

Résumé de la synthèse bibliographique

Grand cormoran dans un marais (Charente-Maritime) © V.Lambert



DREAL Nouvelle-Aquitaine
Direction régionale de l'environnement,
de l'aménagement et du logement

INTRODUCTION

Milieux hybrides entre terre et eau, les zones humides se caractérisent par la présence de l'eau saturant le sol ou en surface au moins une partie de l'année.

Les zones humides regroupent une grande diversité de milieux, pouvant être différenciés selon le type d'habitats (herbiers, vasières intertidales, prés salés, prairies humides, landes humides, roselières, tourbières, forêts alluviales, mares permanentes, mares temporaires, etc...), le type de sol (minéral ou organique) ou encore le type hydrogéomorphologique.

Un certain nombre de fonctions sont assurées par les zones humides (hydrologique, biologique, biogéochimique) auxquelles sont associés des services écosystémiques.

Les sous-fonctions biogéochimiques désignent le rôle important qu'elles jouent dans les cycles du carbone, de l'azote et du phosphore. Les sous-fonctions liées au climat renvoient principalement aux processus aboutissant à l'accumulation

ou à la minéralisation du carbone sous forme de dioxyde de carbone (CO_2), l'oxydation ou l'émission de méthane (CH_4) et la consommation ou l'émission de protoxyde d'azote (N_2O).



Bois marécageux, Léguer (Côtes d'Armor) © A.Dausse



Figure 1 : Sous-fonctions biogéochimiques d'une zone humide liées au climat, adapté de Rapin et al., 2021 - en bleu les sous-fonctions ayant un effet refroidissant sur le climat et en orange les sous-fonctions ayant un effet réchauffant sur le climat.

Les zones humides, "hotspots" du cycle du carbone et de l'azote

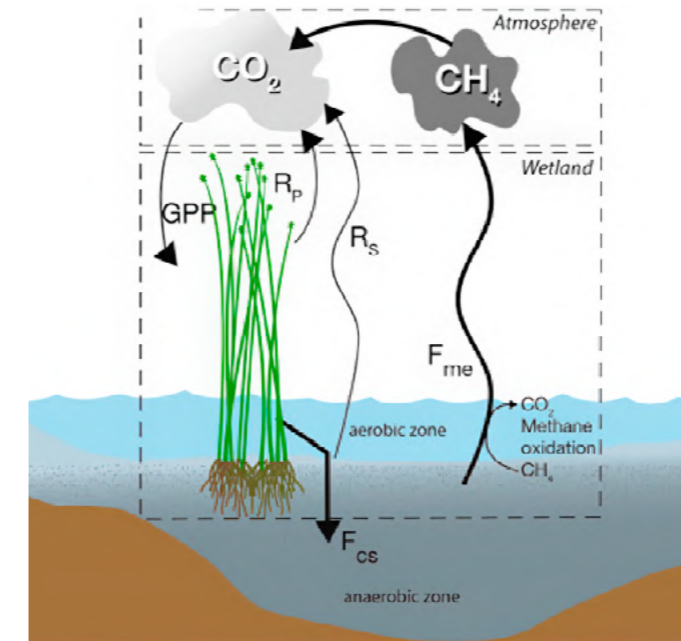


Figure 2 : Représentation simplifiée du cycle du carbone dans une zone humide, GPP = production primaire brute - R = Respiration - Fcs = Flux d'accumulation du carbone et Fme = Flux de méthane (Mitsch et al., 2013).

Les zones humides sont des interfaces clés pour le cycle du carbone et de l'azote et donc pour la régulation du climat au niveau mondial. Elles représentent entre 2 et 8% des surfaces continentales, dont 91% à l'intérieur des terres et 9% en zones côtières. Les zones humides en bon état de conservation sont globalement des puits nets de gaz à effet de serre (GES).

La majorité des gains terrestres de carbone entre 1992 et 2019 sont observés dans les sols et les sédiments anaérobies en particulier les zones humides et les milieux aquatiques. Les zones humides stockeraient environ 25-33% du carbone organique des sols mondiaux. À surface égale, il s'agirait des types d'écosystèmes aux stocks de carbone les plus importants et ayant parmi les plus forts taux de séquestration de carbone. Ces caractéristiques peuvent varier fortement d'un type de zone humide à l'autre. À l'inverse, la production de CH_4 en zones humides correspondrait à environ 25% des émissions totales de CH_4 vers l'atmosphère.

Les zones humides jouent également un rôle déterminant dans le cycle de l'azote au niveau mondial via l'assimilation azotée et la dénitrification. Un abattement moyen de 47% de la charge totale en azote réactif entrant (formes inorganiques réduites, oxydées et formes organiques) est relevé par ailleurs pour tous types de zones humides confondues. Environ 20% de la charge azotée d'origine humaine serait éliminée par les zones humides dans le monde. La dénitrification peut occasionner des émissions faibles de N_2O , le 3^{ème} GES le plus important contribuant au réchauffement climatique après le CO_2 et le CH_4 .

Pourquoi les zones humides jouent-elles un rôle important dans la régulation du climat?

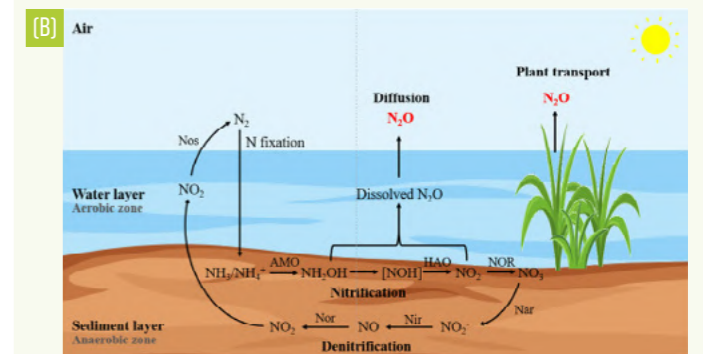
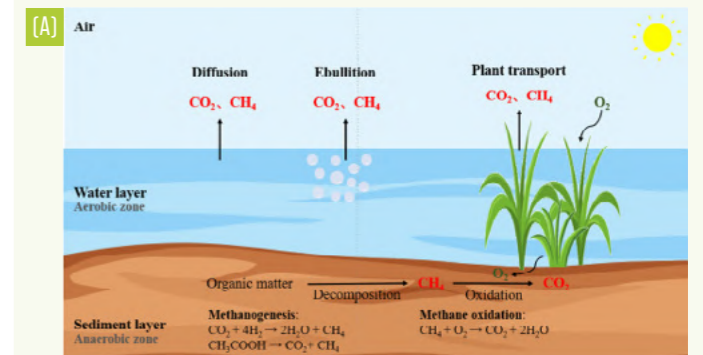


Figure 3 : Flux de GES en zones humides associés à des processus du cycle du carbone et de l'azote (Cao et al., 2024)

Différents processus ayant lieu dans les zones humides et leur environnement proche permettent d'expliquer leur importance vis-à-vis du climat.

La photosynthèse des plantes vasculaires, phytoplancton, micro-algues est la principale porte d'entrée du carbone atmosphérique dans les écosystèmes. La forte productivité de certaines zones humides en fait des milieux à fort potentiel de stockage de carbone. De plus, des zones humides se trouvent souvent sur des points bas topographiques, où convergent des flux de matière et récoltant donc des sédiments et des particules de sol qui s'y déposent. La sédimentation est un processus déterminant d'accumulation du carbone dans les milieux humides recevant des apports de carbone externe notamment dans des contextes alluviaux et côtiers. A l'inverse, des exports de carbone peuvent avoir lieu. 15% de la matière organique transportée par les cours d'eau vers les océans proviendrait des zones humides.



Mégaphorbiaie (Marne) © L.Lucas

Préservation, gestion et restauration des zones humides

Depuis le début du XVIII^e siècle, 20% de zones humides auraient été perdues à l'échelle mondiale (Fluet-Chouinard et al., 2023). Ce constat global masque de grandes disparités avec les pertes les plus importantes situées en Europe (50% de zones humides dégradées) notamment en France (autour de 80%) et en Amérique du Nord, principalement aux Etats-Unis. En France, des travaux antérieurs ont estimé une diminution d'environ 2/3 des zones humides françaises au cours du 20^{ème} siècle, en accord avec la première étude mentionnée au niveau mondial.

Un même type de zone humide peut agir comme une source de carbone ou comme un puits de carbone selon son état de dégradation. Le drainage, en abaissant les niveaux d'eau, induit un bilan GES globalement défavorable au climat du fait de la respiration aérobie accrue et de l'émission de N₂O. L'eutrophisation stimule davantage la décomposition de la matière organique (CO₂, CH₄, N₂O) que son accumulation.

La conversion de zones humides naturelles ou semi-naturelles en terres arables, en aquaculture et en sylviculture représente des pertes nettes de carbone organique du sol et une augmentation des émissions de GES. Les émissions de tourbières dégradées représenteraient l'équivalent du trafic aérien mondial, entre 5-10% des émissions mondiales de CO₂. Les zones humides dégradées sont susceptibles d'émettre davantage de CH₄ et de N₂O que les zones humides en bon état.

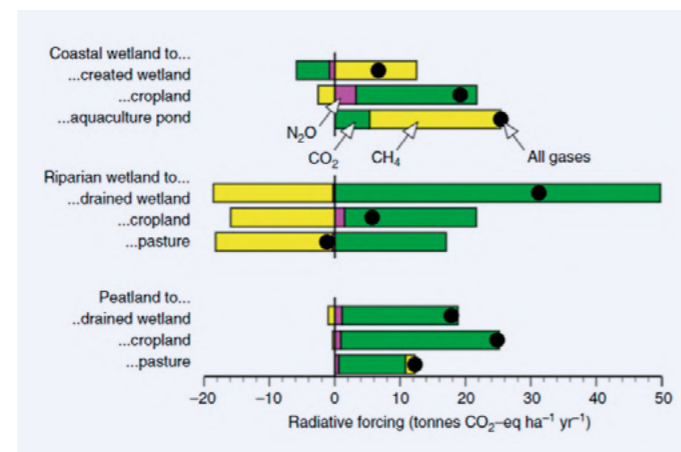


Figure 4 : Contribution du CO₂, du CH₄ et du N₂O au forçage radiatif dû au changement d'usage et d'occupation des sols en zones humides. La couleur violette représente le N₂O, la couleur jaune correspond au CH₄ et la couleur verte au CO₂. Le cercle noir représente le bilan cumulé des trois gaz à effet de serre (Tan et al., 2020 et Krauss et al., 2021).



Marais salé, Pointe du Bendy (Finistère) © A.Dausse

...

Les zones humides se distinguent avant tout par un engorgement plus ou moins prolongé du sol en eau. La concentration en oxygène dans l'eau est plus faible que dans l'air et la diffusion de l'oxygène est environ 1000 fois plus lente dans l'eau que dans l'air. Les micro-organismes aérobies ayant recours à la respiration aérobie participent à la décomposition de la matière organique. Ils ont besoin d'oxygène pour se développer et fonctionner et agissent donc moins efficacement en zones humides. La matière organique peut s'accumuler dans le sol sous forme de biomasse « morte », parfois durant des milliers d'années dans le cas des tourbières.

En revanche, le revers de la médaille est l'émission accrue de CH₄ dans des conditions d'inondation prolongée ou de saturation des pores en eau du sol. Ce processus s'appelle la méthanogénèse et se déroule en conditions anaérobies c'est-à-dire en l'absence d'oxygène. Différents modes de transport du méthane vers l'atmosphère existent : par diffusion, par ébullition et transport par les plantes.

Une partie du CH₄ est consommée par des bactéries aérobies strictes en présence d'oxygène. Elle génère la production de composés carbonés (formaldéhyde) notamment dont une partie est assimilée et une autre fraction conduit à l'émission de CO₂. Ce processus, appelé la méthanotrophie, peut aussi avoir lieu en l'absence d'oxygène de différentes manières.

La décomposition de la matière organique fait intervenir des processus interreliés des cycles du carbone et de l'azote, aussi bien aérobies qu'anaérobies. La dénitrification est réalisée par certaines bactéries anaérobies facultatives.

Ces bactéries ont la capacité de transformer le nitrate dissous en azote sous forme gazeuse tels que le N₂O ou le NO (produits intermédiaires) puis principalement en N₂. Dans certaines conditions, la dénitrification est incomplète et favorise l'émission de N₂O (température élevée, concentration en nitrates élevée, saturation des pores en eau du sol entre 70 et 80%, alternance marquée de périodes de sécheresse et d'inondation, pH acide).

Gestion

Gestion agricole

L'absence de labour apparaît comme une pratique importante pour ne pas davantage dégrader le stock de carbone existant. En effet, l'aération du sol suite au labour accélère la minéralisation de la matière organique et favorise l'érosion du sol qui constitue une perte nette de carbone transporté par l'eau sous forme dissoute et particulaire. L'ajout de biochar, le chaulage, le gypage, l'enfouissement des résidus de culture, les couverts d'interculture, la limitation de l'usage de pesticides pourraient atténuer l'émission de certains GES de zones humides agricoles cultivées.

Les résultats des études concernant l'effet du pâturage sur le carbone du sol sont contrastés, avec de fortes variations selon la localisation, le type de zone humide et le système d'élevage considéré. En revanche, il est admis qu'une intensité élevée de pâturage peut avoir des effets négatifs sur le stockage du carbone et les émissions de GES. La paludiculture, notamment en tourbières, se développe comme une alternative visant à concilier production agricole et de biomasse et préservation des fonctions des zones humides, en particulier celles liées à la régulation du climat.

Gestion sylvicole

L'allongement du cycle sylvigénétique, le recours à des coupes sélectives, la réduction de l'utilisation d'engins mécaniques lourds et le choix de périodes d'intervention adaptées constituent autant de pratiques permettant de limiter les impacts négatifs sur le carbone du sol. L'intensité des éclaircies joue également un rôle déterminant : des éclaircies faibles peuvent avoir un effet positif sur le stock de carbone du sol, tandis que des éclaircies intensives entraînent des effets négatifs. Sous climat tempéré, il est suggéré que la libre évolution (absence de gestion) de milieux ouverts humides vers des milieux forestiers humides entraîne un gain net de carbone.

Gestion de l'eau

La gestion hydrosaline des marais littoraux et rétro-littoraux influence fortement la production de GES. Des émissions élevées de CH₄ sont observées dans les secteurs à dominante d'eau douce, notamment lorsque l'inondation est prolongée ou lorsque des apports estivaux d'eau douce sont maintenus. À l'inverse, les émissions sont plus faibles, voire quasi nulles dans des contextes plus salés. Pour un même type de zone humide, une faible hauteur d'eau génère des émissions de GES plus importantes qu'une hauteur d'eau moyenne à élevée sur une période de suivi équivalente. L'assèchement saisonnier de certaines zones humides, notamment en été, ou la reconnexion avec de l'eau d'origine marine apparaissent ainsi comme des leviers de gestion permettant de limiter les émissions de GES dans les marais littoraux, en cohérence avec la restauration de dynamiques hydrologiques plus naturelles.

Restauration

La restauration de la fonction hydrologique des zones humides continentales implique souvent la réduction des émissions de CO₂ et l'augmentation des émissions de CH₄. Ces émissions de CH₄ peuvent perdurer entre plusieurs mois jusqu'à quelques décennies après intervention. La restauration de zones humides, en grande majorité continentale, conduirait à une augmentation moyenne à court terme de 544.4% de CH₄, une réduction de 62% de N₂O et une réduction à long terme de CO₂ de l'ordre de

138.8% avec des variations importantes selon le type de zones humides.

En revanche, la restauration tidale, par reconnexion à la mer ou effacement de digues, est associée à une diminution des émissions de CH₄ et à une augmentation de la séquestration du carbone, à condition que cette reconnexion soit durable.

Globalement, la restauration des zones humides conduirait à une réduction des émissions de GES comprise entre 43 et 90% par rapport à des zones humides drainées équivalentes.

La restauration des zones humides continentales dégradées permet un gain net par rapport à l'état dégradé mais ne permet généralement pas d'atteindre les taux de séquestration et les stocks de carbone organique observés dans des zones humides intactes de même type. Les stocks de carbone peuvent atteindre environ 50% de ceux de zones humides naturelles de référence entre 10 et 20 ans après restauration. La priorité est à préserver les zones humides existantes et éviter le déstockage de carbone.

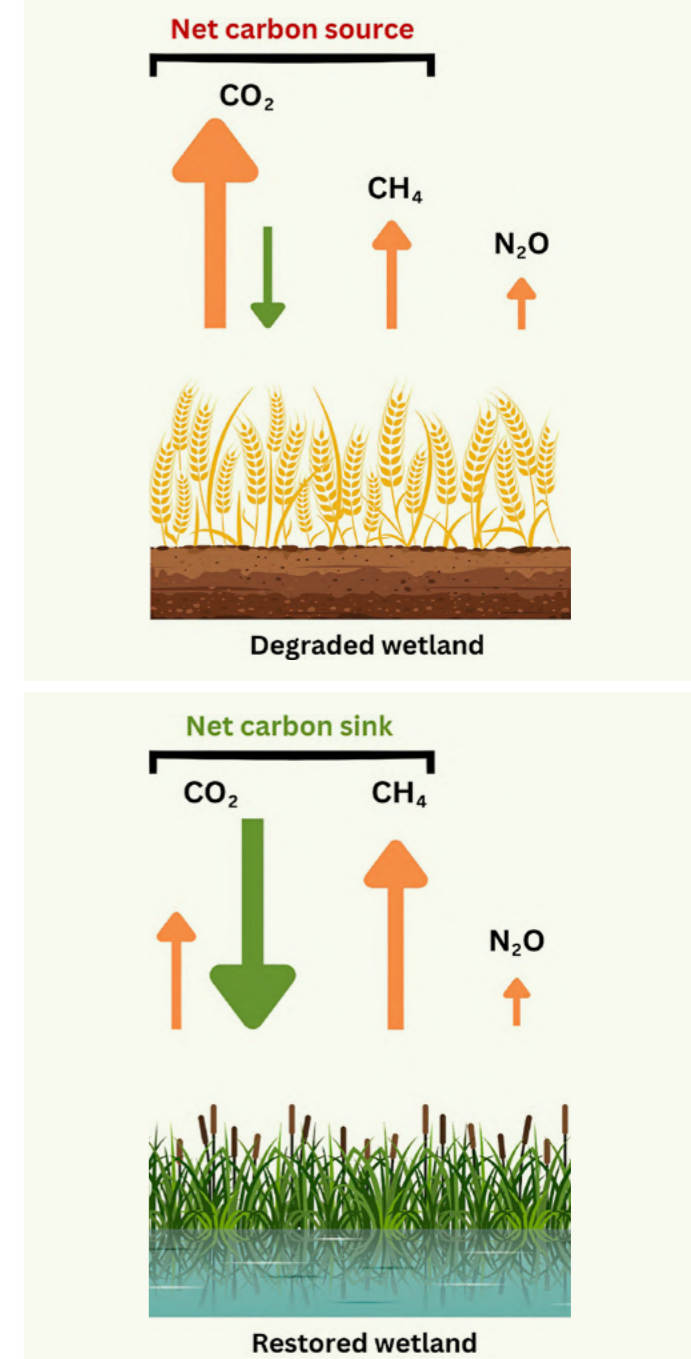


Figure 5 : Schéma simplifié des flux de GES en zones humides dégradées avant et après restauration (Schuster et al., 2024)

Stocks et flux de GES par type de zones humides

Dans le tableau ci-dessous, des caractéristiques climatiques de différents types de zones humides de France Métropolitaine ont été compilées. Elle se base sur une synthèse bibliographique réalisée par le Forum des Marais Atlantiques en 2025. Il s'agit d'ordres de grandeur et de tendances, basés sur des études hétérogènes et portant sur des habitats en bon état de conservation.

Les stocks de carbone ont été considérés sur 100 cm de profondeur. Ils représentent un « patrimoine carbone » à préserver des altérations et de la minéralisation potentielle du carbone accumulé. Les flux de GES ont été considérés par type de zone humide selon le comportement puits (flux négatifs vers les écosystèmes en bleu) ou source (flux positifs vers l'atmosphère en orange). Les flux nets de CO₂ correspondent à l'échange net de l'écosystème ou à la production nette de l'écosystème (différence entre production primaire brute et respiration de l'écosystème). Le taux de séquestration de carbone correspond au retrait net de carbone de l'atmosphère sur le long terme par un stockage dans le sol, les sédiments ou la partie ligneuse de la biomasse aérienne de certaines plantes. L'étendue spatiale correspond aux surfaces approximatives représentées par les différents habitats humides en France Métropolitaine. Pour plus d'informations, se référer à la synthèse bibliographique et aux références mentionnées.

Le bilan GES est issu de l'addition des flux nets de CO₂, de CH₄ et de N₂O à court terme. Il permet de donner une tendance sur la capacité d'une zone humide en bon état à agir comme puits net de GES. Il s'agit d'une version simplifiée de la réalité basée sur la somme des flux verticaux, uniquement calculée sous une même unité en tCO₂ équivalent selon le PRG₁₀₀. Un bilan complet nécessiterait de prendre en compte les flux latéraux notamment les entrées (sédimentation contribuant fortement à la capacité de séquestration de carbone) et les sorties de carbone (carbone organique et inorganique dissous), ainsi que les effets des activités humaines.

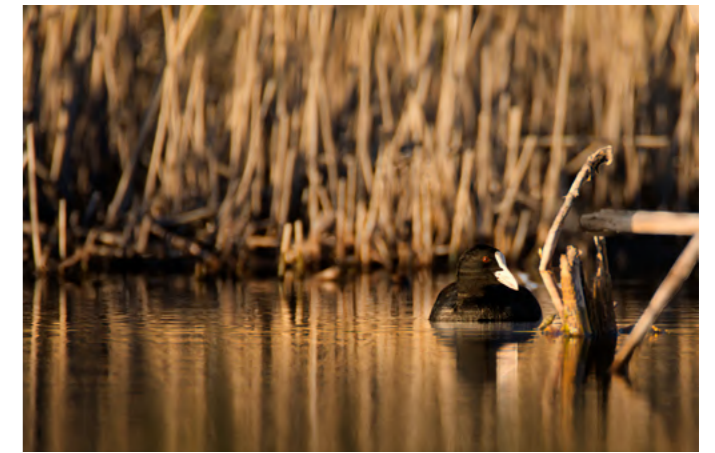
Par ailleurs, une vision trop centrée sur le carbone peut occulter les autres fonctions et services que rendent les zones humides. Les approches systémiques visant à évaluer la multifonctionnalité et les multiples services rendus par les zones humides seraient à privilégier.



Ripisylve (Marne) ©L.Lucas



Mélodie des marais - Gorgebleue à miroir (Charente-Maritime)



Vue discrète des zones humides - Foulque macroule (Charente-Maritime)



Pâturage sur le Marais de Brouage (Charente-Maritime) © Léa Gastal

Stocks de carbone, flux de GES, taux de séquestration et étendue spatiale de types de zones humides en bon état (adapté de Crooks et al., 2011 et Fennessy et Lei, 2018)

Type de zone humide	Stock de carbone	Taux de séquestration du carbone	Flux net de CO ₂	Flux net de CH ₄	Flux net de N ₂ O	Bilan des flux de GES	Etendue spatiale estimée
Herbier intertidal	Faible à modéré	Modéré à élevé	Puits modéré	Source faible à puits faible	Source faible à puits faible	Puits modéré	Faible
Vasière intertidale	Faible à modéré	Modéré à élevé	Puits très élevé	Source faible à puits faible	Source faible à puits faible	Puits très élevé	Moyenne
Pré salé	Modéré	Élevé	Puits élevé	Source faible à puits faible	Source faible	Puits élevé	Faible
Roselières	Faible à modéré	Faible à élevé	Puits modéré à élevé	Source modérée à très élevée	Source faible	Puits modéré	Moyenne
Tourbières tempérées	Très élevé	Faible	Puits faible	Source modérée à élevée	Source faible	Puits faible	Moyenne
Prairie humide	Faible à modéré	Faible à modéré	Puits faible à modéré	Source modéré	Source faible	Puits faible à modéré	Très importante
Landes humides	Faible à modéré	Faible	Puits modéré	Source faible	Source faible	Puits modéré	Faible à moyenne
Forêts alluviales	Élevé	Modéré à très élevé	Puits très élevé	Source faible à modérée	Source faible	Puits très élevé	Importante

DOCUMENTS COMPLETS ET RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bar-On, Y. M., Phillips, R., Rood, M., et al. (2025). Recent gains in global terrestrial carbon stocks are mostly stored in nonliving pools. *Science*, 387 (6740), 1291-1295. <https://doi.org/10.1126/science.adk1637>

Cao, M. et al. (2024). Recent advances on greenhouse gas emissions from wetlands: Mechanism, global warming potential, and environmental drivers. *Environmental Pollution*, 355, 124204. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124204>

Centre National de la Recherche Scientifique. (2022). Tourbières : une bombe climatique à retardement. CNRS Le Journal. <https://lejournal.cnrs.fr/diaporamas/tourbieres-une-bombe-climatique-a-retardement>

Crooks, S et al. (2011). Mitigating Climate Change through Restoration and Management of Coastal Wetlands and Near-shore Marine Ecosystems: Challenges and Opportunities. Environment Department Paper No.121. Washington, D.C., U.S.A.: World Bank.

Crooks, S., Sutton-Grier, A. E., Troxler, T. G., Herold, N., Bernal, B., Schile-Beers, L., & Wirth, T. (2018). Coastal wetland management as a contribution to the US National Greenhouse Gas Inventory. *Nature Climate Change*, 8 (12), 1109-1112. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0345-0>

FAO and ITPS. (2021). Recarbonizing global soils: A technical manual of recommended management practices. Volume 5: Forestry, Wetlands and Urban Soils - Practices overview. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cb6606en>

Fennessy, S.M. et Lei, G. (2018). Wetland Restoration for Climate Change Resilience. https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/bn10_restoration_climate_change_e.pdf

Degos, L., Charrier, B., Dausse, A et Anras, L. (2025). Synthèse bibliographique sur le carbone et les flux de gaz à effet de serre en zones humides. 158 pages.

Fluet-Chouinard et al. (2023). Extensive global wetland loss over the past three centuries. *Nature*, 614, 499-504. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05572-6>

He, T., Ding, W., Cheng, X., Cai, Y., Zhang, Y., Xia, H., Wang, X., Zhang, J., Zhang, K., & Zhang, Q. (2024). Meta-analysis shows the impacts of ecological restoration on greenhouse gas emissions. *Nature Communications*, 15 (1), 2668. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46991-5>

Jordan, S. J. et al. (2011). Wetlands as Sinks for Reactive Nitrogen at Continental and Global Scales: A Meta-Analysis. *Ecosystems*, 14, 144-155. <https://doi.org/10.1007/s10021-010-9400-z>

Krauss, K. W., Zhu, Z., Stagg, C. L et al. (2021). Wetland Carbon and Environmental Management. In *Geophysical Monograph Series* (1re éd.), Wiley, 449 pages. <https://doi.org/10.1002/9781119639305.fmatter>

Ma, S., Mistry, P., Badiou, P. et al. (2025). Factors Regulating the Potential for Freshwater Mineral Soil Wetlands to Function as Natural Climate Solutions. *Wetlands*, 45, 11. <https://doi.org/10.1007/s13157-024-01893-6>

Mitsch, W. J. et al. (2013). Wetlands, carbon, and climate change. *Landscape Ecology*, 28, 583-597. <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9758-8>

Mitsch, W. J. et Gosselink, J. G. (2015). Wetlands. 5th Edition. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken. <https://www.wiley.com/en-gb/Wetlands%2C+5th+Edition-p-9781119019787>

Rapin, A., Fontanel, F. et Chambaud F. (2021). Fonctions hydrologiques, biogéochimiques et biologiques des zones humides. *Éléments de connaissance*. Collection « eau & connaissances ». Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse. 198 pages + annexes. https://www.eaurmc.fr/upload/docs/application/pdf/2021-01/bilan_des_connaissances_zh_-_janvier_2021.pdf

Reddy, K. R., & DeLaune, R. D. (2008). Biogeochemistry of wetlands: Science and applications. 1st Edition, CRC Press; 800 pages. <https://doi.org/10.1201/9780203491454>

Rosentretter, J. A. et al. (2021). Methane and Nitrous Oxide Emissions Complicate Coastal Blue Carbon Assessments. *Global Biogeochemical Cycles*, 35 (2), e2020GB006858. <https://doi.org/10.1029/2020GB006858>

Saunois, M., Stavert, A. R., Poulter, B., Bousquet, P., Canadell, J. G., Jackson, R. B., Raymond, P. A., Dlugokencky, E. J., Houweling, S., Patra, P. K., Ciais, P., Arora, V. K., Bastviken, D., Bergamaschi, P., Blake, D. R., Brailsford, G., Bruhwiler, L., Carlson, K. M., Carrol, M., ... Zhuang, Q. (2020). The Global Methane Budget 2000–2017. *Earth System Science Data*, 12 (3), 1561-1623. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>

Schuster, L., Taillardat, P., Macreadie, P.I. et Malerba, M.E. (2024). Freshwater wetland restoration and conservation are long-term natural climate solutions. *Science of the Total Environment*, 922, 171218. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171218>

Tan L, Ge Z, Zhou X, Li S, Li X, Tang J. (2020). Conversion of coastal wetlands, riparian wetlands, and peatlands increases greenhouse gas emissions: A global meta-analysis. *Global Change Biology*, 26(3), 1638-1653. <https://doi.org/10.1111/gcb.14933>

Villa, J. A. et Bernal, B. (2018). Carbon sequestration in wetlands, from science to practice: An overview of the biogeochemical process, measurement methods, and policy framework. *Ecological Engineering*, 114, 115-128. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.037>

Wu, Y., Zhang, R., MacDougall, A. S., Tian, D., Wang, J., & Niu, S. (2025). Wetland Restoration Is Effective but Insufficient to Compensate for Soil Organic Carbon Losses From Degradation. *Global Ecology and Biogeography*, 34 (5), e70063. <https://doi.org/10.1111/geb.70063>

Yu, L., Huang, Y., Sun, F., & Sun, W. (2017). A synthesis of soil carbon and nitrogen recovery after wetland restoration and creation in the United States. *Scientific Reports*, 7 (1), 7966. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08511-y>

Zhang, Y. et al. (2025). Carbon sequestration potential of wetlands and regulating strategies response to climate change. *Environmental Research*, 269, 120890. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.120890>



2 Quai aux Vivres 17300 ROCHEFORT
Tél. 05 46 87 08 00 • Fax 05 46 87 69 90

www.forum-zones-humides.org • fma@forum-marais-atl.com

Rédaction : Lucas Degos - Forum des Marais Atlantiques
Contributions : Armel Dausse, Loïc Anras, Mélanie Bordier, Christelle Boucard - Forum des Marais Atlantiques

Ce document a été réalisé dans le cadre d'une étude générale et prospective « Carbone et zones humides »
menée en 2025 par le Forum des Marais Atlantiques et financé par l'ADEME, WWF, la CDA de La Rochelle,
le fonds de dotation Naïa Gaïa et la DREAL Nouvelle-Aquitaine.