrêmes météorologiques seraient sous-estimés par les modèles de prévisions climatiques actuels (ex : Vautard et al., 2023 ; Kornhuber et al., 2024), avec de grandes incertitudes sur les fréquences de chaleur estivale en Europe. Vautard et al. (2023) recommandent notamment d'être prudent dans l'interprétation des projections climatiques des extrêmes de chaleur en Europe occidentale, en vue de l'adaptation aux vagues de chaleur.

Les recherches sur l'évolution du climat mettent aussi en évidence que tous les climats et tous les systèmes de production seront affectés, non seulement par l'évolution des conditions climatiques moyennes, mais aussi par leurs variations spatiales et temporelles qui vont

s'accroître avec la survenue de plus en plus fréquente d'évènements extrêmes (ex : canicules et sécheresses, précipitations abondantes et inondations, tempêtes) et d'aléas météorologiques dont la localisation et l'étendue spatiale restent par définition imprévisibles au-delà de quelques heures ou quelques jours en l'état actuel des connaissances. Il en résulte que les prévisions locales et régionales des différents facteurs météorologiques sont hautement incertaines et que la nature et l'ampleur de l'impact du changement climatique sur les systèmes de production varieront en fonction de la capacité de ceux-ci à s'adapter, évoluer et se transformer pour éviter des chutes de rendements pouvant aller jusqu'à la perte totale des récoltes en cas d'aléa météorologique subi et intense (ex : tornade, inondation, grêle, incendie). En particulier, l'eutrophisation, résultant en partie de la lixiviation des nitrates, apparaît comme un phénomène multiforme, caractérisé à la fois par la chronicité, l'existence d'épisodes de crises et de points de basculement, qui oblige à repenser les formes traditionnelles de lutte contre les problèmes environnementaux (Pinay et al., 2017). La littérature scientifique citée par ces auteurs avance « l'idée majeure que les réponses apportées seront intégrées et systémiques, c'est-à-dire prenant davantage en compte la nature et la multiplicité des interactions et rétroactions entre changements sociaux et politiques d'une part, et changements écologiques d'autre part ». Ces auteurs ajoutent que la « spatialisation et la temporalité des processus socio-écologiques concernés obligent en effet à déconstruire un mode de pensée linéaire et de simple causalité ». Plusieurs travaux menés dans les années 2010 indiquent aussi déjà la nécessité de reconcevoir les systèmes de culture et de réorganiser en profondeur l'activité agricole pour obtenir des progrès significatifs en termes d'impacts environnementaux (ex : Justes et al., 2012 ; Peyraud et al., 2012).

Les changements climatiques obligent déjà à modifier les stratégies de conduite des cultures et cette tendance va être amenée à se renforcer, par la mise en œuvre d'approches systémiques et de gestion intégrée dans les exploitations agricoles, les paysages et les territoires, visant à augmenter la résilience des systèmes de production face au changement climatique. Ces approches systémiques et intégrées peuvent être déclinées de différentes manières, en considérant :

- les flux de matières azotées, avec une plus grande cohérence entre les différentes politiques sur l'azote : directive et réglementations « Nitrates », mesures de protection de la biodiversité et directive habitats, politiques de qualité de l'air et d'atténuation des émissions d'ammoniac, politiques climatiques d'atténuation des émissions de N_2O ;
- les échelles d'espace emboîtées : parcelle (émissions directes par transfert vertical des nitrates i.e. lixiviation, remontées capillaires), paysage/bassin versant, petite région agricole, région (émissions indirectes par transfert horizontal i.e. ruissellement, transfert des nitrates par voie hydraulique dans les eaux de surface et les nappes souterraines) ;
- les filières à l'échelle territoriale, avec la redéfinition de leur structuration en prenant en compte l'ensemble de la chaîne de valeur et les acteurs associés dans les territoires

(économiques, sociaux et académiques) et entre les territoires pour, par exemple, les échanges de matières entre les territoires (ex : effluents d'élevage, productions végétales pour l'alimentation animale).

1.2. Effets du changement climatique sur la lixiviation des nitrates

Plusieurs études plus ou moins récentes (ex : Stuart et al., 2011 ; Kløve et al., 2014 ; Aslam et al., 2018 ; Amanambu et al., 2020 ; Dao et al., 2024) ont montré des effets directs du changement climatique, notamment par l'augmentation des températures et des variations des régimes de précipitations, ainsi que des effets indirects dus aux actions anthropiques, notamment les changements d'occupation des terres (ex : modifications des systèmes de culture ; changements d'allocation des terres entre cultures alimentaires, fourragères, énergétiques ; conversion des paysages semi-naturels en terres agricoles), sur la qualité des eaux de surface et des aquifères. Les tendances climatiques (cf. Section 1.1) vont aussi se caractériser par une augmentation de la variabilité spatiale et temporelle des événements météorologiques, avec des fortes incertitudes lors de la survenue d'aléas météorologiques et d'événements extrêmes, sur la lixiviation des nitrates et leurs conséquences sur les flux de nitrates dans les eaux souterraines. Dans les régions tempérées, en plus du réchauffement généralisé, de nombreux changements sont projetés avec beaucoup de nuances géographiques et de grandes incertitudes (Pinay et al., 2017). L'intensité et la saisonnalité des précipitations seront impactées, ce qui aura des conséquences sur les modalités de transfert des nutriments. Par exemple, des pluies plus violentes pourront augmenter l'érosion, les transferts terrestres et *in fine* la charge de nutriments vers les milieux aquatiques. À l'inverse, de plus longues périodes sèches affaibliront les débits estivaux, augmentant la part de la contribution des aquifères plus chargés en nutriments aux cours d'eau (Pinay et al., 2017). Par ailleurs, Peyraud et al. (2012) suggèrent de mieux prendre en compte la sensibilité des milieux pour redéfinir des zonages écologiques, en se fondant sur le concept de « charge critique² ». Cette approche permettrait de définir un zonage écologique du territoire à partir d'une évaluation des capacités internes du milieu à faire tampon ou à absorber la pression exercée par l'azote. Ces auteurs indiquent que la notion de charge critique semble adaptée aux situations où la variabilité géographique des dommages implique une différentiation géographique des politiques environnementales. En ce sens, le CST suggère de réouvrir le dossier « charge critique » qui avait été initié lors du précédent mandat du CST, puis abandonné, mais qui pourtant présenterait tout son intérêt dans la recherche de voies possibles de réduction de la lixiviation des nitrates dans un contexte de changement climatique.

² La charge critique correspond à la quantité maximale d'azote que le territoire peut recevoir tout en limitant les impacts environnementaux à un niveau jugé acceptable de fuites d'azote qui prennent en compte la vulnérabilité du territoire et les impacts à plus grande échelle (Peyraud et al., 2012).

Avis du Comité scientifique et technique
« Gestion des éléments nutritifs et des émissions vers les milieux »

Ces différentes études mettent en évidence la complexité des effets du changement climatique sur les flux et les concentrations en nitrates, impliquant de nombreux facteurs intervenant en synergie ou en antagonisme :

- les actions anthropiques dont des actions biotechniques (ex : pratiques agricoles telles que l'occupation des sols ou l'irrigation) et des actions socio-économiques (ex : réglementations, subventions) ;
- les processus biophysiques tels que l'absorption de nitrates par les racines, la métabolisation par la photosynthèse, la biotransformation et les émissions de gaz azotés vers l'air (ex : volatilisation de NH_3 , émissions de N_2O et de NO_x) et depuis l'air (ex : fixation de N_2 par les légumineuses, absorption de NH_3 par voie foliaire), la minéralisation des différentes formes d'azote organique dans le sol, la recharge des nappes, la lixiviation et les transferts de nitrates vers les eaux souterraines... ;
- les variables biophysiques (ex : structure et texture du sol, température et humidité du sol).

Les processus individuels ont été bien étudiés depuis de nombreuses années, mais leur impact global sur la lixiviation des nitrates reste encore difficile à évaluer. Quelques travaux ont été menés pour tenter d'établir un lien direct entre le changement climatique et les concentrations en nitrates, et ont montré que l'impact net est différent selon les régions. Par exemple, la lixiviation des nitrates est réduite dans les régions où la production agricole diminue en raison de l'augmentation des sécheresses ou des inondations, et est augmentée dans celles où le changement climatique entraîne une augmentation des surfaces agricoles et des modifications des systèmes de culture. Les incertitudes majeures sur ces impacts montrent la nécessité de disposer d'options d'adaptation solides indépendamment des impacts réels du changement climatique, afin d'augmenter la résilience des systèmes de production. Les mesures à mettre en œuvre devront tenir compte des caractéristiques environnementales, technologiques, économiques, institutionnelles et culturelles des régions de production, c'est-à-dire, en d'autres termes, mettre en œuvre des approches systémiques.

De manière générale, ces études mettent en évidence la nécessité d'engager des travaux plus approfondis pour évaluer les effets du changement climatique sur le devenir des polluants dans les eaux souterraines. En ce sens, le CST recommande d'engager ces travaux en commençant par effectuer une analyse bibliographique approfondie des effets du changement climatique sur le devenir des nitrates.

2. Problématiques que le changement climatique pose pour la réglementation « Nitrates » française et plus spécifiquement pour chaque mesure du PAN

Cette section est introduite par un rappel i) des mesures du PAN et de leur déclinaison dans les PAR et ii) des principaux éléments issus de l'analyse produite par le CGEDD-CGAAER (2020) sur les PAN/PAR. Elle présente ensuite l'avis et les recommandations du CST sur ces mesures.

2.1. Mesures du PAN et des PAR impactées par le changement climatique

La 7^{ème} génération du programme d'actions national (PAN) en vigueur a été adoptée par l'arrêté interministériel du 30 janvier 2023 et s'applique aux zones vulnérables délimitées (Legifrance, 2011, 2023). Les huit mesures du PAN 7 portent sur :

1. les périodes minimales d'interdiction d'épandage des fertilisants azotés ;
2. les prescriptions relatives au stockage des effluents d'élevage ;
3. les modalités de limitation de l'épandage des fertilisants azotés, afin de garantir l'équilibre de la fertilisation azotée ;
4. les modalités d'établissement des plans de fumure et des cahiers d'enregistrement des pratiques ;
5. la limitation de la quantité maximale d'azote dans les effluents d'élevage pouvant être épandus annuellement pour chaque exploitation ;
6. les conditions particulières d'épandage ;
7. les exigences relatives au maintien d'une couverture végétale minimale pour limiter les fuites d'azote au cours des périodes pluvieuses ;
8. les exigences relatives au maintien d'une couverture végétale permanente le long de certains cours d'eau, sections de cours d'eau et plans d'eau.

Les programmes d'actions régionaux (PAR) précisent les modalités de renforcement des mesures 1, 3, 7 et 8 du PAN 7 dans les régions françaises.

2.2. Analyse des recommandations du CGEDD-CGAAER sur le PAN 6 et de l'OI Eau sur ses adaptations dans les PAR

Dans son rapport de juin 2019, l'OI Eau³ présente un état des lieux des mesures présentes dans les PAR 6, une vue d'ensemble du renforcement des mesures présentes dans le PAN 6 dans les zones vulnérables des différentes régions françaises, ainsi que les réglementations visant à l'atteinte des objectifs de la Directive « Nitrates » et, de manière plus générale, à la préservation des ressources en eau et des milieux aquatiques.

³ OI Eau : Office International de l'eau

Avis du Comité scientifique et technique
« Gestion des éléments nutritifs et des émissions vers les milieux »

Le CST constate une grande complexité des PAR résultant d'une déclinaison du PAN en de multiples cas particuliers correspondant aux spécificités agropéoclimatiques des régions : diversité des cultures avec une grande variabilité dans leurs dates d'implantation, dans les dates de fertilisation minérale et/ou les dates d'épandage des fertilisants organiques... Cette variabilité est liée au système de culture, aux caractéristiques du sol et aux conditions climatiques de la région. L'augmentation de cette variabilité spatio-temporelle va alors entraîner une augmentation des cas particuliers et, par conséquent, une augmentation de la complexité des réglementations régionales dérivées de la réglementation nationale. Le CST recommande de réduire cette complexité en simplifiant la réglementation, notamment par des mesures plus systémiques et transformatrices des systèmes agricoles, comme cela est explicité dans la suite de cet avis.

Dans son rapport de 2020, le CGEDD-CGAAER a produit des recommandations sur les mesures du PAN 6 qui seront impactées par le changement climatique et que l'on peut regrouper en deux grandes catégories.

La première catégorie concerne l'application des réglementations, les procédures de vérification et les modalités de contrôle. Le CGEDD-CGAAER recommande notamment i) d'améliorer le système de vérification des infrastructures de stockage des effluents d'élevage et de détection des incidents, ii) de renforcer le cadre général des contrôles, notamment en développant dans les zones vulnérables une graduation en trois niveaux selon les teneurs en nitrates des masses d'eau et en adaptant, selon ces zones, les mesures du programme d'actions et l'effort de contrôle, et iii) d'améliorer la mise en œuvre des dérogations préfectorales face à des situations exceptionnelles. Une limite majeure à la mise en place de ces dérogations est la survenue de plus en plus fréquente de situations exceptionnelles qui vont entraîner une multiplication des dérogations et une complexification croissante de la déclinaison du PAN dans les régions et de sa mise en œuvre aux échelles locales. A l'inverse, les mesures mises en œuvre dans les PAR sont homogènes au sein d'une même région, alors que les impacts du changement climatique, avec tout ce qu'il inclut en termes d'aléas météorologiques, d'évènements extrêmes et de variabilité spatiale et temporelle au sein de cette même région, peuvent être très hétérogènes au sein d'une même région, et cela d'autant plus depuis le regroupement des régions au 1^{er} janvier 2016. Par exemple, une région telle que la Nouvelle-Aquitaine, très étendue spatialement et présentant une forte variabilité spatio-temporelle des conditions agropéoclimatiques entre le nord de la Vienne et le sud des Pyrénées-Atlantiques est soumise à une réglementation uniforme, alors que les mesures devraient être adaptées en fonction du contexte local. Face à cette complexité qui risque de devenir inextricable, le CST recommande de réfléchir dès maintenant à une évolution du système réglementaire actuel des contrôles, des vérifications et des dérogations vers une plus grande mise en œuvre d'approches systémiques pour l'adaptation des mesures du PAN à l'échelle de territoires ou de zones géographiques

homogènes d'un point de vue agropédo climatique. Une piste pourrait être d'établir un cadre national simple et des réglementations régionales détaillées et adaptées dans chacune des régions. Le rôle de l'administration centrale pourrait alors être de mettre en place des réglementations coordonnées entre les différents niveaux administratifs depuis le cadre national jusqu'aux déclinaisons régionales et locales. Cela nécessiterait de donner davantage d'autonomie aux régions. Les déclinaisons régionales sont d'autant plus justifiées que les trajectoires climatiques seront différentes entre les régions du Nord de la France et celles du Sud, par exemple entre la Bretagne et l'Occitanie. Le développement d'approches systémiques nécessitera de mettre en place des démarches participatives visant à coordonner les acteurs d'un territoire donné (agriculteurs, instituts techniques, chambres d'agriculture, coopératives, Civam, organismes de recherche, gestionnaires des milieux, gestionnaires de l'environnement, citoyens...) et à structurer les filières (responsables de filière, coopératives, transformateurs, distributeurs...).

La seconde catégorie de recommandations du CGEDD-CGAAER concerne la formation, la communication et la diffusion d'informations sur les teneurs en nitrates dans les eaux, avec la mise en place d'un site national de référence doté des fonctionnalités adaptées aux besoins des acteurs des territoires. Ces recommandations, en rejoignant celles sur la mise en place de démarches participatives (cf. plus haut), visent à : i) structurer la production, le partage et la diffusion de connaissances actionnables dans le cadre de la Directive « Nitrates », ii) créer un effet d'entraînement par l'exemple et rendre plus efficaces les programmes d'actions, et iii) ouvrir la possibilité pour des collectifs territoriaux de s'engager sur des objectifs de résultats « Nitrates ». Le CGEDD-CGAAER préconise notamment de rendre plus efficace le déploiement des CIPAN (Mesure 7), rejoignant ainsi les résultats de l'étude menée par Justes et al. (2012).

2.3. Avis et recommandations du CST sur les mesures du PAN impactées par le changement climatique

Cette section présente l'avis et les recommandations du CST sur l'évolution de la réglementation concernant les mesures 1, 2, 3, 7 et 8 du PAN 7. D'une manière générale, le CST partage les recommandations du CGEDD-CGAAER qui devraient permettre de mettre en place des dispositifs plus ciblés et réactifs localement lors de la survenue d'aléas climatiques et d'événements extrêmes. Il recommande de s'assurer, dans un premier temps, de la mise en œuvre effective sur le terrain de la réglementation actuelle.

D'une manière générale, le CST considère qu'il est difficile, voire impossible, d'apporter des réponses simples et clés en main sur l'évolution des mesures du PAN et des PAR compte tenu de l'augmentation attendue de la variabilité spatio-temporelle des facteurs météorologiques, de la survenue d'événements extrêmes et d'aléas météorologiques imprévisibles jusqu'à présent

d'une part et du grand nombre de facteurs biophysiques et socio-économiques intervenant dans la lixiviation des nitrates et plus largement dans les flux d'azote d'autre part. Une étude dédiée serait à mener afin d'identifier précisément, pour chacune des mesures du PAN, l'ensemble des processus sous-jacents à la lixiviation des nitrates, et plus largement aux flux d'azote, affectés par le changement climatique.

Concernant la Mesure 1 d'une part, portant sur les périodes minimales d'interdiction d'épandage des fertilisants azotés, et la Mesure 3 d'autre part, portant sur la limitation de l'épandage des fertilisants afin de garantir l'équilibre de la fertilisation azotée, le CST rappelle que des études sont actuellement en cours pour évaluer les possibilités d'avancer de quelques jours la date de reprise des épandages en sortie d'hiver en fonction des conditions météorologiques (études dites sur la « flexibilité agrométéorologique »). Le CST n'est pas convaincu que de telles études vont permettre de faire évoluer significativement la réglementation compte tenu de la complexité des agroécosystèmes (cf. Section 1), de la variabilité spatio-temporelle des conditions agropédo climatiques et des incertitudes croissantes induites par le changement climatique. Le CST pourra préciser son avis lorsque les résultats finaux de ces études seront rendus. Le CST anticipe que ces résultats pourraient éventuellement faire évoluer la réglementation à la marge, sans garantie de résultats effectifs en termes de réduction de la lixiviation des nitrates. Le CST recommande de réfléchir sans plus tarder à des mesures plus systémiques visant à transformer les systèmes de production pour les faire évoluer depuis des systèmes très spécialisés vers des systèmes plus diversifiés, par exemple de polyculture-élevage dans lesquels la pression sur l'épandage des fertilisants organiques serait moins forte et mieux répartie à l'échelle nationale.

Concernant la Mesure 2, le CST recommande de reconsidérer dès maintenant les prescriptions relatives au stockage des effluents d'élevage, afin d'éviter tout risque de débordement des fosses à lisier et les dérogations d'épandage associées, comme celles octroyées en Bretagne cet hiver. Le CST recommande de réfléchir à la possibilité d'augmenter les capacités des fosses et de les couvrir via un soutien financier au titre de la planification écologique ou de la PAC (ex : PCAE⁴). En effet, l'augmentation des capacités de stockage, ainsi que la couverture des fosses, auront aussi un impact sur les émissions de gaz à effet de serre et d'ammoniac. Une augmentation des capacités de stockage permettra également aux exploitants de s'affranchir des périodes d'interdiction et de favoriser le fractionnement des épandages.

Concernant la Mesure 7 sur le maintien d'une couverture végétale minimale pour limiter les fuites d'azote au cours des périodes pluvieuses, le CST recommande de poursuivre l'application de la réglementation existante sur la mise en place de CIPAN ou de cultures dérobées, sur leurs dates d'implantation et de récolte ou de destruction, ainsi que sur la gestion des repousses.

⁴ PCAE : Plan de compétitivité et d'adaptation des exploitations agricoles.

Avis du Comité scientifique et technique
« Gestion des éléments nutritifs et des émissions vers les milieux »

L'augmentation de la température et de la concentration en CO₂, ainsi que de la variabilité saisonnière de la pluviométrie et du risque d'événements extrêmes, notamment des sécheresses automnales, sont susceptibles d'influer sur l'efficacité « piège à nitrates » des CIPAN (Justes et al., 2012) d'une part, et sur leur effet sur le drainage et donc potentiellement sur la lixiviation des nitrates et la recharge des nappes d'autre part. Ces auteurs indiquent que des simulations utilisant des scénarios de climat futur pourraient être menées pour évaluer ces effets. Ils mettent également en évidence que l'implantation des CIPAN a fait l'objet d'un grand nombre de demandes de dérogations locales qui n'étaient pas toujours objectivées et pour lesquelles la justification climatique n'était pas suffisante.

Comme pour la Mesure 1 et compte tenu des hypothèses sur le changement climatique et de la complexité des systèmes étudiés, le CST recommande, pour la Mesure 7, de poursuivre et d'intensifier les réflexions sur l'élaboration et la mise en œuvre de mesures plus efficaces pour généraliser l'implantation i) de légumineuses en cultures principales et en cultures dérobées permettant de fixer l'azote de l'air et de limiter ainsi l'apport de fertilisants minéraux et l'épandage de produits organiques, et ii) de CIPAN ou de cultures dérobées, de manière à éviter les périodes de sols nus et à limiter les risques de lixiviation en périodes pluvieuses. Ces périodes pluvieuses vont devenir plus fréquentes et plus difficiles à prévoir en raison du changement climatique et des aléas météorologiques, notamment les inondations, avec une plus grande variabilité en termes d'ampleur, d'étendue spatiale et de positionnement temporel, nécessitant désormais une transformation des systèmes de production. Pour limiter significativement les pertes de nitrates, en particulier au cours des périodes pluvieuses, les mesures à mettre en œuvre nécessitent de développer une approche systémique dépassant le cadre strict de la réglementation « Nitrates » et incluant les acteurs des filières de collecte et de transformation des légumineuses dans les territoires. Ces recommandations rejoignent celles formulées pour les Mesures 1 et 3 dans le sens où l'implantation de légumineuses contribuerait à l'autonomie protéique des exploitations agricoles de polyculture-élevage et des territoires.

Concernant la Mesure 8 sur le maintien d'une couverture végétale permanente le long de certains cours d'eau, de sections de cours d'eau et de plans d'eau, le CST recommande de poursuivre l'application de la réglementation. Toutefois, ces couvertures végétales permanentes à proximité des points d'eau, notamment en zones vulnérables, n'ont pas un pouvoir tampon infini et ne peuvent avoir qu'un effet limité sur la lixiviation des nitrates et leur transport vers ces points d'eau. L'efficacité de cette Mesure ne pourra être renforcée que par la mise en œuvre des recommandations formulées précédemment (cf. Sections 1 et 2), à savoir la transformation des systèmes de production.

Les mesures actuelles des PAN, définies à l'échelle de la parcelle et de l'exploitation, ont désormais atteint leurs limites. Pour progresser dans la réduction des pertes de nitrates, il est désormais nécessaire de réfléchir les mesures du PAN s'appuyant sur une reconception des

systèmes de culture et d'élevage, mettant en œuvre des pratiques agroécologiques (ex : Le Foll, 2012 ; Pinay et al., 2017 ; Caquet et al., 2020) : choix des espèces et variétés cultivées ; choix de rotations optimisant l'utilisation des nutriments, alternant dans le temps et dans l'espace des cultures complémentaires, des cultures en mélange, permettant de mieux explorer les ressources du sol en nutriments ; application de fertilisants adaptés aux conditions locales de sols, développement d'inhibiteurs, utilisation d'engrais verts et des résidus de culture contrôlant la libération des nutriments, développement des légumineuses permettant la fixation d'azote atmosphérique, travail du sol simplifié, couverture permanente du sol ; alimentation animale à partir de productions végétales locales ; recyclage des nutriments issus des filières animales... Certaines de ces pistes sont développées en agriculture biologique (Pinay et al., 2017). Une plus grande acceptation de ces pratiques agroécologiques, notamment la diversification des cultures, suppose un déverrouillage du régime sociotechnique qui domine l'agriculture actuelle, organisée autour des cultures dominantes et de la simplification des assolements, ainsi que la promotion de nouveaux débouchés au niveau des filières (Meynard et al., 2013).

Au-delà des échelles de la parcelle et de l'exploitation agricole, les mesures du PAN sont à développer à des échelles plus grandes (bassin versant, petite région, plus grande région ou territoire avec les filières associées), en incluant des mesures d'aménagement de l'espace qui favorisent la rétention des nitrates, et plus largement des nutriments et améliorent la qualité des eaux (Pinay et al., 2017) : préservation, restauration et développement des structures paysagères et de la diversité paysagère, création de zones humides artificielles, afforestation (plantation de forêt), mise en jachère de longue durée, augmentation des surfaces en couvert permanent...

3. Problématiques que le changement climatique pose pour la réglementation « nitrates » de manière plus générale

Cette section est introduite par un rappel des principaux éléments issus de l'analyse produite par l'Autorité environnementale (2023). Elle présente ensuite des recommandations du CST sur l'évolution de la réglementation « Nitrates ».

3.1. Analyse de l'avis de l'Autorité environnementale

L'Autorité environnementale a produit fin 2023 une note délibérée relative aux programmes d'action « Nitrates » qui pointe un certain nombre de limites :

- les évaluations environnementales sont rarement satisfaisantes ;
- la production des PAN successifs est un exercice essentiellement formel et piloté, avec une volonté de continuité des mesures antérieures, voire en-deçà ;

Avis du Comité scientifique et technique
« Gestion des éléments nutritifs et des émissions vers les milieux »

- la faible probabilité que les PAN/PAR 7, sans rupture avec la 6^{ème} génération, permettent d'améliorer la qualité des eaux et de réduire les émissions atmosphériques ;
- le recours à des approches de modélisation n'est toujours pas mise en œuvre, bien que des travaux de recherche aient déjà été développés sur la modélisation intégrée de la cascade⁵/cycle de l'azote dans les territoires (ex : Cellier et al., 2011 ; Billen et al., 2013) ; la modélisation est cependant très utile pour aborder, grâce à son approche systémique de la cascade de l'azote, la complexité des flux et des pertes d'azote, notamment la lixiviation des nitrates ; ces travaux de modélisation se situent dans un contexte plus large d'initiatives scientifiques européennes et internationales qui posent depuis la fin des années 2000 les enjeux de la cascade de l'azote à différentes échelles (ex : The European Nitrogen Assessment (ENA), 2011 ; The International Nitrogen Initiative (INI), The International Nitrogen Network (iN-Net)).

Par ailleurs, l'Autorité environnementale suggère des pistes d'amélioration, voire de refonte en profondeur de ces programmes, telles que :

- l'importance de prendre en compte les caractéristiques géographiques des territoires, notamment les conditions hydrologiques du bassin versant et les particularités des pratiques agricoles ;
- l'analyse et la mise en œuvre de synergies possibles, inexistantes actuellement, entre les PAN/PAR et d'autres plans nationaux, réglementations ou politiques publiques (ex : SNBC, PNACC, PREPA, PTGE⁶) ;
- l'appel à des PAN/PAR vraiment ambitieux et pleinement intégrés dans une véritable stratégie d'ensemble d'amélioration effective des performances environnementales de l'agriculture ;
- la refonte de l'ensemble du processus d'élaboration des PAN/PAR pour améliorer la qualité des eaux, en particulier en s'intéressant à l'ensemble du territoire et pas seulement aux zones vulnérables ;

⁵ L'azote se transforme, au cours de sa circulation dans l'environnement, en diverses formes qui ont des impacts divers sur la santé, les écosystèmes et le climat (Galloway et al., 2003), ce qui a amené Galloway à introduire le concept de cascade de l'azote qu'il définit comme le transfert séquentiel de l'azote dans les systèmes environnementaux et ses conséquences en termes d'impacts (Galloway, 1998). La cascade de l'azote est donc une vision dynamique qui suit l'azote dans les compartiments de l'environnement et qui permet de traduire la complexité du devenir et des impacts de l'azote dans l'environnement. Elle procure un cadre conceptuel dans lequel le rôle de l'azote dans la production alimentaire est relié à ses impacts environnementaux qui deviennent des motivations importantes de l'étude de l'azote. Elle illustre également la nécessité de traiter les différentes questions sous-jacentes de manière concertée, voire intégrée (Oenema et al., 2011 ; Sutton et al., 2011), in Peyraud et al. (2012).

⁶ SNBC : Stratégie nationale bas-carbone ; PNACC : Plan national d'adaptation au changement climatique ; PREPA : Plan national de réduction des polluants atmosphériques ; PTGE : Projet de territoire pour la gestion de l'eau.

- l'intégration d'actions d'intérêt général dans le processus d'élaboration des PAN/PAR, au-delà des actions d'intérêt collectif, celles-ci ayant démontré, en six générations de programmes, leur inefficacité environnementale.

3.2. Avis et recommandations générales du CST

Le CST partage l'avis et les recommandations de l'Autorité environnementale qui rejoignent les recommandations du CST formulées à la suite de l'analyse bibliographique présentée à la section 1 et de l'analyse des recommandations du CGEDD-CGAAER et du rapport de l'OI Eau présentées à la section 2.

Le CST insiste sur la nécessité de réfléchir dès maintenant à une refonte en profondeur des PAN/PAR qui ont été initiés il y a plus d'une trentaine d'années avec la Directive « Nitrates », à une période où le changement climatique commençait à être seulement évoqué (ex : sommet de la Terre, Rio, 1992), alors que son impact sur l'agriculture et plus particulièrement sur la cascade/cycle de l'azote est une réalité bien présente aujourd'hui. Les évolutions des PAN/PAR au cours de ces dernières décennies semblent avoir atteint leurs limites puisque les améliorations proposées dans les générations successives de PAN/PAR ne produisent plus d'avancées significatives en termes d'amélioration de la qualité environnementale des milieux, en particulier les teneurs en nitrates dans les eaux souterraines. En contrepartie, ces améliorations à la marge ont amplifié la complexification des réglementations consommatoires de ressources (matérielles et humaines car consommatoires de temps) et régulièrement contournées par des dérogations.

Le CST recommande de mettre en œuvre dès que possible les outils de modélisation existants pour intégrer et simuler les multiples processus biophysiques sous-jacents à l'effet du changement climatique sur la lixiviation des nitrates, et aussi sur les émissions indirectes de N_2O , contribuant lui-même au réchauffement climatique ; il est à noter que, dans le cas présent, les émissions indirectes de N_2O résultent de la lixiviation des nitrates, puis de leur transport par voie hydraulique vers des zones situées bien en aval des zones de lixiviation (ex : les zones vulnérables, les points d'eau) et de leur possible biotransformation en N_2O . Ces outils de modélisation ont déjà été bien identifiés, par exemple dans Pinay et al. (2017).

Ces auteurs indiquent que, pour les bassins de grandes cultures avec nappes profondes, une approche simplifiée consiste à simuler les flux d'eau à l'échelle annuelle (modèles AnnAGNPS, CREAMS, HYPE) et à utiliser soit un bilan agronomique simplifié des entrées et des sorties, soit des relations statistiques entre types de culture et pertes de nutriments dans le réseau hydrographique. Ces modèles peuvent permettre de simuler des changements de bilans agronomiques, donc des changements observés ou simulés en amont du modèle, mais ils ne peuvent pas prendre en compte des évolutions, car se limitant à des situations d'équilibre.

Avis du Comité scientifique et technique
« Gestion des éléments nutritifs et des émissions vers les milieux »

Dans le cas des petits bassins-versants, les interactions sol-plante-atmosphère-nappe sont représentées par des modèles mécanistes (ex : ANSWER, EUROSEM, KINEROS, MEDALUS, RHEM, RUNOFF, SHETRAN, SWAT, INCA, HSPF, AGNPS, Modcou-STICS, CAWAQS, TNT2) permettant d'évaluer à l'échelle d'un événement pluvieux ou d'une saison différents processus biophysiques (Pinay et al., 2017) : prélèvement par les plantes, minéralisation de la matière organique, nitrification et dénitrification pour l'azote, transferts par ruissellement et par érosion... Ces modèles, très détaillés et utilisant un pas de temps journalier, distinguent généralement les écoulements superficiels et les écoulements souterrains et ont un pouvoir de test d'hypothèses et de scénarios supérieur aux précédents ; ils restent cependant lourds en temps de constitution de la base de données d'entrée, de calcul, et d'exploitation des résultats (Pinay et al., 2017). Des couplages de tels modèles avec des modèles de transfert d'azote par voie atmosphérique ont plus récemment permis de représenter de manière plus intégrée les transferts et transformations de différentes formes minérales et organiques d'azote (ex : NitroScape).

La modélisation intégrée de l'ensemble du cycle de l'azote, bien qu'imparfaite puisque la modélisation n'est qu'une représentation simplifiée de la complexité de la réalité, s'avère un outil puissant pour fournir des éléments d'évaluation quantitative des flux d'azote et de pondération relative des différents processus impliqués ; elle permet ainsi de fournir une évaluation globale de l'impact des pratiques agricoles et du changement climatique sur les flux d'azote, en particulier la lixiviation des nitrates. La modélisation intégrée pourrait ainsi contribuer à améliorer les évaluations actuelles qui sont effectuées soit de manière qualitative à partir de dires d'experts et d'enquêtes de terrain, soit de manière quantitative à partir de mesures ou de modélisations ciblées sur un ou quelques processus individuels, sans tenir compte des synergies et/ou des antagonismes possibles entre les différents processus. Toutefois, les modèles actuels ont été développés pour les systèmes agricoles passés et actuels, et pourraient ne plus être adaptés aux conditions agropédoclimatiques futures qui seront différentes des conditions pour lesquelles ils ont été développés et calibrés. Il en résulte que les réglementations actuelles, basées sur des systèmes agricoles passés ou actuels, ne seront probablement plus valables pour des systèmes agricoles en évolution dans des conditions climatiques fluctuantes. Ces évolutions obligent à reconsidérer la manière de concevoir les systèmes agricoles et les réglementations associées, comme cela a été dit précédemment.

Pour aller plus loin encore, l'intégration de ces modèles biophysiques avec des modèles bioéconomiques capables de simuler les effets multiples des modifications de la répartition spatio-temporelle des cultures, des élevages et des éléments semi-naturels des paysages serait un outil utile pour évaluer des scénarios agri-environnementaux et analyser leurs conditions de succès.

4. Conclusions – Recommandations du CST

Les recommandations du CST sont ici résumées en trois grandes parties résumant les trois parties de la réponse aux questions posées par les ministères.

Elles portent tout d'abord sur l'état de l'art des effets du changement climatique sur la lixiviation des nitrates :

- effectuer une revue bibliographique plus exhaustive sur l'effet des variables météorologiques et des impacts du changement climatique sur les flux de nitrates (et des autres espèces azotées) ;
- effectuer une revue bibliographique sur la complexité des effets du changement climatique sur les flux et les concentrations en nitrates ; de nombreux facteurs interviennent en synergie ou en antagonisme et l'évaluation de l'impact global de l'ensemble des facteurs en interaction peut s'avérer difficile, d'autant plus que les impacts peuvent être différents selon les régions et peuvent comporter de fortes incertitudes ;
- mener une étude dédiée sur chacune des mesures permettant de recenser l'ensemble des processus affectés ; cette étude serait à mener en parallèle ou à la suite de la revue bibliographique plus exhaustive suggérée précédemment ;
- analyser les études menées en régions portant sur les impacts du changement climatique (Pays de Loire, Bretagne, Jura...) et analyser les potentielles études similaires menées en Europe (ex. du Danemark) ;
- analyser les travaux menés sur les impacts du changement climatique sur la gestion de l'eau qui va elle-même impacter la lixiviation des nitrates (ex : Projets de Territoire pour la Gestion de l'Eau (PTGE) ; projets d'équipements pour la gestion de l'eau ; projet Explore2) ;
- effectuer un recensement des nombreuses données existantes, avec toutefois la difficulté de leur accessibilité.

Elles concernent ensuite les évolutions de la réglementation « Nitrates » dans les PAN/PAR :

- mettre en œuvre les recommandations du CGEDD-CGAER sur les mesures des PAN/PAR et s'assurer de la mise en œuvre effective des mesures déjà existantes ;
- poursuivre la mise en œuvre des pratiques clés pour la préservation du climat, des sols et de l'air, et les économies d'énergie (ADEME, 2015), ainsi que des mesures existantes visant à réduire l'émission des précurseurs des composés azotés contribuant au réchauffement climatique (NO_3 et les mesures du PAN et des PAR, NH_3 et les mesures du PREPA, PMPOA et du guide ADEME (2015), et *in fine* N_2O) ;
- mettre en œuvre les démarches de modélisation intégrée de la cascade de l'azote pour aborder la complexité des effets du changement climatique sur la lixiviation des nitrates,

Avis du Comité scientifique et technique
« Gestion des éléments nutritifs et des émissions vers les milieux »

et aller au-delà de mesures basées sur des données « qualitatives », en utilisant des résultats « quantitatifs » issus de la modélisation ;

- analyser, par une approche modélisations-scénarios, l'effet des conditions moyennes (tendances climatiques) et de conditions extrêmes (ex : sur les périodes d'épandage en cas de froid extrême) sur les mesures du PAN, en s'appuyant par exemple sur des approches similaires développées pour étudier l'impact du changement climatique sur notamment la gestion de l'eau (ex : narratifs du projet Explore2) ; ces analyses permettront aussi d'évaluer la part des conditions moyennes et des conditions extrêmes dans la lixiviation des nitrates.

Elles suggèrent enfin des évolutions majeures des PAN/PAR vers des réglementations plus systémiques qui pourraient s'appuyer sur des études prospectives à préciser et à mener :

- suivre l'avis de l'Autorité environnementale ;
- mettre en place des mesures systémiques afin de disposer d'options solides d'adaptation et de résilience des systèmes agricoles ;
- développer le couplage des modèles (et des données) météorologiques, de cultures, de sol... pour aider à l'élaboration des réglementations ;
- développer les systèmes d'alerte permettant de détecter de manière précoce (ex : à partir de données satellitaires) l'arrivée d'évènements extrêmes et d'aléas météorologiques ;
- développer la production, le partage, la diffusion, l'appropriation des connaissances sur le changement climatique et les flux de nitrates ;
- adopter une approche systémique pour intégrer les mesures PAN/PAR dans un plan d'action d'ensemble et engager la transformation des systèmes agricoles pour augmenter leur résilience aux chocs climatiques (évenements extrêmes et aléas météorologiques) ;
- développer des approches/politiques intégrées/systémiques (pas uniquement sur les nitrates) en prenant en compte la cascade de l'azote à l'échelle de l'ensemble du territoire et les caractéristiques géographiques du territoire ;
- développer une stratégie d'ensemble d'amélioration des performances environnementales de l'agriculture, et des synergies entre les politiques publiques/réglementations/plans (ex : PAN/PAR, SNBC, PNACC, PREPA...) ;
- remettre à l'agenda le dossier portant sur la notion de charge critique en azote, initié puis abandonné lors du précédent mandat du CST.

D'une manière générale, le CST recommande de mieux concilier les approches réglementaires, contrôlantes et dérogatoires et les approches systémiques, participatives et pédagogiques impliquant les divers acteurs concernés par la problématique de l'impact du changement

Avis du Comité scientifique et technique
« Gestion des éléments nutritifs et des émissions vers les milieux »

climatique sur les flux de nitrates dans les territoires. Dans un contexte de changement climatique qui nécessite l'acquisition de connaissances et comporte une part d'incertitude, les solutions et les réglementations à mettre en œuvre devront viser à rechercher un équilibre entre l'objectif de performance économique et le renforcement de la robustesse des systèmes agricoles.

5. Références citées dans le document

- ADEME, 2015. Agriculture & Environnement : des pratiques clefs pour la préservation du climat, des sols et de l'air, et les économies d'énergie - Dix fiches pour accompagner la transition agro-écologique. <https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/2909-agriculture-environnement-des-pratiques-clefs-pour-la-preservation-du-climat-des-sols-et-de-l-air-et-les-economies-d-energie.html>
- Amanambu A.C., Obarein O.A., Mossa J., Li L., Ayeni S.S., Balogun O., Oyebamiji A., Ochege F.U., 2020. Groundwater system and climate change: Present status and future considerations. *Journal of Hydrology* 589, 125163. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125163
- Aslam R.A., Shrestha S., Pandey V.P., 2018. Groundwater vulnerability to climate change: a review of the assessment methodology. *Science of the Total Environment* 612, 853-875. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.237
- Autorité environnementale, 2023. Avis délibéré n°2023-115 sur le programme d'action régional nitrates de la région Bretagne 7^{ème} génération, 25 p.
- Billen G., Garnier J., Benoît M., Anglade J., 2013. La cascade de l'azote dans les territoires de grande culture du Nord de la France. *Cahiers de l'Agriculture* 22, 272-81. DOI : 10.1684/agr.2013.0640
- Caquet T., Gascuel C., Tixier-Boichard M. (coord.), 2020. L'agroécologie : des recherches pour la transition des filières et des territoires. Editions Quæ, INRAE (France), 102 p.
- Cellier P., Bleeker A., Breuer L., Dalgaard T., Dragosits U., Drouet J.-L., Durand P., Duretz S., Hutchings N.J., Kros H., Loubet B., Oenema O., Olesen J., Mérot P., Theobald M.R., Viaud V., de Vries W., Sutton M.A., 2011. Nitrogen flows and fate in rural landscapes. In: Sutton M.A., Howard C., Erisman J.W., Billen G., Bleeker A., Grennfelt P., van Grinsven H., Grizzetti B. (eds.), "The European Nitrogen Assessment. Sources, Effects and Policy Perspectives", Chapter 11, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, p. 229-248.
- CGEDD-CGAAER, 2020. Contribution à l'évaluation des programmes d'actions pour la lutte contre la pollution des eaux par les nitrates d'origine agricole Examen de la mise en œuvre de quelques mesures et des dérogations préfectorales. Identification de voies de progrès. 013362-01_rapport-publie.pdf (developpement-durable.gouv.fr).
- Dao P.H., Heuzard A.G., Le T.X.H., Zhao J., Yin R., Shang C., Fan C., 2024. The impacts of climate change on groundwater quality: A review. *Science of the Total Environment* 912, 169241. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.169241
- Devot A., Royer L., Arvis B., Deryng D., Caron Giauffret E., Giraud L., Ayral V., Rouillard J., 2023, Research for AGRI Committee - The impact of extreme climate events on

Avis du Comité scientifique et technique
« Gestion des éléments nutritifs et des émissions vers les milieux »

agriculture production in the EU, European Parliament, Policy Department for Structural and Cohesion Policies, Brussels.

- Directive 91/676/CEE du Conseil concernant la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles, 12/11/1991. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=celex:31991L0676>
- Galloway J.N., 1998. The global nitrogen cycle: Changes and consequences. *Environmental Pollution* 102 (S1), 15-24.
- Galloway J.N., Aber J.D., Erisman J.W., Seitzinger S.P., Howarth R.W., Cowling E.B., Cosby B.J., 2003. The nitrogen cascade. *Bioscience*, 53 (4): 341-356. DOI: 10.1641/0006-3568(2003)053[0341:TNC]2.0.CO;2
- IPCC, 2022. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Summary for Policymakers. In: Pörtner H.O., Roberts D.C., Poloczanska E.S., Mintenbeck K., Tignor M., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., Okem A. (eds.), Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, p. 3-33. DOI: 10.1017/9781009325844.001
- Justes E., Beaudoin N., Bertuzzi P., Charles R., Constantin J., Dürr C., Hermon C., Joannon A., Le Bas C., Mary B., Mignolet C., Montfort F., Ruiz L., Sarthou J.P., Souchère V., Tournebize J., 2012. Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires : conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques. Rapport d'étude, INRA (France), 418 p.
- Kornhuber K., Bartusek S., Seager R., Schellnhuber H.J., Ting M., 2024. Global emergence of regional heatwave hotspots outpaces climate model simulations. *PNAS, Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences* 121 (49), e2411258121. DOI: 10.1073/pnas.2411258121
- Kløve B., Ala-Aho P., Bertrand G., Gurdak J.J., Kupfersberger H., Kvarner J., Muotka T., Mykrä H., Preda E., Rossi P., Bertacchi Uvo C., Velasco E., Pulido-Velazquez M., 2014. Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems. *Journal of Hydrology* 518, 250–266. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.06.037
- Le Foll S., 2012. Déclaration sur le projet agroécologique de la France. Journée « Produisons autrement », 18/12/2012, Paris.
- Legifrance, 2011. Arrêté modifié relatif au programme d'actions national à mettre en œuvre dans les zones vulnérables afin de réduire la pollution des eaux par les nitrates d'origine agricole, 19/12/2011. <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000025001662>
- Legifrance, 2023. Arrêté relatif aux programmes d'actions régionaux nitrates, 30/01/2023. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000047106603>

Avis du Comité scientifique et technique
« Gestion des éléments nutritifs et des émissions vers les milieux »

- Meynard J.M., Messéan A., Charlier A., Charrier F., Farès M., Le Bail M., Magrini M.B., 2013. Freins et leviers à la diversification des cultures. Etude au niveau des exploitations agricoles et des filières. Rapport d'étude, INRA (France), 226 p.
- Oenema O., Salomez J., Branquinho C., Budnakova M., Cermak P., Geupel M., Johnes P., Tompkins C., Spranger T., Erisman J.W., Pallière C., Maene L., Alonso R., Maas R., Magid J., Sutton M.A., van Grinsven H., 2011. Developing integrated approaches to nitrogen management. In: Sutton M.A., Howard C., Erisman J.W., Billen G., Bleeker A., Grennfelt P., van Grinsven H., Grizzetti B. (eds.), "The European Nitrogen Assessment. Sources, Effects and Policy Perspectives", Chapter 23, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, p. 541-550.
- OI Eau, 2019. Analyse des contenus des sixièmes programmes d'actions régionaux « Nitrates ». <https://www.oeau.fr/eaudoc/system/files/34169.pdf>
- Peyraud J.L., Cellier P., (coord.) et al., 2012. Les flux d'azote liés aux élevages, réduire les pertes, rétablir les équilibres. Rapport d'expertise scientifique collective, INRA (France), 527 p.
- Pinay G., Gascuel C., Menesguen A., Souchon Y., Le Moal M., et al., 2017. Eutrophisation. Manifestations, causes, conséquences et prédictibilité. Synthèse de l'Expertise scientifique collective, INRA, IFREMER, IRSTEA, CNRS (France). 148 p.
- Soubeyroux J.M., Bernus S., Dubuisson B., Drouin A., Madec T., et al., 2025. A quel climat s'adapter en France selon la TRACC ? Partie 2. Meteo-France, 46 p. hal-04991790
- Stuart M.E., Goody D.C., Bloomfield J.P., Williams A.T., 2011. A review of the impact of climate change on future nitrate concentrations in groundwater of the UK. Science of the Total Environment 409, 2859-2873. DOI:10.1016/j.scitotenv.2011.04.016
- Sutton M.A., Howard C.M., Erisman J.W., Bealey J., Billen G., Bleeker A., Bouwman L., Grennfelt P., van Grinsven H., Grizzetti B., 2011. The challenge to integrate nitrogen science and policies: the European Nitrogen Assessment approach. In: Sutton M.A., Howard C., Erisman J.W., Billen G., Bleeker A., Grennfelt P., van Grinsven H., Grizzetti B. (eds.), "The European Nitrogen Assessment. Sources, Effects and Policy Perspectives", Chapter 5, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, p. 82-96.
- Vautard, R., Cattiaux, J., Happé, T. et al., 2023. Heat extremes in Western Europe increasing faster than simulated due to atmospheric circulation trends. Nature Communication 14, 6803. DOI: 10.1038/s41467-023-42143-3