NOTE D'ORIENTATION

Comment la restauration des zones humides côtières peut-elle atténuer le changement climatique ? Ce que nous savons et ce qui reste encore à éclaircir

© Université du Salento-LIFEWatch ERIC

MESSAGES CLÉS

- **La restauration des zones humides côtières est une Solution fondée sur la Nature (NbS) potentielle pour atténuer le changement climatique**. Les zones humides restaurées agissent comme des puits de carbone nets en augmentant les stocks de carbone dans la biomasse végétale et les sols/sédiments sans augmentation parallèles des émissions de gaz à effet de serre (GES).
- **Les données sur les stocks de carbone et les émissions de GES sont inégales selon les lieux et les types de zones humides**. La plupart des données existantes proviennent des régions tropicales et subtropicales ; l'Europe tempérée est très peu étudiée. Les zones humides d'eau douce et les eaux de transition sont fréquentes en Europe, mais elles sont sous-représentées dans les données empiriques sur les effets de la restauration sur le stockage du carbone et les flux de GES. Un suivi ciblé en Europe pourrait combler ces lacunes.
- **De nombreuses études se concentrent sur les stocks de carbone, mais pas sur les émissions de GES**. Les flux nets de GES sont des paramètres importants pour comprendre et quantifier efficacement les avantages des mesures de restauration, mais il n'existe pas beaucoup d'études sur le bilan de masse. Il est donc important de donner la priorité aux mesures des flux de GES afin de combler les lacunes en matière de données et d'orienter le financement des mesures de restauration.
- **La communication des données sur les flux de GES n'est pas standardisée**. Les données existantes, en particulier celles relatives aux flux de GES, ne sont pas standardisées et les résultats ne sont donc pas comparables. Un suivi et une communication standardisés, similaires à celles prévues par la Directive-Cadre sur l'Eau (DCE), ainsi qu'une vérification sont nécessaires pour un passage des chiffres de l'échelle locale à l'échelle européenne.

Introduction

Parmi les services écosystémiques fournis par les zones humides côtières, leur capacité à capter et à stocker le carbone dans les sols et les sédiments sur de longues périodes a particulièrement gagné en attention ces derniers temps. Ce potentiel de séquestration du carbone à long terme fait actuellement de la protection et de la restauration des zones humides côtières l'un des éléments clés parmi les options d'atténuation du changement climatique au niveau européen et mondial.

Que sont les zones humides côtières ?

Les zones humides côtières sont des écosystèmes situés à l'interface entre la terre et la mer, caractérisés par des inondations périodiques ou permanentes d'eau salée, saumâtre ou douce. Elles abritent une végétation hydrophyte ou submergée et comprennent des habitats tels que les marais salants, les herbiers marins, les vasières et les mangroves. Au sens de la Convention de Ramsar, les zones humides comprennent les marais, les tourbières ou les plans d'eau, naturels ou artificiels, dont les eaux sont stagnantes ou courantes, douces, saumâtres ou salées, y compris les zones marines dont la pro-

fondeur est inférieure à six mètres à marée basse. Ces écosystèmes fournissent des services essentiels tels que le soutien à la biodiversité, la protection du littoral et le stockage du carbone, mais la cartographie de leur étendue totale reste encore difficile, ce qui conduit souvent à une sous-estimation de leur couverture spatiale.

Quels sont les circuits du carbone dans les zones humides côtières ?

Les zones humides côtières agissent comme des puits de carbone, le stockant dans la biomasse végétale et les sédiments grâce à des processus collectivement appelés « voies du carbone bleu » (figure 1). La photosynthèse capture le CO_2 atmosphérique, qui est ensuite stocké dans la végétation et les sédiments. Les conditions anoxiques et gorgées d'eau ralentissent la décomposition, permettant au carbone de s'accumuler au fil des siècles. Des processus microbiens tels que la méthanogenèse se produisent dans des conditions de faible teneur en oxygène, produisant du méthane (CH_4), bien que celui-ci soit souvent supprimé dans les environnements salins. La dégradation des zones humides, notamment due à l'augmentation de la matière organique, entraîne une diminution du potentiel redox dans les sédiments et une augmentation des émissions de CH_4. La restauration des zones humides dégradées peut réactiver les voies du carbone bleu, améliorer la séquestration du carbone et contribuer à l'atténuation du changement climatique.

Que sont les flux de GES dans les zones humides côtières ?

Les flux de gaz à effet de serre (GES) dans les zones humides côtières impliquent des échanges de CO_2, CH_4 et N_2O entre les sols, l'eau, la végétation et l'atmosphère (Figure 1). Si ces écosystèmes agissent comme de puissants puits de carbone, ils peuvent également émettre du méthane et de l'oxyde nitreux, en particulier dans des conditions d'eau douce ou riches en nutriments. La restauration améliore généralement le stockage du carbone, mais ne garantit pas toujours une réduction des émissions de CH_4 ou de N_2O, ce qui souligne la complexité des flux nets de GES. Par conséquent, des mesures et des rapports précis sont essentiels pour éclairer les actions climatiques.

En termes de politiques de conservation, la question clé est de savoir si la restauration améliore réellement le bilan net des gaz à effet de serre (GES) dans les zones humides côtières et pas seulement dans les modèles théoriques. Dans le cadre du projet RESTORE4Cs, une synthèse des différentes études scientifiques[1] qui comparent les zones humides côtières dégradées et restaurées a été réalisée, dans le but d'évaluer leur potentiel d'atténuation du changement climatique à l'échelle globale.

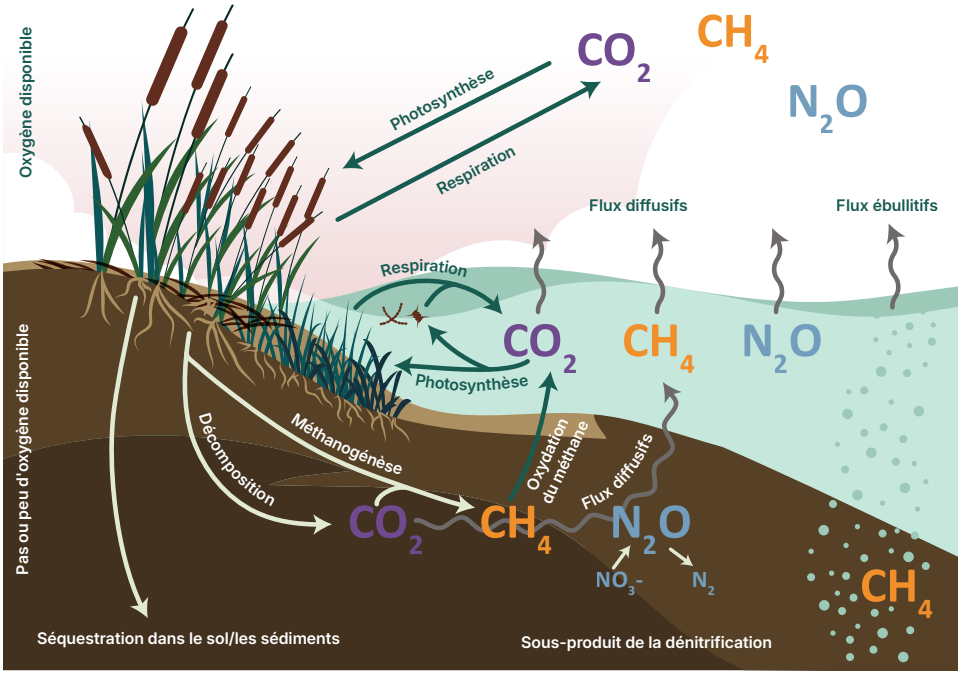


Figure 1. Schéma des flux de carbone et des GES dans les zones humides côtières.
© Université du Salento-LIFEWatch ERIC

Leçons apprises de la revue systématique des connaissances sur la restauration des zones humides côtières

La restauration des zones humides côtières est une Solution fondée sur la Nature potentielle pour atténuer le changement climatique

La restauration des zones humides côtières augmente la quantité de carbone stocké dans la biomasse végétale de surface et souterraine, ainsi que dans les sols ou les sédiments intertidaux. Les émissions de CO_2, CH_4 et N_2O rapportées ne montrent pas de changement cohérent après la restauration, comme c'est souvent le cas dans d'autres types de zones humides. Selon les connaissances scientifiques actuelles, il est admis que, d'une manière générale, la restauration est un outil potentiel d'atténuation du changement climatique (Figure 2).

Données actuelles sur les flux de GES limitées et inégales

Les données existantes sur les flux nets de GES, qui représentent le bilan entre les émissions et le stockage, sont limitées et incohérentes pour les zones humides côtières. Il est donc difficile d'évaluer pleinement les avantages climatiques des efforts de restauration en Europe. La plupart des études disponibles proviennent de régions tropicales, tandis que les côtes tempérées européennes, en particulier les zones humides d'eau douce et saumâtre très fréquentes en Europe, sont encore peu étudiées. La recherche se concentre principalement sur les stocks de carbone, et beaucoup moins d'études mesurent les flux de GES, même si ces flux déterminent si la restauration entraîne des avantages climatiques nets.

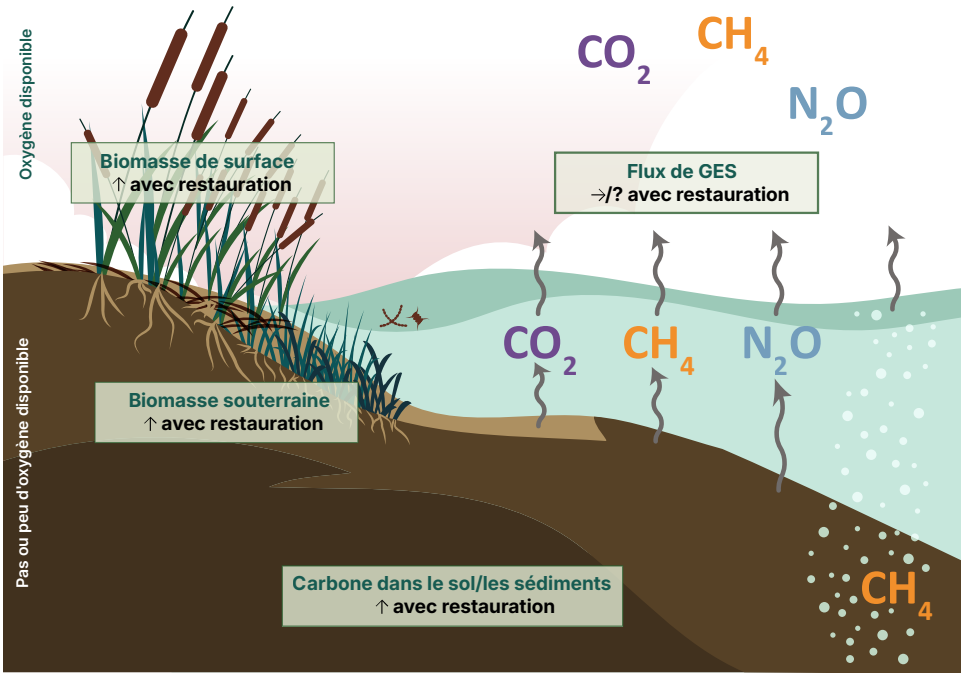


Figure 2 : Schéma des stocks de carbone et des flux de GES étudiés dans la revue de littérature, incluant les principaux résultats. © Université du Salento-LIFEWatch ERIC

Delta du Danube, Roumanie © Université du Salento-LIFEWatch ERIC

Des exemples pertinents provenant des côtes européennes, en particulier des zones humides méditerranéennes[2-5], montrent que la gestion hydrologique et l'état de conservation influencent fortement les flux nets de carbone et les émissions de GES. Ces études indiquent systématiquement que les pratiques de restauration ou de gestion adaptative tendent à améliorer la réduction nette des émissions, le méthane jouant un rôle particulier en raison de sa grande sensibilité à des facteurs environnementaux tels que la salinité et la température[4]. Elles soulignent également que la gestion adaptative ne sera efficace que si le régime hydrologique et la structure de l'écosystème sont maintenus. Bien que cela nécessite une confirmation empirique supplémentaire, cela devrait déjà servir de principe de base pour la planification et la mise en œuvre de la restauration. Plus précisément, ces études montrent qu'une bonne gestion hydrologique et un état général sain de l'écosystème sont essentiels pour réduire les émissions, en particulier celles du méthane, qui est très sensible aux changements environnementaux.

Manque de résultats standardisés sur le suivi de la restauration

La revue systématique de littérature a révélé que les résultats de la restauration sont rapportés de manière très incohérente et incomplète, ce qui limite considérablement toute synthèse quantitative. De nombreuses études ne disposent pas de protocoles de surveillance standardisés, de références avant la restauration ou de sites de contrôle comparables. Les détails méthodologiques essentiels (calendrier et nombre de mesures, contexte environnemental et actions de restauration spécifiques) font souvent défaut. Les données sur les stocks de carbone dans le sol et la biomasse, ainsi que sur les flux de CO_2, CH_4 et N_2O, sont souvent absentes ou collectées à l'aide d'approches non comparables, ce qui rend difficile l'évaluation des avantages climatiques à l'échelle continentale ou mondiale.

Le projet RESTORE4Cs montre comment garantir la cohérence méthodologique entre les sites, ce qui est essentiel pour une collecte de données fiable. En harmonisant au préalable les protocoles d'échantillonnage et les procédures d'analyses en laboratoire, le projet minimise la variabilité et renforce la comparabilité des résultats. Cette approche standardisée sous-tend l'intégration d'indicateurs écologiques, de données sur l'utilisation des sols et de variables climatiques dans des modèles géoréférencés, permettant d'évaluer les pressions et le potentiel d'atténuation pour différents types d'habitats humides. Une telle rigueur renforce non seulement la validité scientifique, mais garantit également que les résultats de la restauration sont évolutifs et pertinents sur le plan des décisions politiques.

Pertinence de la restauration des zones humides côtières, connaissances sur le stockage du carbone et les flux de GES pour la législation, les cadres stratégiques et les processus connexes

L'importance de la restauration des zones humides côtières pour le stockage du carbone et l'atténuation des GES est déjà reconnue dans les politiques et cadres européens et globaux. Les enseignements tirés de cette analyse des connaissances existantes peuvent contribuer à améliorer leur mise en œuvre. Il s'agit notamment :

- **Accord de Paris et CDN**. Les zones humides côtières restaurées peuvent servir de puits de carbone nets et être reconnues comme des mesures d'atténuation fondées sur la nature dans le cadre des CDN de l'UE, avec une comptabilisation explicite de la biomasse et du carbone dans le sol, soutenue par des Suivis, des Rapportages et des Vérifications (SRV) appropriés.
- **La Convention de Ramsar sur les Zones Humides**. De nombreuses zones humides côtières sont des sites Ramsar ; leur restauration favorise la conservation des habitats, la régulation du cycle de l'eau et les objectifs d'atténuation du changement climatique.
- **Loi Européenne sur le Climat**. L'objectif contraignant de neutralité climatique pour 2050 et l'objectif de réduction pour 2030 reconnaissent la restauration des écosystèmes, y compris les zones humides côtières, comme contribuant aux puits de carbone de l'UE.
- **Règlement de l'UE sur l'UTCATF (2023-2030)**. La restauration des zones humides côtières peut renforcer les puits nationaux du secteur foncier et contribuer à la réalisation de l'objectif européen en matière de puits de carbone.
- **Règlement de l'UE sur la Restauration de la Nature et Stratégie Biodiversité de l'UE à l'horizon 2030**. Les objectifs de restauration des marais salants, des herbiers marins et d'autres écosystèmes côtiers soutiennent à la fois le renforcement des puits de carbone et les objectifs en matière de biodiversité.
- **Décennie des Nations Unies pour la Restauration des Ecosystèmes et Décennie des Nations Unies pour les Océans**. Ces deux initiatives accordent la priorité à l'intensification de la restauration des zones humides côtières, y compris les marais salants et les mangroves, en tant que Solutions fondées sur la Nature essentielles pour l'action climatique, la résilience côtière et la réalisation des objectifs de développement durable (ODD). Les actions menées dans ces habitats peuvent servir d'exemples en démontrant une séquestration mesurable du carbone ainsi que des co-bénéfices écologiques, suivis à l'aide d'indicateurs combinés relatifs au carbone et à l'écologie.
- **Marchés du carbone et financement**. Les cadres de crédit carbone bleu s'étendent aux zones humides côtières, exigeant que les projets démontrent leur additionnalité, leur permanence et l'absence de fuites. Les normes s'alignent de plus en plus sur les règles de l'UE, telles que le règlement sur le Carbone Agricole et l'Elimination du Carbone (CRCF) et les cadres actualisés de financement durable (2025), renforçant ainsi le SRV et orientant les capitaux vers des résultats climatiques de haute intégrité, ce qui ouvre de nouvelles sources de financement pour la restauration.
- **Inventaires et modèles nationaux de GES**. Les inventaires nationaux des modèles de GES devraient distinguer les zones humides restaurées des zones humides dégradées, car les écosystèmes restaurés stockent davantage de biomasse et de carbone dans le sol et émettent un minimum de méthane. La prise en compte de ces différences améliore la précision des rapports nationaux et permet de saisir toute la valeur d'atténuation de la restauration.

Delta sud-ouest des Pays-Bas, Pays-Bas
© Université du Salento-LIFEWatch ERIC

Intégrer la restauration des zones humides côtières dans la politique climatique de l'UE et la comptabilisation du carbone : recommandations politiques

En s'appuyant sur les connaissances générées par le projet RESTORE4Cs, il est possible de promouvoir la restauration des zones humides côtières et de renforcer leur rôle dans le stockage du carbone et la réduction des émissions de GES dans le cadre des politiques existantes. Cependant, le service d'atténuation du changement climatique rendu par ces écosystèmes ne peut compenser les émissions mondiales de GES, de sorte qu'une décarbonisation profonde de l'économie mondiale reste essentielle. Dans ces conditions, le rôle des écosystèmes, en particulier des zones humides côtières, dans l'atténuation du changement climatique peut être renforcé par les mesures politiques suivantes :

Action 1

Mettre en place un système harmonisé de Suivi, de Rapportage et de Vérification (SRV) avec des données ouvertes (principes FAIR).

Un cadre SRV unifié est essentiel pour une comptabilité climatique crédible et comparable dans toute l'UE. Une harmonisation similaire a déjà été réalisée pour l'eutrophisation, par exemple grâce au manuel du protocole NICE (Nitrogen Cycling in Estuaries)[6], qui, dans le cadre du programme MAST III de l'UE en 2000, a fourni des méthodes standardisées d'échantillonnage, d'analyse et de calcul des flux d'azote dans les estuaires. Cela nécessite plusieurs étapes :

- **Adopter des protocoles normalisés** alignés sur les orientations du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) pour mesurer les principaux réservoirs de carbone et les flux de GES (carbone du sol, biomasse, flux de CO_2, CH_4, N_2O).
- **Inclure des mesures de référence** avant la restauration et assurer un suivi régulier et à long terme afin de suivre les changements au fil du temps.
- **Comparer les résultats avec des actions de référence**, notamment dans des sites dégradés et naturels analogues.
- **Garantir l'ouverture et l'interopérabilité des données**, des méthodes de publication, des résultats et des informations géospatiales dans des référentiels accessibles compatibles avec les systèmes nationaux.
- **Garantir la qualité et la crédibilité des données** grâce à des procédures d'assurance qualité, à l'évaluation des incertitudes et à une vérification indépendante afin de soutenir les rapports nationaux et européens.

Des enseignements pourraient être tirés du processus qui a sous-tendu le manuel du protocole pour le NICE (Nitrogen Cycling in Estuaries, cycle de l'azote dans les estuaires)6, afin de standardiser les études sur l'eutrophisation dans les estuaires et de soutenir la mise en œuvre de la DCE dans les eaux de transition.

Action 2

Aligner les objectifs et la comptabilisation du carbone sur les cadres politiques relatifs au climat.

Les efforts de restauration doivent être guidés par des objectifs clairs, mesurables et alignés sur les politiques climatiques. Cela implique plusieurs éléments clés :

- **Définir des objectifs carbone mesurables**, notamment l'augmentation du carbone stocké dans la biomasse et les sols, et les seuils d'émissions acceptables de CH_4 et de N_2O, comptabilisés en équivalents CO_2.
- **Aligner les objectifs de restauration sur les instruments politiques nationaux et européens existants**, notamment la CDN de l'UE, la loi européenne sur le climat, le règlement de l'UE sur l'UTCATF et le règlement de l'UE sur la restauration de la nature.
- **Établir des références cohérentes pour les conditions de dégradation** afin de garantir la comparabilité entre les sites et les États Membres.
- **Appliquer des délais réalistes pour la restauration écologique**, reflétant le temps nécessaire aux écosystèmes pour se stabiliser et produire des avantages climatiques mesurables, en gar-

dant à l'esprit que la plupart des zones humides côtières sont des systèmes socio-écologiques.

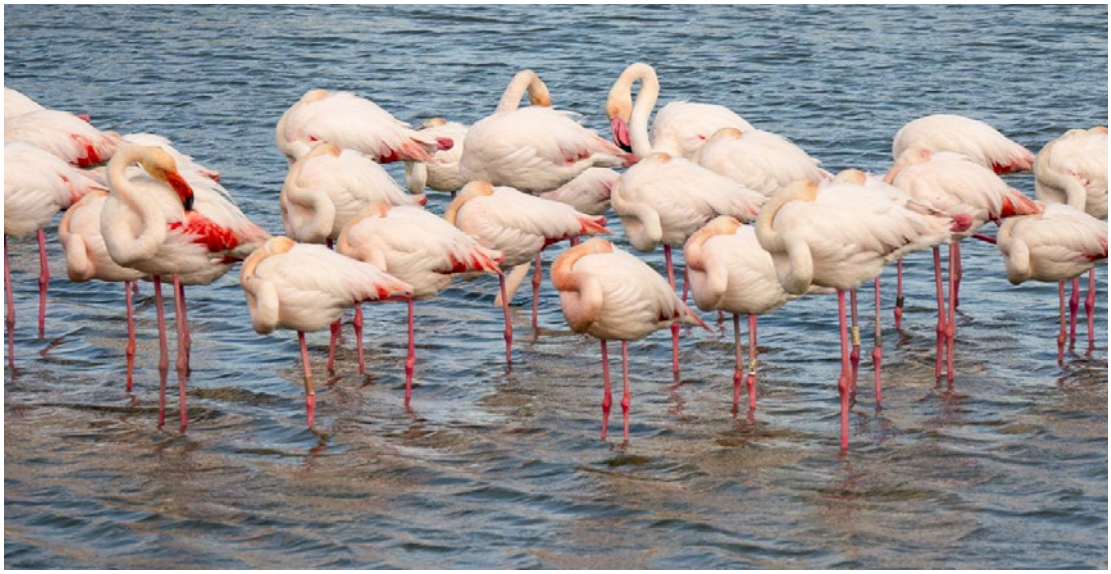
- **Soutenir l'intégration dans les inventaires nationaux de GES** en veillant à ce que les objectifs, les bases de référence et les calendriers soient compatibles avec les exigences en matière de rapports.

Action 3

Permettre l'accès au financement carbone grâce à un système fiable de crédits carbone bleu.

La restauration des zones humides côtières peut générer un financement carbone grâce aux marchés volontaires et réglementés du carbone. Pour garantir la crédibilité et maximiser l'impact, plusieurs actions clés sont nécessaires :

- **Établir des critères d'éligibilité clairs** pour les projets carbone :
  - Démontrer l'additionnalité, le stockage à long terme du carbone (permanence) et un minimum de fuites.
  - Éviter de nuire à l'environnement et à la biodiversité.
  - Utiliser des références prudentes et des méthodologies alignées sur celles du GIEC.
  - Appliquer les normes reconnues lorsqu'elles sont disponibles et élaborer des lignes directrices spécifiques à l'UE afin de rationaliser leur adoption.
  - S'appuyer sur les effets climatiques en fonction du potentiel radiatif des différents GES, comptabilisés en équivalents CO_2.
- **Renforcer les capacités locales** pour gérer les crédits carbone :
  - Soutenir la conception de systèmes SRV.
  - Aider aux processus de certification et à l'accès au marché.
- **Réduire les coûts de transaction et élargir la participation** :
  - Mettre en place des canaux de financement et de crédit préapprouvés.
  - Dans la mesure du possible, lier la génération de crédits carbone aux inventaires nationaux de GES tout en évitant le double comptage.
- **Adopter des cadres de gestion adaptative** :
  - Aligner les pratiques de restauration sur les dynamiques hydrologiques, de la végétation et du carbone.
  - Les résultats de projets européens (par exemple, Interreg Wetlands4Climate) montrent que la gestion des régimes hydrologiques, des sols et de la végétation est essentielle pour maintenir le potentiel d'atténuation.
- **Maximiser les avantages connexes** :
  - Au-delà du carbone, les zones humides restaurées contribuent à l'amélioration de la biodiversité, à la régulation des crues et à la rétention des nutriments, renforçant ainsi la résilience globale des écosystèmes.



Camargue, France © Université du Salento-LIFEWatch ERIC

Références

1. Misteli, B., Morant, D., Camacho, A., Adamo, M., Bachi, G., Bègue, N., Bučas, M., Cabrera-Brufau, M., Carballeira, R., Cavalcante, L., Cazacu, C., Coelho, J. P., Doebke, C., Dinu, V., Guel-mami, A., Giuca, R., Kataržytė, M., Lillebø, A. I., ... Attermeyer, K. (2025). Coastal wetland restora-tion and greenhouse gas pathways: A global meta-analysis. EarthArXiv preprint. https://doi.org/10.31223/X51B39

2. Morant, D., Picazo, A., Rochera, C., Santamans, A. C., Miralles-Lorenzo, J., & Camacho, A. (2020). Carbon metabolic rates and GHG emissions in different wetland types of the Ebro Delta. *PLOS ONE, 15*(4), e0231713. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231713

3. Morant, D., Rochera, C., Picazo, A., Miralles-Lorenzo, J., Camacho-Santamans, A., & Camacho, A. (2024). Ecological status and type of alteration determine the C-balance and climate change mitigation capacity of Mediterranean inland saline shallow lakes. *Scientific Reports, 14*, 29065. https://doi.org/10.1038/s41598-024-79578-7

4. Rochera, C., Picazo, A., Morant, D., Miralles-Lorenzo, J., Sánchez-Ortega, V., & Camacho, A. (2025). Linking carbon fluxes to flooding gradients in sediments of Mediterranean wetlands. *ACS ES&T Water.* https://doi.org/10.1021/acsestwater.4c00940

5. Camacho, A., Picazo, A., Rochera, C., Santamans, A. C., Morant, D., Miralles-Lorenzo, J., & Castillo-Escrivà, A. (2017). Methane emissions in Spanish saline lakes: Current rates, temperature and salinity responses, and evolution under different climate change scenarios. *Water, 9*(9), 659. https://doi.org/10.3390/w9090659

6. Dalsgaard, T. (Ed.), Nielsen, L. P., Brotas, V., Viaroli, P., Underwood, G., Nedwell, D. B., Sundbäck, K., Rysgaard, S., Miles, A., Bartoli, M., Dong, L., Thornton, D. C. O., Ottosen, L. D. M., Castaldelli, G., & Risgaard-Petersen, N. (2000). *Protocol handbook for NICE – nitrogen cycling in estuaries: A project under the EU research programme Marine Science and Technology (MAST III)*. Silkeborg, Denmark: National Environmental Research Institute.

RESTORE4Cs est un projet Horizon Europe visant à évaluer les effets des actions de restauration sur la capacité des zones humides à atténuer le changement climatique et à fournir divers services écosystémiques, en utilisant une approche intégrative des systèmes socio-écologiques. Plus d'informations sont disponibles sur : https://www.restore4cs.

Auteurs: Misteli, B.[1], Attermeyer, K.[1,2], Rochera, C.[3], Lillebø, A.I.[4], Camacho, A.[3]

Réviseurs: Elkina, E.[5], Štrbenac, A.[6], Suárez, S.[6]

[1] WasserCluster Lunz, Autriche ; [2] Université de Vienne, Autriche ; [3] Université de Valence, Espagne ; [4] Université d'Aveiro, Portugal
[5] Institut Ecologic, Allemagne; [6] MedWet, France

Référence : Misteli, B., Attermeyer, K., Rochera, C., Lillebø, A.I., Camacho, A. 2025. Comment la restauration des zones humides côtières peut-elle atténuer le changement climatique ? Ce que nous savons et ce qui reste encore à éclaircir. Note d'orientation. *Projet RESTORE4Cs*.

PARTENAIRES

Clause de non-responsabilité : Ce document de travail a été publié avec le soutien financier de l'Union européenne. Toutefois, les opinions exprimées relèvent de la seule responsabilité des auteurs et ne reflètent pas nécessairement celles de l'Union européenne ou de l'Agence exécutive européenne pour le climat, les infrastructures et l'environnement (CINEA). Ni l'Union européenne ni l'autorité de subvention ne peuvent en être tenues pour responsables.