



BIODIVERSITÉ

Septembre 2026

LES SOLUTIONS FONDÉES SUR LA NATURE EN ÎLE-DE-FRANCE

FAIRE FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

LES SOLUTIONS FONDÉES SUR LA NATURE EN ÎLE-DE-FRANCE

FAIRE FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Septembre 2026

Directeur général : Nicolas Bauquet

Rédaction : Gwendoline Grandin, Gabrielle Huart, Olivier Renault

Relecture et apports : Marc Barra, Erwan Cordeau, Lucile Dewulf, Sandra Garrigou, Klaire Houeix, Hemminki Johan, Marion Tillet

Mise en page : Agnès Charles

Relations presse : Sandrine Kocki, sandrine.kocki@institutparisregion.fr

Fabrication : Sylvie Coulomb

Impression : Frazier

N° d'ordonnancement : 43.25.11

ISBN : 978-2-7371-2283-5

Crédit photo de couverture : © Gabrielle Huart

Citation recommandée : G. Huart, G. Grandin, O. Renault. 2026. *Les Solutions fondées sur la Nature en Île-de-France - Faire face au changement climatique*. Agence régionale de la biodiversité en Île-de-France. L'Institut Paris Region, Paris, 152 p.

L'Institut Paris Region

Campus Pleyad - Pleyad 4

66-68 rue Pleyel

93200 Saint-Denis

Tél. : + 33 (1) 77 49 77 49

www.institutparisregion.fr

RÉSUMÉ EXÉCUTIF

Le changement climatique et l'érosion de la biodiversité constituent deux crises indissociables qui se renforcent mutuellement. En Île-de-France, le changement climatique est déjà engagé : augmentation des températures, intensification des vagues de chaleur, sécheresses et précipitations extrêmes modifiant déjà significativement le fonctionnement des écosystèmes et les conditions de vie des Franciliens. Ces phénomènes viennent exacerber des pressions anthropiques déjà fortes sur la biodiversité : artificialisation des sols, fragmentation des habitats, simplification des paysages agricoles et forestiers. Face à ce constat, partagé aux échelles internationale, nationale et régionale, les politiques publiques sont appelées à combiner deux leviers complémentaires : réduire les émissions de gaz à effet de serre et restaurer les fonctions régulatrices des écosystèmes pour stocker l'eau, limiter les risques naturels ou encore réguler le climat et ainsi maintenir des conditions de vie soutenables pour l'humain et la nature.

Les solutions fondées sur la nature (SfN) répondent précisément à ce double enjeu. Elles désignent toute action qui protège, gère durablement ou restaure le fonctionnement des écosystèmes pour répondre à un enjeu de société tout en générant un gain pour la biodiversité. Elles se distinguent des infrastructures dites « grises » par leur multifonctionnalité et leur capacité à produire des cobénéfices simultanés pour la régulation thermique, la gestion de l'eau, le stockage de carbone, la qualité de vie. Plusieurs études convergent désormais pour démontrer leur efficacité sur les plans économique, écologique et social : un euro investi dans une SfN peut générer jusqu'à 2,80 euros de bénéfices et la majorité des études comparatives disponibles concluent à une performance égale ou supérieure à celle des solutions conventionnelles pour réduire les risques climatiques (González-García *et al.*, 2025).

En réponse à l'« État de santé de la biodiversité en Île-de-France. L'influence du changement climatique » produit en avril 2026 par l'Agence régionale de la biodiversité en Île-de-France (ARB îdF) (Johan *et al.*, 2026), ce nouveau guide propose de revenir sur le concept de « solutions fondées sur la nature » et présente les différentes actions pouvant être mises en œuvre dans les milieux agricoles, forestiers, urbains ou humides et aquatiques. Il s'appuie sur de nombreux retours d'expérience et propose une synthèse des outils de planification et des aides financières pouvant être mobilisés pour accompagner leur déploiement.

En milieu agricole, qui occupe près de la moitié du territoire francilien, le changement climatique aggrave un déclin de biodiversité déjà marqué par la simplification des paysages et l'intensification des pratiques. Des leviers existent pour inverser cette tendance : agriculture de conservation des sols, réimplantation de haies et autres infrastructures agroécologiques, agroforesterie, polyculture-élevage et diversification des assolements, qui renforcent à la fois la résilience des sols, la résistance des cultures et la biodiversité associée.

Les forêts, encore relativement préservées grâce à un microclimat tampon, voient leur rôle de refuge fragilisé par la multiplication des sécheresses, des incendies et des maladies, au point que le puits de carbone forestier national s'effondre depuis 2015. La diversification des essences (diversité spécifique et diversité génétique), des strates forestières et de l'âge/diamètre des arbres, la conservation du bois mort et des milieux ouverts (mares, landes pelouses, chaos...), voire la possibilité de laisser des parcelles en libre évolution constituent les principaux leviers d'adaptation identifiés.

Les espaces urbains franciliens, caractérisés par une forte densité bâtie en petite couronne, sont particulièrement vulnérables à l'effet d'îlot de chaleur urbain, au ruissellement et aux inondations. Cette vulnérabilité est renforcée par un déficit d'espaces de nature et une forte minéralité. Aussi, la végétalisation, la désimperméabilisation et la renaturation des sols, la conception de « villes éponges » capables d'infiltrer les eaux pluviales, la restauration des rivières urbaines ou encore le renforcement des continuités écologiques constituent autant de solutions permettant à la fois de réduire les effets du changement climatique, et d'améliorer les conditions de vie pour les habitants tout en renforçant l'accueil de la biodiversité.

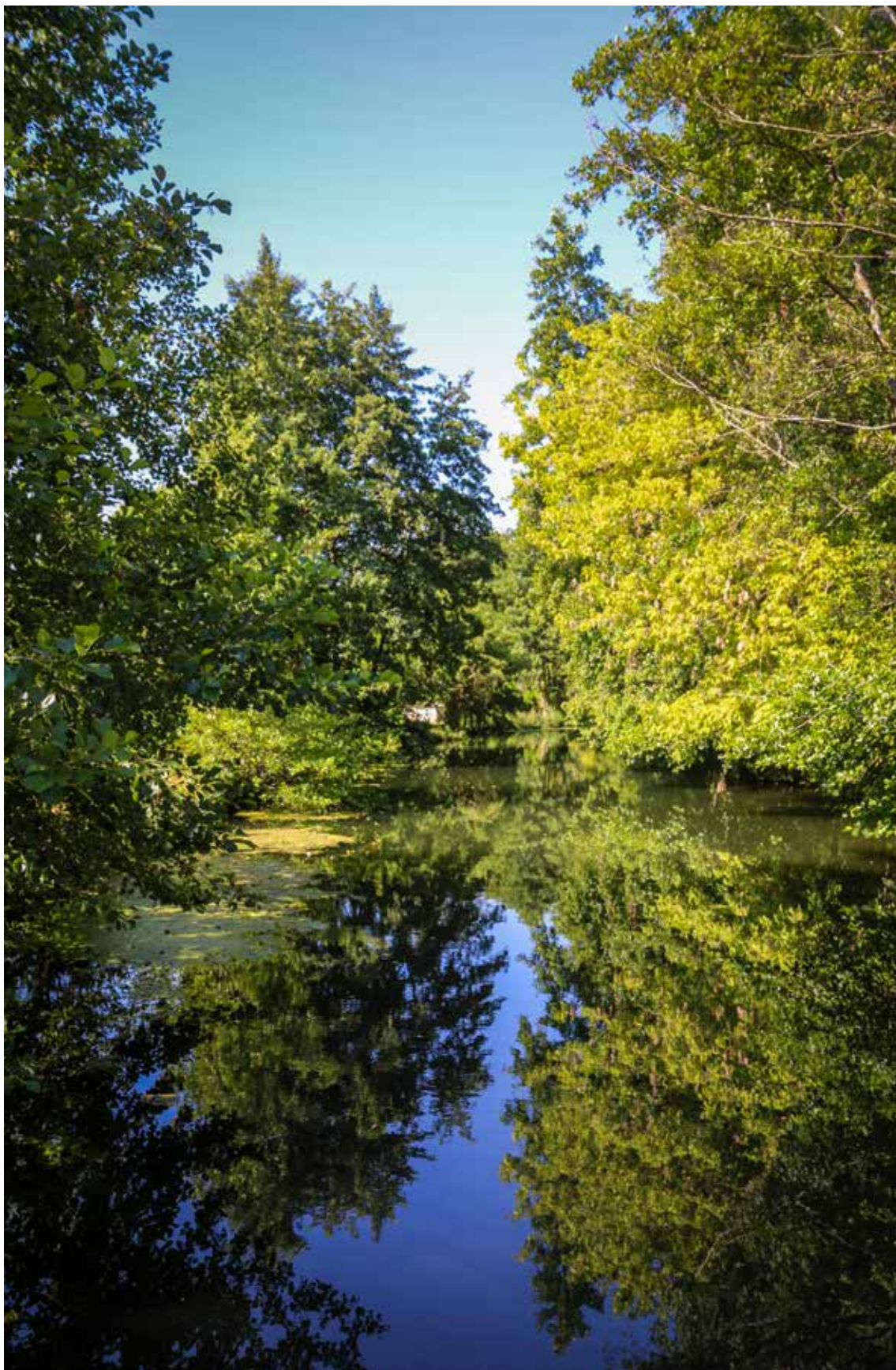
Les milieux aquatiques et humides, également présents dans les trois milieux précédents, constituent un trait d'union entre eux et appellent une approche à l'échelle du bassin versant, fondée sur le principe de solidarité amont-aval. La restauration du fonctionnement hydromorphologique des cours d'eau (reméandrage, suppression d'ouvrages, diversification des habitats), l'aménagement de zones naturelles d'expansion des crues, la restauration des ripisylves par le génie végétal, ainsi que la protection et la restauration des zones humides, qui jouent un rôle d'éponge naturelle contre les crues, de soutien d'étiage, de filtre épurateur et de réservoir de carbone, en constituent les principaux leviers. Ces milieux restent toutefois parmi les plus vulnérables : la moitié des zones humides ont disparu de notre territoire au cours du ^{xx}e siècle et leur restauration est lente, leurs fonctions ne retrouvant souvent qu'environ 70 à 75 % de leur état de référence après plusieurs décennies, ce qui souligne l'urgence de préserver en priorité les zones encore fonctionnelles (ARB îdF, 2019).

Toutefois, il est important de souligner que les SfN ne constituent ni une solution universelle, ni une réponse standardisée. Leur efficacité reste conditionnée à leur conception adaptée au contexte et à la gestion ultérieure des aménagements réalisés. En outre, la biodiversité, présentée comme constitutive du concept, demeure trop souvent reléguée au rang de cobénéfice plutôt que d'objectif du projet à part entière. Un recours plus systématique à l'ingénierie écologique, une plus grande connectivité entre les espaces aménagés et les milieux naturels environnants, ainsi qu'un suivi scientifique renforcé des projets, en particulier hors du contexte urbain, sur lequel se concentre l'essentiel des connaissances actuelles, sont nécessaires pour combler l'écart entre l'ambition affichée des SfN et la réalité des projets mis en œuvre. Cette montée en exigence ne doit pas non plus faire oublier que la protection des écosystèmes encore fonctionnels reste l'action prioritaire pour préserver la biodiversité et les services qu'elle rend.

Les retours d'expérience rassemblés dans cette publication, qu'ils concernent la restauration d'une zone d'expansion de crue, la diversification d'essences forestières ou la replantation de haies bocagères, montrent que ces solutions sont déjà à l'œuvre en Île-de-France. Dans une région où la biodiversité est menacée par l'artificialisation et le changement climatique, les solutions fondées sur la nature constituent un levier d'action majeur pour l'adaptation des territoires. Leur déploiement implique toutefois des stratégies de sobriété foncière dans les collectivités afin de libérer de l'espace pour accueillir ces SfN et les protéger réglementairement.



Zone d'expansion des crues du Vignois à Gonesse (95). © Gilles Lecuir



Marais d'Itteville (91). © Ophélie Ricci

SOMMAIRE

1 • CLIMAT ET BIODIVERSITÉ : UNE SEULE ET MÊME CRISE	9
Interactions entre le climat, la biodiversité et la société	9
Quelle évolution du climat en Île-de-France ?	11
La biodiversité francilienne face aux effets du changement climatique	14
Quelles stratégies pour faire face à ces deux crises ?	16
2 • LES SOLUTIONS FONDÉES SUR LA NATURE	21
L'historique du concept	21
Qu'entend-on par solution fondée sur la Nature ?	23
Améliorer la prise en compte de la biodiversité	27
La protection des milieux naturels : une priorité à ne pas oublier	34
3 • LE MILIEU AGRICOLE	37
Rappel des impacts du changement climatique en milieu agricole	38
Les SfN en milieu agricole	40
Outils de planification et financements	49
Retours d'expérience	50
4 • LE MILIEU FORESTIER	55
Rappel des impacts du changement climatique en milieu forestier	56
Les SfN en milieu forestier	58
Outils de planification et financements	70
Retours d'expérience	72
5 • LE MILIEU URBAIN	77
Rappel des impacts du changement climatique en milieu urbain	78
Les SfN en milieu urbain	80
Outils de planification et financements	104
Retours d'expérience	108
6 • LES MILIEUX AQUATIQUES ET HUMIDES	115
Les impacts du changement climatique sur les milieux aquatiques et humides	116
Les SfN en milieux aquatiques et humides	118
Outils de planification et financements	132
Retours d'expérience	135
CONCLUSION	139
ANNEXES MÉTHODOLOGIQUES	140
Annexe 1 : Standard mondial de l'UICN	140
Annexe 2 : Grille d'auto-évaluation pour un projet de SfN	141
BIBLIOGRAPHIE	143

RETROUVEZ LES GRANDS TYPES D'ACTIONS PAR MILIEU

LE MILIEU AGRICOLE

L'agriculture de conservation des sols	40
La substitution des fertilisants minéraux par des fertilisants organiques	42
Les infrastructures agroécologiques	43
L'agroforesterie	45
La polyculture-élevage	46
La diversification végétale et les mélanges variétaux	48

RETOURS D'EXPÉRIENCE

La ferme de Christophe Parent à Oissery (77)	50
La Fabrique végétale à Lumigny-Nesles-Ormeaux (77)	51
Les aménagements d'hydraulique douce sur le bassin versant de la Nonette par le Syndicat Interdépartemental du SAGE de la Nonette (SISN)	52

LE MILIEU FORESTIER

La diversification des essences et la diversification génétique	59
La sylviculture mélangée à couvert continu	60
La pratique d'éclaircies	62
La conservation du bois mort ou mourant	62
La protection des sols forestiers	64
Le renouvellement des forêts	65
La préservation de la mosaïque d'habitats forestiers	66
Les ripisylves : milieux à protéger et restaurer	67
La libre évolution	68
La production de bois durable	69

RETOURS D'EXPÉRIENCE

La préservation de la forêt de Chantilly par le collectif « Ensemble, sauvons la forêt de Chantilly »	72
L'adaptation des forêts au changement climatique développée par l'Office national des forêts	73
La démarche Sylv'ACCTES et sa mise en œuvre en Île-de-France	74

LE MILIEU URBAIN

La végétalisation pour réduire les îlots de chaleur urbains	80
Les parcs urbains comme îlots de fraîcheur	86
Les villes éponges	88
Les ouvrages de gestion des eaux pluviales pour limiter le ruissellement	90
La désimperméabilisation des sols	93
La renaturation des espaces minéralisés	94
La protection des espaces de nature spontanée	96

La restauration des rivières urbaines	96
Le renforcement des continuités écologiques	98
La végétalisation des toitures	100
La végétalisation des murs	103

RETOURS D'EXPÉRIENCE

De l'eau à la canopée : la Seine-Saint-Denis face aux défis climatiques (93)	108
Le projet Sylvia : transformation d'un ancien parking en agroforêt urbaine (75)	110
Gestion intégrée des eaux pluviales et lutte contre les ICU aux Mureaux (78)	111

LES MILIEUX AQUATIQUES ET HUMIDES

La restauration du fonctionnement hydromorphologique des cours d'eau	118
Les zones naturelles d'expansion des crues	120
La restauration des ripisylves	122
La restauration des berges et des cours d'eau par le génie végétal	124
La protection et la restauration des zones humides	126
La végétalisation et l'infiltration sur tout le bassin versant	130
La transformation des retenues d'eau en zones humides	130

RETOURS D'EXPÉRIENCE

Réhabilitation des berges de Seine par l'association Espaces (92)	135
La restauration de la Mérantaise par le Parc naturel de la Haute Vallée de Chevreuse (78)	136
Zone humide pédagogique de la Mauperchette à La Chapelle-Gauthier (77)	137



Inondation au Parc du Peuple de l'herbe (78), 2018. © Gilles Lecuir

1 • CLIMAT ET BIODIVERSITÉ : UNE SEULE ET MÊME CRISE

INTERACTIONS ENTRE LE CLIMAT, LA BIODIVERSITÉ ET LA SOCIÉTÉ

Le GIEC le confirme dans son rapport conjoint avec l'IPBES ainsi que dans le rapport NEXUS¹ (McElwee *et al.*, 2025 ; Pörtner *et al.*, 2021a) : le changement climatique et l'érosion de la biodiversité sont deux crises interdépendantes, qui interagissent à travers des mécanismes complexes de rétroaction. Chacune de ces crises amplifie l'autre, formant un système couplé que les politiques publiques et les actions territoriales doivent impérativement aborder de manière intégrée.

Le changement climatique, en impactant les températures, les régimes de précipitations et la fréquence des événements extrêmes, constitue une pression croissante sur le vivant. Ces évolutions climatiques perturbent les conditions de vie des espèces, provoquant des déplacements d'aires de répartition, des changements de phénologie, une désynchronisation des interactions écologiques ou encore une perte de diversité génétique dans les populations les plus isolées. Les espèces déjà soumises à d'autres pressions, comme la pollution ou la perte d'habitat, sont particulièrement vulnérables. En affectant le bon état écologique des milieux, le changement climatique affaiblit la capacité des écosystèmes à assurer des fonctions essentielles telles que le stockage du carbone, la régulation du cycle de l'eau, l'atténuation des vagues de chaleur ou encore la protection contre les inondations et les sécheresses (Weiskopf *et al.*, 2020). En parallèle, à mesure que les milieux natu-

rels se dégradent sous l'action humaine (déforestation, artificialisation, fragmentation des habitats, assèchement des zones humides...), ces derniers relâchent le carbone stocké et perdent leur fonction de puits, ce qui accélère d'autant plus le changement climatique. Ainsi, la perte de biodiversité affaiblit la résilience des écosystèmes et contribue indirectement à l'aggravation du changement climatique, lequel exacerbe à son tour les pressions sur la biodiversité. Climat et biodiversité s'auto-alimentent mutuellement, ce qui accroît la vulnérabilité des socio-écosystèmes.



Le changement climatique peut désynchroniser les cycles des plantes et de leurs pollinisateurs. Si l'Andrène de la bruyère (*Andrena fuscipes*), en photo, émerge alors que sa plante nourricière n'est pas encore en floraison, elle ne pourra pas accomplir son cycle de vie.

© Will George, CC BY-NC 2.0

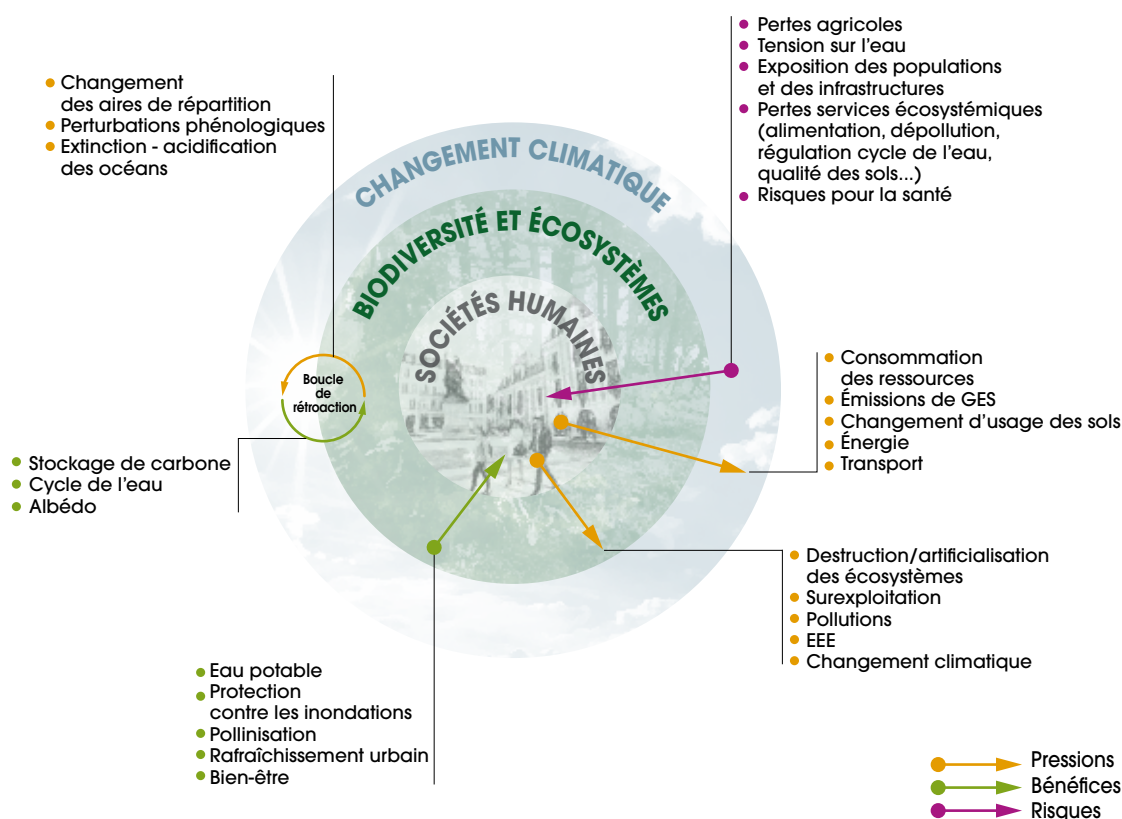
1. Le rapport NEXUS (2024) est un rapport de l'IPBES qui analyse les interactions entre biodiversité, eau, alimentation, santé et changement climatique.



COMPRENDRE LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA BIODIVERSITÉ

Le changement climatique affecte les espèces à travers plusieurs mécanismes. Parmi les plus visibles figurent les changements phénologiques, c'est-à-dire des perturbations du cycle de vie telles que le décalage de la floraison, de l'hibernation, de la reproduction ou des périodes de naissance. Ces modifications concernent aussi bien les végétaux que les animaux. La hausse des températures entraîne également une modification des aires de répartition des espèces, qui se déplacent vers des latitudes plus septentrionales ou des altitudes plus élevées. Des modélisations de l'INRAE montrent par exemple que le chêne vert, aujourd'hui d'affinité méridionale, pourrait s'étendre jusqu'en Île-de-France d'ici 2100, tandis que le hêtre pourrait y régresser (Badeau *et al.*, 2004).

Ces déplacements modifient les équilibres écologiques et peuvent provoquer une désynchronisation des relations entre espèces. Par exemple, chez la mésange bleue, la naissance des oisillons ne coïncide plus toujours avec le pic d'abondance des chenilles, principale ressource alimentaire des jeunes (Thomas *et al.*, 2001). Enfin, certaines espèces ne disposent pas de la capacité d'adaptation ou de dispersion nécessaire pour faire face à ces changements. Leur incapacité à migrer vers des conditions plus favorables peut entraîner un déclin des populations, voire une extinction locale. C'est le cas du dactyle verrucivore (espèce de sauterelle), aujourd'hui presque disparu d'Île-de-France, en raison du déficit de précipitations automnales et hivernales nécessaires au développement de ses œufs (Johan (coord.) et Houard, 2021).



© ARB îdF, L'INSTITUT PARIS REGION, 2026

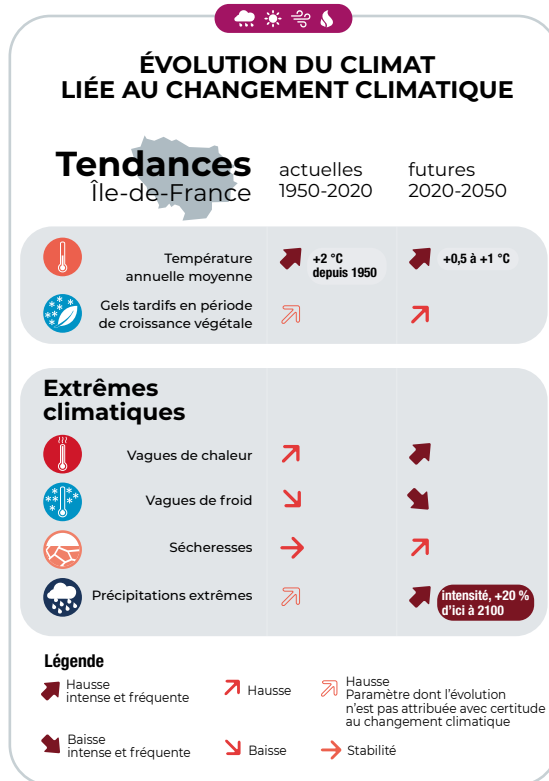
Interactions entre changement climatique, biodiversité et sociétés humaines.

Les activités humaines exercent des pressions sur le climat et les écosystèmes, notamment par les émissions de gaz à effet de serre et l'artificialisation des sols. Le changement climatique perturbe le fonctionnement des écosystèmes, tandis que la biodiversité contribue à réguler le climat et à soutenir le bien-être humain via les services écosystémiques. Crédit : d'après Cour des comptes, 2025 ; Pörtner *et al.*, 2021a

QUELLE ÉVOLUTION DU CLIMAT EN ÎLE-DE-FRANCE ?

Le climat francilien connaît déjà une évolution marquée depuis plusieurs décennies et les projections – issues des travaux de Météo France, du Groupe régional d'expertise sur le changement climatique et la transition écologique en Île-de-France (GREC francilien) et des exercices de modélisation réalisés par L'Institut Paris Region – indiquent une accélération de ces tendances au cours du ^{xxi}^e siècle (Cordeau *et al.*, 2022 ; Robert *et al.*, 2022a, 2022b). La région est déjà et sera confrontée à une augmentation des températures moyennes, à une intensification des événements extrêmes et à une modification des régimes de précipitations, avec des conséquences importantes pour les milieux naturels, l'agriculture, les forêts et les zones urbaines.

Depuis les années 1950, la température moyenne annuelle en Île-de-France a augmenté de près de 2 °C. Cette tendance se poursuit et pourrait atteindre +2 °C à +3 °C d'ici 2050, selon les scénarios d'émissions. Une multiplication des nuits tropicales (températures >20 °C) et un allongement des périodes de chaleur, traduisant l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des canicules, aggravera notamment la vulnérabilité des zones soumises au phénomène d'îlot de chaleur.



Forum des Halles à Paris lors d'une vague de chaleur. © Corinne Legenne/L'Institut Paris Region



BILAN MÉTÉO 2022-2025 EN ÎLE-DE-FRANCE

Événement climatique (2022-2025)	Records enregistrés par la station météo à Paris-Montsouris
2022 • Température annuelle (1 ^{er})	14,3 °C bat le record de 2020
2023 • Température annuelle (3 ^e)	14,27 °C
2023 • Température moyenne du mois de septembre	21,4 °C bat le record de 1885
2023 • Sécheresse hivernale (1 ^{er})	- 96 % de cumul des précipitations sur le mois de février
2024 • Pluviométrie annuelle (1 ^{er})	+43 % bat le record de 2000
2024 • Humidité des sols	Plusieurs records battus (dépression Kirk)
2025 • Température moyenne maximale du printemps (2 ^e <i>ex aequo</i> avec 2020)	+2,4 °C par rapport à 1991-2020

Source : D'après les bulletins météo de l'Agence parisienne du climat et de Météo France.

Des impacts climatiques plus sévères se traduisent déjà dans les faits. Les années 2020, 2022, 2023 et 2025 ont été les plus chaudes jamais enregistrées en France depuis le début des relevés, il y a plus de 150 ans. L'année 2022 a cumulé des gelées tardives au printemps, une sécheresse exceptionnelle en été et une vague de chaleur prolongée à l'automne. En 2023, la sécheresse s'est prolongée en janvier-février avec presque 50 jours consécutifs sans pluie à Paris, puis des vagues de chaleur à la fois précoces (dès juin) et tardives (jusqu'en octobre), avec un mois de septembre record : 21,4 °C en moyenne à Paris-Montsouris, soit +4,1 °C au-dessus de la normale. L'année 2024 a confirmé cette tendance. Elle s'est classée 8^e année la plus chaude à Paris depuis 1872, malgré une baisse de l'ensoleillement de -12 %. Elle a surtout été remarquable pour ses précipitations exceptionnelles, avec un excédent de +43 % et un total annuel de 901 mm mesurés à Montsouris, un record depuis le début des mesures. L'automne 2024 a vu plusieurs événements

extrêmes, dont la dépression Kirk qui a provoqué des inondations liées à un cumul de 70 mm de pluie en 24 heures à Paris et 55mm en Île-de-France. Enfin, l'année 2025 se classe 5^e année la plus chaude jamais enregistrée à Montsouris et 3^e au niveau national. Le printemps 2025 a montré un contraste marqué, avec un déficit de précipitations de -45 %, provoquant un assèchement rapide des sols. Cet épisode a été classé parmi les 10 à 20 % les plus sévères en Île-de-France depuis 1959. Ce printemps s'est également illustré par sa chaleur : il est le 2^e plus chaud jamais enregistré à Paris, avec des températures maximales supérieures de +2,4 °C aux normales et plusieurs journées au-dessus de 30 °C dès le mois de mai. Un épisode de grêle exceptionnel, le 3 mai 2025, a causé 334 millions d'euros de dégâts en région francilienne (France Assureurs). Ce bilan confirme une trajectoire climatique désormais tangible avec une augmentation des températures en Île-de-France et des événements extrêmes plus fréquents et plus intenses.



Incendie en forêt de Fontainebleau, 2020. © ONF

Parallèlement, les précipitations annuelles ne montrent pas de tendance nette à la baisse en volume total, mais leur répartition saisonnière évolue. On observe une diminution des précipitations estivales et une augmentation des épisodes de pluies intenses sur de courtes durées. Ces épisodes contribuent à une hausse du risque d'inondations par débordement des cours d'eau et par ruissellement, notamment dans les zones fortement artificialisées, ainsi que du risque d'érosion des sols.

Les sécheresses deviennent également plus longues et fréquentes, avec des effets sur l'hydrologie des sols, la recharge des nappes phréatiques et la disponibilité en eau pour les milieux naturels comme pour les activités humaines. Le déficit hydrique observé en surface impacte directement la végétation, en particulier les forêts et les cultures sensibles, et limite les fonctions écologiques des zones humides. Enfin, le climat francilien devient plus instable, avec une variabilité interannuelle marquée. Des années anormalement chaudes et sèches peuvent être suivies d'années froides ou très pluvieuses, ce qui complexifie l'adaptation des espèces et des écosystèmes. De plus, l'occurrence de ces événements extrêmes génère des aléas induits : les vagues de chaleur dégradent la qualité de l'air, les pluies extrêmes participent à la survenance des inondations, les sécheresses quant à elles impactent la ressource en eau et le retrait-gonflement des argiles... Ces évolutions s'accompagnent d'une augmentation de la probabilité d'événements concomitants, comme une vague de chaleur et une sécheresse estivale simultanées, qui renforcent par exemple le risque incendie.

Ces changements s'inscrivent dans un contexte régional déjà marqué par de fortes pressions anthropiques. L'Île-de-France concentre sur seulement 2 % du territoire national près de 12 millions d'habitants, avec Paris, ville la plus dense d'Europe. La région est marquée par de fortes disparités territoriales et socio-économiques, qui accentuent les inégalités d'exposition aux risques climatiques. L'imperméabilisation des sols, la fragmentation des habitats et la pollution sont autant de contraintes qui fragilisent les écosystèmes et limitent la capacité des milieux à amortir les impacts climatiques. Malgré la présence de vastes espaces agricoles, forestiers et naturels qui couvrent les trois quarts du territoire, les villes denses sont particulièrement sujettes à l'effet d'îlot de chaleur urbain : lors des canicules, les températures nocturnes à Paris peuvent atteindre une différence de 10° C par rapport aux zones rurales dans une configuration extrême de canicule comme celle de 2003. L'absence d'espaces verts ou de couvert végétal dans certains espaces renforce ce phénomène, tandis que les forêts, les trames vertes et les



Orage de grêle du 7 septembre 2024. © Gabrielle Huart

zones humides constituent des leviers indispensables pour atténuer et s'adapter à ces effets du changement climatique.

L'Île-de-France est d'ores et déjà confrontée aux effets du changement climatique. Les territoires ruraux mais en particulier les territoires de la petite couronne apparaissent vulnérables en raison de la combinaison d'une forte densité urbaine, d'inégalités socio-territoriales marquées, d'un niveau élevé de minéralisation et d'une carence en espaces de nature. Parallèlement, les espaces agricoles, forestiers et naturels subissent, en plus des pressions liées à l'urbanisation, à l'artificialisation des sols et à la fragmentation des habitats, les effets de la hausse des températures et des modifications du régime hydrologique, à l'origine d'épisodes plus fréquents de sécheresses et d'inondations. Les projections climatiques indiquent que ces phénomènes extrêmes devraient s'intensifier au cours des prochaines décennies, avec une ampleur qui dépendra largement des trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre et des efforts engagés en matière d'atténuation et d'adaptation (cf. TRACC p. 17).



Les mouillères sont des zones en eau temporaires présentes dans les espaces cultivés. Rares en Île-de-France, elles font partie des milieux patrimoniaux. Elles abritent notamment une flore spécifique dont le maintien requiert un travail du sol qui empêche la fermeture du milieu. Elles sont particulièrement vulnérables au changement climatique qui accentue leur dessèchement et entraîne leur disparition à terme. © Olivier Renault

LA BIODIVERSITÉ FRANCILIENNE FACE AUX EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les états de santé de la biodiversité (Johan *et al.*, 2026) rappellent que la biodiversité d'Île-de-France connaît un déclin important depuis plusieurs décennies, lié à l'accumulation de pressions anthropiques. Le changement climatique ne constitue pas une pression supplémentaire isolée : il exacerbe les pressions existantes telles que la perte d'habitats, la fragmentation écologique, l'homogénéisation des paysages et le déclin des populations d'espèces. En raison de cette synergie, il est difficile d'isoler l'influence spécifique du changement climatique sur la biodiversité.

De manière globale, entre un quart et un tiers des espèces évaluées dans les Listes rouges franciliennes sont aujourd'hui menacées. La destruction et la dégradation des habitats demeurent les causes principales de cette érosion, notamment par l'artificialisation des sols. L'Île-de-France se caractérise par une densité humaine et d'infrastructures (bâti, transport...) exceptionnelle, concentrant une part importante de la population nationale sur une surface restreinte. Cette urbanisation massive s'est traduite par la disparition ou la forte régression de nombreux habitats naturels et semi-naturels à forte valeur écologique. Les différents rapports produits par l'ARB îdF soulignent notamment le déclin prononcé de certains milieux tels que les landes, les tourbières, les prairies humides, aujourd'hui réduits à des fragments isolés, souvent insuffisants pour maintenir des communautés biologiques fonctionnelles (Johan *et al.*, 2026 ; Muratet, 2016 ; Zucca *et al.*, 2019).

En milieu agricole, la biodiversité a fortement souffert de la simplification écologique des paysages marquée par la régression des bosquets, des haies, des arbres isolés, des mares, des prairies permanentes et de l'agrandissement des parcelles, conséquence du remembrement mais également de l'intensification des pratiques, de la spécialisation des systèmes de culture et de la mécanisation de l'agriculture. En conséquence, sur dix espèces d'oiseaux spécialistes de ces milieux, six sont en déclin et aucune ne voit ses effectifs augmenter entre 2001 et 2025 en Île-de-France (ARB îdF). On constate également un déclin des papillons de jour et des plantes spécialistes agricoles (Auvert *et al.*, 2011 ; Dewulf and Houard, 2016) traduisant un appauvrissement généralisé de ces espaces. Le changement climatique vient renforcer ces effets, en modifiant les conditions climatiques locales et la disponibilité des ressources : sécheresses et stress hydrique, précipitations extrêmes, gelées tardives...

En milieu urbain, le réchauffement climatique est amplifié par le microclimat artificiel des villes, plus chaud et plus sec que les zones environnantes. Il soumet la flore à de multiples stress : hausse des températures, irrégularité des précipitations, sécheresses répétées et arrivées de nouvelles espèces pathogènes. En France, dans des villes comme Paris, 69 à 71 % des essences d'arbres étudiées seraient menacées d'ici 2050 (Esperon-Rodriguez *et al.*, 2022). La faune urbaine subit également des impacts : mortalité directe accrue (canicule, sécheresse) et baisse du succès de reproduction. À moyen terme, le changement climatique peut également modifier les périodes de reproduction ou de floraison et altérer certaines interactions écologiques, comme la pollinisation (Gérard *et al.*, 2020). Il favorise aussi l'expansion d'espèces exotiques envahissantes, qui trouvent dans les villes des conditions propices à leur développement.

Les milieux aquatiques présentent également des signaux préoccupants. L'augmentation des températures de l'eau, combinée à des baisses de débits estivaux pouvant atteindre localement 30 %, modifie la composition des communautés de poissons et de macroinvertébrés. Les espèces adaptées aux

eaux fraîches sont les plus pénalisées, tandis que des espèces plus thermophiles progressent, traduisant une réorganisation rapide des communautés biologiques.

De manière générale, les données naturalistes mettent en évidence une réorganisation progressive des cortèges biologiques sous l'effet du changement climatique. Il accentue la vulnérabilité des espèces les plus sensibles, notamment celles associées à des conditions fraîches ou à des milieux humides, tandis que les espèces thermophiles tendent à augmenter dans notre région. Ces redistributions ne compensent toutefois pas les pertes globales de biodiversité, cette dernière étant fortement conditionnée par la capacité des espèces à se déplacer et à accéder à des habitats fonctionnels. Dans une région dense et fortement fragmentée, cette capacité est souvent limitée.

Globalement, ces dynamiques illustrent que la biodiversité francilienne est à la fois vulnérable et en réorganisation. Sans action volontariste de préservation, de restauration et de reconnexion des milieux naturels, la capacité du vivant à s'adapter aux évolutions climatiques futures sera fortement compromise.



Le bruant jaune, en limite sud de son aire de répartition, souffre particulièrement du réchauffement des températures moyennes. © Andreas Trepte



Illustration de la maladaptation : une végétalisation de bâti avec des modules hors-sol, consommateurs de ressources à la fabrication et accueillant des espèces non-locales gourmandes en eau. © Gabrielle Huart



MALADAPTATION :

attention aux fausses solutions

Les scientifiques alertent sur les mesures de maladaptation qui désignent « les changements opérés dans les systèmes naturels ou humains qui font face au changement climatique et qui conduisent (de manière non intentionnelle) à augmenter la vulnérabilité au lieu de la réduire. » (PNACC3). Il s'agit donc de solutions souvent court-termistes, ayant un impact positif sur les émissions de carbone mais étant défavorables à la biodiversité. Par exemple, l'installation de climatiseurs en milieu urbain est une solution individuelle de rafraîchissement mais renforce l'effet d'îlot de chaleur urbain à l'échelle de la ville en rejetant de l'air chaud à l'extérieur de l'habitation. Un autre exemple qui entraîne plutôt un report de vulnérabilité dans le temps est celui des mégabassines, construites sur des terres agricoles pour stocker de l'eau en hiver en vue d'irriguer les cultures en été. Ces solutions peuvent accroître la tension sur la ressource en eau en réduisant la recharge des nappes phréatiques, participent à l'augmentation des sécheresses et portent atteinte aux écosystèmes (Calvin *et al.*, 2023). Ces pratiques, profitables à court terme, risquent d'enfermer les agriculteurs dans une spirale non durable sur le long terme. Enfin, certaines mesures d'atténuation mal conçues, comme les plantations massives d'arbres en monoculture pour capturer du carbone peuvent provoquer des effets contre-productifs pour la biodiversité. Face au changement climatique, toutes les solutions ne se valent pas : sans approche systémique, certaines réponses peuvent aggraver les vulnérabilités qu'elles prétendent résoudre.

QUELLES STRATÉGIES POUR FAIRE FACE À CES DEUX CRISES ?

Les derniers rapports du GIEC et de l'IPBES soulignent la nécessité d'agir simultanément sur deux fronts complémentaires : l'atténuation et l'adaptation. D'après le GIEC, l'atténuation regroupe toutes interventions humaines visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre ou à renforcer les puits de carbone. Elle traite des causes du changement climatique tandis que l'adaptation, elle, vise à limiter les impacts de ce dernier. Le GIEC définit l'adaptation comme « une démarche d'ajustement au climat actuel ou attendu ainsi qu'à ses conséquences, visant à en atténuer les effets préjudiciables et à en exploiter les effets bénéfiques. ». Si les bénéfices de l'atténuation se manifestent principalement à l'échelle globale, ceux de l'adaptation s'inscrivent davantage dans les contextes locaux et dépendent fortement des spécificités territoriales. Ces deux stratégies sont donc indissociables car même si des efforts importants étaient faits sur l'atténuation, et à moins d'arrêter totalement nos émissions, le climat continuerait à évoluer pendant les prochaines décennies, rendant nécessaire l'adaptation aux nouvelles conditions climatiques. De la même manière, l'adaptation seule ne permettrait pas de faire face aux conditions de vie projetées par les modélisations du changement climatique sans une réduction significative des émissions. Ainsi, la stabilisation du climat et le renforcement de la résilience des écosystèmes ne peuvent être atteintes que si l'on combine une réduction ambitieuse des émissions des GES issues des combustibles fossiles avec une transformation de nos pratiques concernant l'usage du sol, l'agriculture, l'aménagement, l'énergie...

L'enjeu est donc d'engager des stratégies intégrées, territorialisées et anticipées. Celles-ci doivent s'appuyer sur la connaissance des vulnérabilités locales, sur les capacités d'action des acteurs et sur des choix d'aménagement cohérents avec les trajectoires de sobriété et de résilience. Il ne s'agit pas seulement d'adapter nos infrastructures ou de répondre à des risques ponctuels, mais de repenser nos modèles en prenant en compte les limites écologiques et les services rendus par les écosystèmes. Ainsi, les stratégies à déployer doivent intégrer la notion de co-bénéfices. L'IPBES et le GIEC appellent d'ailleurs à éviter les approches sectorielles cloisonnées et à privilégier des actions systémiques et fondées sur la nature, pour apporter des co-bénéfices significatifs en matière de santé, de sécurité alimentaire, de gestion de l'eau, de qualité de l'air, de réduction des risques naturels et de qualité de vie, tout en favorisant la participation des acteurs locaux et une gouvernance transversale (Pörtner *et al.*, 2021b).

La TRACC : un cadre de référence pour les politiques d'adaptation en France

La France a défini une Trajectoire de Réchauffement de Référence pour l'Adaptation au Changement Climatique (TRACC) dans le cadre de l'élaboration de son troisième Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC-3) [MTE, 2025]. La TRACC fixe une trajectoire de réchauffement cohérente avec les politiques climatiques actuellement mises en œuvre et les engagements internationaux, tout en reconnaissant que la planète et le territoire national continueront de se réchauffer même si des efforts d'atténuation sont poursuivis. Concrètement, cette trajectoire projette qu'en France métropolitaine la température moyenne pourrait augmenter d'environ +2 °C d'ici 2030, + 2,7 °C d'ici 2050 et jusqu'à + 4 °C d'ici 2100 par rapport aux niveaux préindustriels si les émissions mondiales suivent leur tendance actuelle.

Cette véritable « boussole de l'adaptation » sert de socle commun aux politiques publiques d'adaptation et aux exercices de planification. Elle est inscrite au code de l'environnement depuis janvier 2026 (Décret n° 2026-23 du 23 janvier 2026 et arrêté du 23 janvier 2026) et vise à progressivement être référencée dans tous les documents de planification et sectoriels pertinents. Elle permet ainsi de donner des clés aux acteurs locaux pour évaluer la vulnérabilité de leur

territoire, planifier des réponses appropriées et définir des priorités dans tous les secteurs (urbanisme, infrastructures de transport, agriculture, biodiversité, santé...).

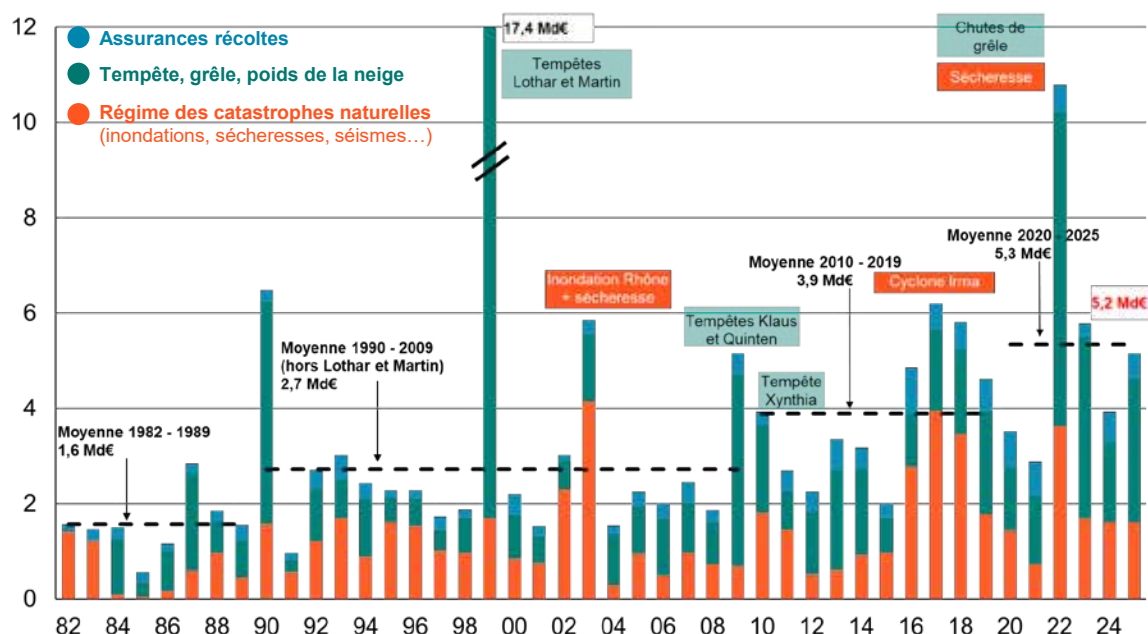
Le coût de l'inaction et l'intérêt économique de l'adaptation

S'adapter tout en continuant d'agir pour l'atténuation a un coût. Mais l'inaction expose les territoires à des pertes économiques, matérielles et écologiques encore plus grandes. Les études convergent pour montrer que les coûts liés aux impacts du changement climatique peuvent devenir substantiels et que l'inaction peut entraîner des coûts directs (dommages matériels, pertes agricoles, sinistres) mais aussi des coûts indirects (perte de productivité, instabilité économique, déclin des services écosystémiques).

La Banque des Territoires estime que le coût de ces dommages climatiques cumulés pourrait atteindre 143 milliards d'euros entre 2020 et 2050, soit + 93 % par rapport aux décennies précédentes (Dequeker *et al.*, 2026).

En plus des dommages matériels, l'inaction climatique entraîne un coût pour la santé humaine et non-humaine important : par exemple une surmortalité due aux vagues de chaleur et des impacts sanitaires associés, pour un montant évalué à plus de 20 milliards d'euros par an à l'horizon 2050-2059

COÛT DES SINISTRES CLIMATIQUES (en milliards d'euros constants 2025)



Le coût des sinistres climatiques en France est en moyenne en augmentation depuis les années 1980. En 2022, il a atteint plus de 10 milliards d'euros (sécheresses, chutes de grêle), contre une moyenne de 3,9 milliards d'euros par an sur la période 2010-2019, selon France Assureurs. Source : France Assureurs, 2026

(Timbeau *et al.*, 2023). Concernant les coûts liés à la dégradation des milieux et des services écosystémiques, ceux-ci sont difficiles à estimer. L'effondrement du puits de carbone forestier national depuis 2015 en est une illustration (maladies, sécheresses, incendies...). Il est prévu dans une étude de l'Inrae et de l'IGN une baisse de 40 % du stockage de carbone annuel par les forêts dans le scénario le plus pessimiste (RCP 8.5 « poursuite des pratiques actuelles ») à l'horizon 2050 (Roux A. *et al.*, 2020). La valeur monétaire des tonnes de CO₂ non stockées voire relarguées est trop complexe à estimer car cela dépend de plusieurs facteurs. En revanche, cela rendra les objectifs climatiques plus coûteux à atteindre et il faudra davantage réduire les émissions de carbone humaines.

Par conséquent, l'inaction est la stratégie climatique la moins rentable. L'étude de Van Vuuren *et al.* de 2010 montre que la stratégie d'adaptation est essentielle pour gérer les impacts à court et moyen terme, mais qu'elle ne suffit pas à long terme si les émissions continuent d'augmenter. L'atténuation est donc indispensable pour éviter des dommages irréversibles, tandis qu'une combinaison des deux maximise les bénéfices économiques et réduit les risques pour les sociétés et les écosystèmes.

Le GIEC soutient cette interdépendance entre l'adaptation et l'atténuation en estimant qu'il nous coûterait vingt fois plus cher de nous adapter sans atténuation que d'arriver à la neutralité carbone (GIEC, 2023).

Enfin, les travaux de l'Institut de l'Économie pour le Climat (I4CE) confirment qu'investir dans l'adaptation représente un coût, mais beaucoup moins élevé que celui de l'inaction. Leur étude basée sur les projections de la TRACC, soit +4 °C d'ici la fin du siècle, estime que les financements supplémentaires nécessaires à l'adaptation restent un « investissement rentable » au regard des dommages évités (Dépoues *et al.*, 2022). Ils ont estimé qu'un investissement d'au moins 2,3 milliards d'euros par an dans des « solutions sans regret »² serait nécessaire pour

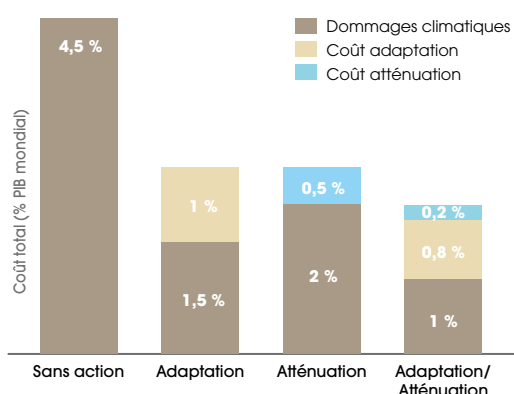
engager l'adaptation (Dépoues *et al.*, 2022). Le rapport insiste également sur l'importance du « coût de l'anticipation » : plus l'action est engagée en amont, plus elle est efficace et moins elle est coûteuse. Cela est particulièrement vrai dans les domaines de l'eau, de l'agriculture, de la forêt ou de l'urbanisme. La planification de long terme, la prise en compte du risque climatique dans les projets, la restauration des capacités naturelles de régulation (sols, végétation, cycles de l'eau) constituent des leviers peu coûteux comparés aux dépenses de réparation ou d'urgence.

Les estimations économiques sont soumises à des incertitudes importantes, en particulier liées à la difficulté à monétiser les services écosystémiques, la perte de biodiversité, les coûts sociaux, sanitaires et culturels. Cependant, la recherche tend à penser que ces coûts sont sous-estimés par les études (Josephson *et al.*, 2024).

Les politiques régionales d'adaptation en Île-de-France

Face à ces constats, la Région Île-de-France a adopté en 2022, de manière volontaire, son Plan régional d'adaptation au changement climatique (PRACC) qui vise à encourager les collectivités à intégrer l'adaptation dans leurs politiques locales. Doté d'un financement d'un milliard d'euros d'ici 2030, ce plan se structure autour de trois grands axes qui visent à renforcer la résilience des écosystèmes, à protéger la santé des populations et à sécuriser l'économie francilienne face aux effets déjà perceptibles du changement climatique. Avec plus de 60 actions déclinées sur treize leviers opérationnels, le PRACC constitue une feuille de route pour accompagner la mise en place d'actions d'adaptation locales. Il prévoit notamment le développement d'outils opérationnels comme la cartographie des abris clima-

2. Se dit des mesures d'adaptation qui offrent des bénéfices quelles que soient les évolutions climatiques.



Cette étude qui évalue l'évolution des dommages économiques liés au changement climatique et l'efficacité comparative des stratégies d'adaptation, d'atténuation, ou de leur combinaison montre que :

- Sans action, les dommages climatiques atteindraient environ 4,5 % du PIB mondial (valeur actualisée 2005–2200, taux 2,5 %).
- L'adaptation seule permet de réduire ces dommages, mais reste coûteuse (2,5 % du PIB au total, incluant coûts d'adaptation et dommages résiduels).
- L'atténuation seule réduit les impacts futurs mais nécessite des investissements importants (2,5 % du PIB).
- La combinaison adaptation + atténuation offre la stratégie la plus efficace économiquement, avec un coût total d'environ 2,0 % du PIB.

Source : Van Vuuren *et al.*, 2011



Crue de la Seine à Paris, février 2026. Les tempêtes Nils et Pedro auraient causé des dommages à hauteur de 1,2 milliard d'euros en France selon France Assureurs et la Caisse centrale de réassurance (CCR). Ces coûts concernent surtout l'ouest et le sud-ouest de la France, touchés par des crues et des inondations exceptionnelles. © Gabrielle Huart

tiques (dont les îlots de fraîcheur), ou encore la mise en place d'un Observatoire francilien de l'adaptation au changement climatique (OFACC).

Depuis le vote du PRACC, le nouveau schéma directeur de la Région Île-de-France, le SDRIF-Environnemental, a été adopté (2024). Il définit la stratégie d'aménagement de l'Île-de-France à l'horizon 2040 dans un contexte de transition écologique. Ce document prescriptif oriente le développement régional vers un modèle sobre en ressources, résilient au changement climatique et respectueux de la biodiversité.

Parallèlement, la Région et la DRIEAT mettent à jour le Schéma régional du climat, de l'air et de l'énergie (SRCAE), qui fixe les orientations pour maîtriser la demande énergétique, réduire les émissions de GES, améliorer la qualité de l'air et préparer l'adaptation du territoire.

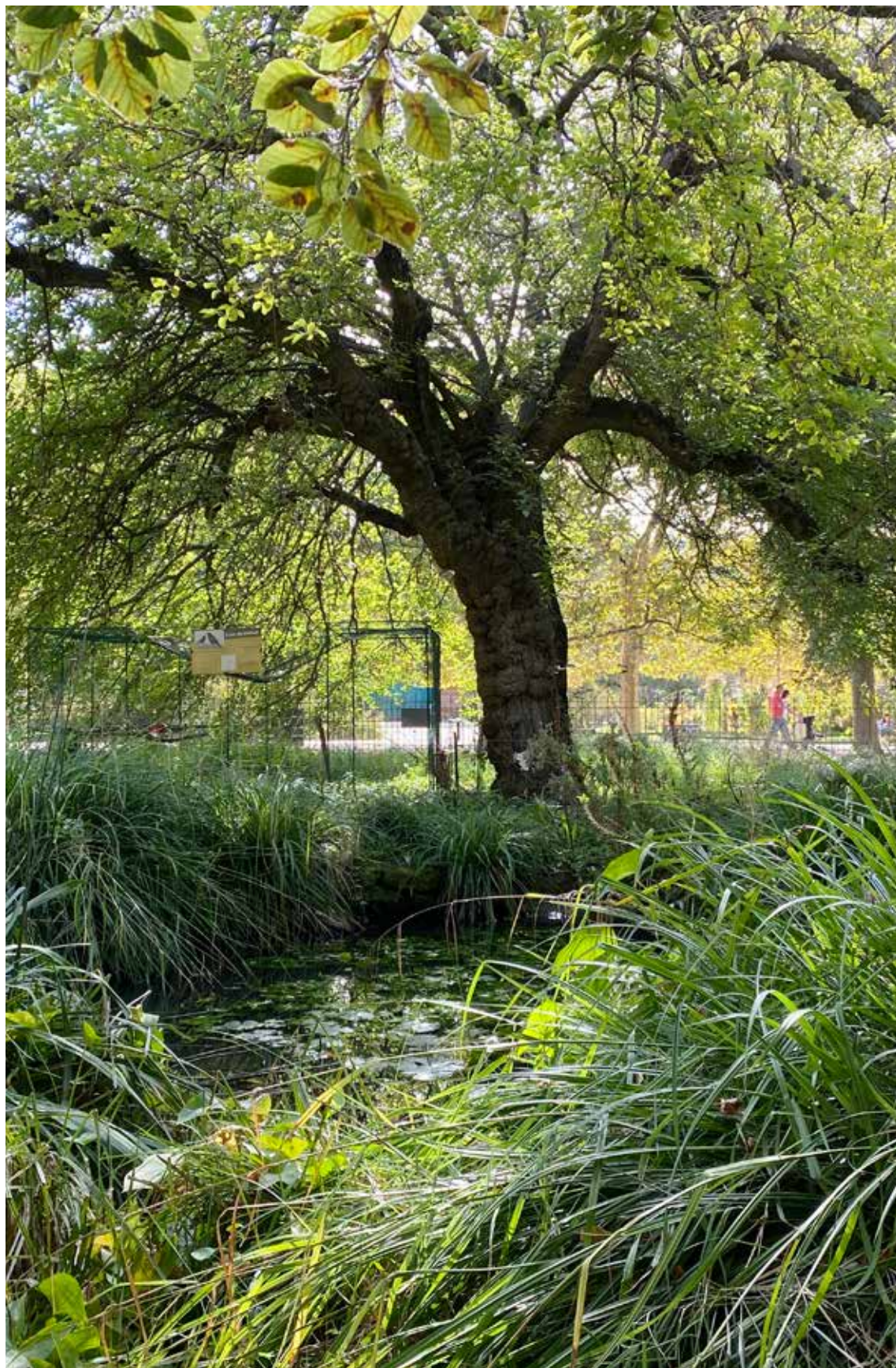
Sur le plan de la biodiversité, la Région a adopté une Stratégie régionale pour la biodiversité (SRB) 2020-2030, co-construite avec l'Agence régionale de la biodiversité (ARB îdF). Dotée d'un budget de 400 millions d'euros sur dix ans, elle poursuit quatre grandes priorités : reconnecter les Franciliens à la nature, faire de la biodiversité un atout pour l'économie, intégrer la biodiversité dans les projets d'aménagement, et restaurer les continuités écologiques. Elle se traduit notamment par des actions de renaturation urbaine, de création d'infrastructures écologiques, de soutien aux pratiques agricoles favorables

à la biodiversité et de valorisation des espaces naturels régionaux. Le Pacte agricole régional et la Stratégie forêt-bois viennent compléter cette stratégie biodiversité. Le premier accompagne la transition agroécologique, la préservation des terres agricoles et le développement de filières alimentaires locales. Le second vise à renforcer la résilience des forêts franciliennes face aux impacts du climat et à développer une gestion multifonctionnelle et durable des massifs.



À RETENIR

Les interactions entre le climat et la biodiversité supposent d'agir simultanément sur les deux fronts : réduire drastiquement les émissions de gaz à effet de serre (atténuation) et protéger/restaurer les écosystèmes pour maintenir leurs fonctions régulatrices (adaptation et atténuation). Ces constats sont partagés aux échelles internationale, nationale, régionale et locale et intégrés dans des documents structurants pour le futur des territoires. Les Solutions fondées sur la Nature (SfN) permettent précisément de répondre à ces deux défis conjoints, en favorisant la biodiversité et renforçant les écosystèmes tout en augmentant la résilience des territoires face au changement climatique.



Le jardin écologique du Jardin des plantes de Paris. © Gwendoline Grandin

2 • LES SOLUTIONS FONDÉES SUR LA NATURE

L'HISTORIQUE DU CONCEPT

Le terme de « Solution fondée sur la Nature » (SfN) commence à apparaître dans les années 2000 pour désigner les approches mobilisant le fonctionnement des écosystèmes afin de répondre à des enjeux tels que la gestion des risques climatiques ou la sécurité alimentaire. Utilisé comme un terme parapluie, il englobe divers concepts plus anciens liés à la protection, à la restauration, à la gestion de la nature, tels que l'ingénierie écologique, l'adaptation fondée sur les écosystèmes, ainsi qu'à la conception d'infrastructures comme les infrastructures vertes ou bleues (Nesshöver *et al.*, 2017).

Le concept s'est rapidement élargi aux enjeux d'adaptation au changement climatique. L'Accord de Paris de 2015, adopté à la clôture de la COP21, reconnaît implicitement le rôle des écosystèmes dans les mesures d'adaptation. Ce n'est toutefois qu'au Sommet Action Climat de l'ONU (Organisation des Nations unies) à New York, en 2019, que les SfN sont explicitement nommées et présentées comme un levier d'action face aux impacts du changement climatique. Depuis, le terme « solutions fondées sur la nature » est largement présent dans la plupart des documents relatifs à l'adaptation et à la préservation ou restauration de la biodiversité. Le 6^e rapport d'évaluation du GIEC met particulièrement en avant ces solutions, qu'il considère avec un haut degré de confiance pour réduire les risques liés au changement climatique (Calvin *et al.*, 2023).

En France, le terme de SfN apparaît pour la première fois dans la littérature scientifique en 2016, alors qu'il est présent dans la littérature internationale depuis les années 2000 (Frascaria-Lacoste *et al.*, 2025). Sur le plan institutionnel, le concept est

introduit dans le 2^e Plan national d'adaptation au changement climatique. C'est leur contribution à l'adaptation qui explique la popularité croissante des SfN. À titre d'exemple, le projet européen Life Artisan (2020-2027), coordonné par l'Office français de la biodiversité (OFB), a temporairement utilisé le terme « solution d'adaptation fondée sur la nature » afin de souligner leur utilité en matière d'adaptation. Plus récemment, le PEPR³ exploratoire SOLU-BIOD, coordonné par le CNRS et l'INRAE vise à favoriser le développement des SfN en tant que réponses transformatrices face aux changements globaux.

La popularité du concept de SfN lui a permis de se faire une place dans nombre de rapports méthodologiques comme ceux de l'Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (Onerc, 2019), dans les documents réglementaires de planification comme la 3^e Stratégie nationale pour la biodiversité (SNB-3), les PCAET (Plans climat-air-énergie territoriaux), le SRADDET (Schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires), ou encore dans des PLU (Plans locaux d'urbanisme). Dernièrement, le 3^e Plan national d'adaptation au changement climatique y consacre sa vingtième mesure :

L'OBJECTIF EST D'ACCÉLÉRER LE RECOURS AUX SOLUTIONS FONDÉES SUR LA NATURE POUR L'ADAPTATION ET D'AMPLIFIER LEUR DÉPLOIEMENT AFIN QU'ELLES SOIENT SYSTÉMATIQUEMENT UTILISÉES LORSQUE CELA EST PERTINENT. (...) (MTE, 2025).

3. Programmes et équipements prioritaires de recherche.



LE LIEN ÉTROIT DES SfN AVEC D'AUTRES CONCEPTS EN ÉCOLOGIE

Les SfN s'appuient sur des concepts déjà établis et mobilisent des connaissances ainsi que des techniques éprouvées depuis plusieurs années en écologie de la conservation ou de la restauration. Elles trouvent des applications dans de multiples domaines : restauration écologique, renaturation, protection et gestion des écosystèmes, mais aussi conception de nouveaux systèmes biologiques.

Le glossaire propose de revenir sur la définition des différents concepts qui structurent le champ des SfN : génie écologique, génie végétal, ingénierie écologique, infrastructures vertes, renaturation, restauration écologique, services écosystémiques, fonctionnement et fonctions des écosystèmes...



Exemple d'un projet de désimperméabilisation et végétalisation d'une cour d'école accompagné par la Région, l'Agence de l'eau et le conseil départemental du Val-de-Marne à Bry-sur-Marne. © Capucine Henry



LES SfN DANS LES POLITIQUES RÉGIONALES FRANCILIENNES

En Île-de-France, les stratégies et plans régionaux intègrent désormais les SfN. Elles y sont fortement plébiscitées pour mettre en œuvre l'atténuation et l'adaptation au changement climatique.

Dans le SDRIF-E, les SfN sont notamment mentionnées dans les orientations suivantes :

- OR39 : La surface et la continuité des espaces imperméabilisés doivent être limitées.

Il est nécessaire de faire progresser la surface d'espaces non imperméabilisés. À cet effet, les documents d'urbanisme doivent favoriser la désimperméabilisation en privilégiant les SfN et la végétalisation des espaces publics [...].

- OR62 : Les documents d'urbanisme favorisent, en outre, le confort d'été dans la conception des bâtiments (implantation, isolation, orientation, ombrage, volets, peinture blanche, toitures végétalisées, géothermie...) et en s'appuyant notamment sur les SfN (espaces de pleine terre, plantés ou/et en eau à proximité du bâti, limitation de l'imperméabilisation, respect des couloirs de vent...), au regard de l'augmentation prévisible des épisodes de chaleur en fréquence et en intensité.

Dans le PRACC, plusieurs actions soutiennent explicitement ces approches :

- Action 6.1 : soutenir les SfN pour lutter contre les îlots de chaleur en milieu urbain.
- Action 13.2 : faire de la protection face au changement climatique une des thématiques du Budget participatif écologique. Dès 2023, le Budget participatif écologique intégrera l'adaptation au changement climatique comme nouvelle thématique. L'objectif sera ainsi de mettre l'accent sur des projets tels que : [...] le développement de SfN, notamment en milieu urbain. (Région Île-de-France, 2022).

De la même manière, la stratégie d'adaptation au changement climatique du bassin Seine-Normandie identifie les SfN comme levier prioritaire d'action. Enfin, les SRCAE et le SRCE actuellement en révision (au moment de la rédaction de ce guide) devraient également renforcer l'intégration opérationnelle des SfN dans les politiques publiques régionales.

QU'ENTEND-ON PAR SOLUTION FONDÉE SUR LA NATURE ?

Les SfN désignent toute action qui protège, restaure ou mobilise le fonctionnement des écosystèmes, pour répondre à un enjeu majeur de société tout en générant un gain pour la biodiversité. D'après l'UICN⁴, les SfN peuvent contribuer à relever de nombreux défis sociétaux comme la prévention des risques naturels, la sécurisation de l'approvisionnement en eau, le développement socio-économique, la sécurité alimentaire, la santé et le bien-être humain, l'atténuation ou l'adaptation au changement climatique (IUCN, 2020 ; UICN Comité français, 2021).

Concrètement, les SfN peuvent se déployer dans tous les types de milieux (naturels, urbains, cultivés) et se déclinent en quatre⁵ grandes catégories d'actions :

- Protection des écosystèmes existants afin de préserver leurs fonctions écologiques et les services qu'ils fournissent. Exemples : protection de zones humides, de prairies naturelles, de haies, d'espaces de pleine terre en ville, d'espaces de nature spontanée...
- Amélioration de la gestion des écosystèmes pour mieux intégrer la biodiversité et renforcer la capacité des milieux à fournir des services. Exemples : pratiques agricoles de conservation des sols, maintien du bois mort en forêt, gestion écologique des parcs et jardins ou encore création de zones en libre évolution...
- Restauration d'écosystèmes dégradés visant à rétablir la qualité écologique des milieux et les fonctionnalités écologiques altérées. Exemples : réhabilitation de sols, restauration de zones humides pour l'expansion des crues, renaturation d'espaces minéralisés, réouverture de rivières, reconstitution de réseaux de haies...
- Création ou construction de nouveaux écosystèmes, c'est-à-dire la mise en place de milieux fonctionnels qui n'existent pas naturellement mais qui s'inspirent des processus écologiques. Exemples : toitures ou murs végétalisés, noues et jardins de pluie, bassins d'orage, dispositifs d'agroforesterie intégrés aux cultures...

Malgré la polyvalence des SfN, ce guide s'intéresse plus particulièrement à leur capacité à réduire les risques liés au changement climatique, tant en matière d'atténuation (réduction des GES dans l'atmosphère) que d'adaptation (limiter les impacts du changement climatique). Les propositions de solutions concerneront donc ces deux stratégies, le plus souvent de manière indifférenciée, puisque les mesures favorisant l'une contribuent fréquemment à l'autre.



LES SfN POUR FAIRE FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

En matière d'atténuation : les écosystèmes participent à l'atténuation du changement climatique en séquestrant le carbone dans la biomasse, les sols, le bois mort et les sédiments. Lorsqu'ils captent plus de CO₂ qu'ils n'en émettent, ils constituent des puits de carbone. En France métropolitaine, les écosystèmes terrestres représentent ainsi un puits net estimé à près de 20 % des émissions nationales de 2015, principalement grâce aux forêts. Les milieux humides peuvent stocker beaucoup de carbone localement, mais leur contribution globale reste limitée par leur faible superficie. Les terres cultivées sont globalement émettrices, tandis que les prairies constituent un puits de carbone (EFESE and CGEDD, 2019). Concrètement, les SfN pour l'atténuation peuvent consister à protéger des forêts, restaurer des zones humides, favoriser le stockage de carbone dans les sols agricoles en faisant évoluer les pratiques ou renaturer des sols artificialisés.

En matière d'adaptation : les écosystèmes contribuent également à limiter les effets du changement climatique en réduisant les températures locales, les risques d'inondation ou de sécheresse, ou encore l'érosion des sols. La biodiversité joue un rôle clé : plus un milieu est diversifié (en espèces et génétiquement), plus il est résilient face aux perturbations et plus il rend des services écosystémiques. Les SfN visant l'adaptation consistent ainsi à développer la nature en ville pour atténuer les îlots de chaleur, préserver ou restaurer des zones d'expansion de crues, ou encore diversifier les cultures afin d'améliorer leur résistance au stress climatique.

4. En 2020, l'UICN publie le standard mondial de l'UICN qui cadre la définition des SfN à travers 8 critères et 28 indicateurs et qui permet de s'assurer de la durabilité des SfN mises en œuvre (cf. Annexe 1).
5. Les SfN sont généralement classées en 3 catégories d'actions, la restauration d'écosystèmes et la création de novo-écosystèmes étant regroupées. Ce guide propose de les distinguer afin de ne pas assimiler des interventions de nature très différente, telles que la restauration d'une zone humide et la végétalisation du bâti.

Des infrastructures grises aux SfN hybrides : éléments de différenciation

Les SfN se distinguent des approches technocentrées, telles que les solutions de géo-ingénierie ou les infrastructures grises relevant du génie civil (machines de capture du CO₂ atmosphérique, digues de protection contre les inondations...), par leur capacité à générer des bénéfices pour la biodiversité, leur multifonctionnalité et leur durabilité. Alors que les solutions dites « grises » répondent généralement à un seul enjeu au prix d'une forte consommation de matériaux ou d'énergie, les SfN apportent des bénéfices à plusieurs enjeux simultanément, tout en préservant les ressources naturelles.

Un exemple parlant est celui de l'expérimentation des colonnes Morris dépolluantes, remplies de 400 l d'eau mélangés à des microalgues. Installées sur des axes routiers importants (carrefour d'Alésia à Paris et gare de Poissy), ces colonnes étaient destinées à capter CO₂, les particules fines et les oxydes d'azote. Toutefois, la lumière naturelle étant insuffisante pour assurer la croissance des algues, les dispositifs devaient être raccordés au réseau électrique pour alimenter des LED, ainsi qu'au réseau d'assainissement pour permettre des purges régulières (Arnaudis, 2018 ; Lecomte, 2017). Si les concepteurs ont évoqué des résultats encourageants, cette solution demeure coûteuse à l'investissement comme au fonctionnement (environ 20 000 € par an) [RadioFrance, 2019], peu durable et sans bénéfice pour la biodiversité. À l'inverse, un arbre urbain capte le CO₂ tout en fournissant de nombreux co-bénéfices : ombrage, rafraîchissement de l'air, captation des polluants, amélioration de l'infiltration des eaux pluviales, création d'habitats pour la faune, contribution aux continuités écologiques et amélioration globale du cadre de vie.



Expérimentation des colonnes Morris dépolluantes.
© 2026Google



Un arbre urbain offrant plusieurs services écosystémiques en plus d'améliorer la qualité de l'air.

© Gwendoline Grandin

Toutefois, les SfN peuvent être combinées à des infrastructures grises pour former des solutions hybrides, associant génie civil et génie écologique, à l'instar des façades végétalisées, des toitures végétales ou des bassins de phyto-épuration (Martin *et al.*, 2021). On observe ainsi un continuum allant des solutions hybrides, incorporant des éléments naturels au sein d'infrastructures grises, jusqu'aux solutions entièrement naturelles, où les processus et composantes écologiques sont pleinement restaurés.

Même lorsqu'elles sont qualifiées d'hybrides, les SfN doivent – par définition – impérativement être conçues de manière à générer un gain pour la biodiversité, à limiter leurs impacts sur l'environnement et à s'intégrer avec les écosystèmes environnants. Pour chaque ouvrage, il est essentiel de considérer les effets des matériaux utilisés sur les écosystèmes tout au long de leur cycle de vie : extraction, production, transformation, transport et gestion en fin de vie (déchets).

L'exemple des toitures végétalisées illustre bien la nécessité d'intégrer l'impact des matériaux artificiels. Nombre d'entre elles reposent sur l'usage de composants dont la pertinence n'est pas toujours démontrée : bacs en plastique, géotextiles, membranes non biodégradables, filets ou encore systèmes d'irrigation. Au fil du temps, ces éléments peuvent devenir des déchets et, à l'échelle de leur cycle de vie, générer des impacts environnementaux négatifs. Pourtant, il est possible de concevoir des ouvrages similaires en limitant fortement le recours aux composants artificiels et aux systèmes d'irrigation (cf. page 100).

INGÉNIERIE TRADITIONNELLE/GÉNIE CIVIL

INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE/PROCESSUS NATURELS



Infrastructures dites grises	SfN hybrides	SfN issues de l'ingénierie écologique	SfN issues de l'ingénierie écologique ou reposant sur des processus naturels existants
Aménagements conçus principalement à partir de techniques de génie civil, avec peu ou pas de prise en compte du vivant. Jouent un rôle très limité ou inexistant dans les fonctions des écosystèmes, souvent altèrent les écosystèmes	Infrastructures grises intégrant des systèmes biologiques, soit dès la conception, soit par réaménagement, permettant l'expression de processus écologiques.	Aménagement initié par l'homme mais dépendant ensuite des processus naturels. Fonctionnement écologique complet et autonome.	Principalement basées sur le fonctionnement des écosystèmes existants ou restaurés. Fonctionnement écologique complet et autonome.
Exemples Digues et murs anti-crues, cuves enterrées de stockage des eaux, bassins bétonnés ou conçus avec des bâches, filets métalliques anti-érosion...	Exemples Murs ou toitures végétalisés, certaines noues végétalisées, récifs artificiels écoconçus.	Exemples Amélioration de la naturalité de parcs urbains, création de zones humides, implantation de bandes herbeuses et de haies...	Exemples Protection d'espaces naturels, zones maintenues sans gestion, restauration d'une rivière...

Continuum allant des solutions dites « grises » aux solutions hybrides, jusqu'aux solutions reposant entièrement sur le fonctionnement d'écosystèmes existants. Illustration inspirée de Martin *et al.*, (2021).



Exemples de composants artificiels utilisés pour concevoir certaines toitures végétalisées : filets, membranes et bacs plastiques, caissettes métalliques ou encore polyester.

De gauche à droite, © Gwendoline Grandin, Marc Barra, Marc Barra

Des bénéfices économiques sur le long terme

Plusieurs travaux indiquent que les SfN présentent, dans de nombreux contextes, des coûts globaux inférieurs ou comparables à ceux des infrastructures grises, tout en générant des bénéfices économiques supplémentaires liés à leur caractère multifonctionnel et à la réduction des coûts futurs d'exploitation, d'entretien et de réparation. Une étude publiée en 2025 montre que les SfN constituent des investissements très rentables à condition d'intégrer l'ensemble des services écosystémiques rendus : en analysant 83 projets de SfN déployés dans les Alpes (forêts, rivières, zones humides, solutions urbaines), les auteurs démontrent que chaque euro investi génère en moyenne 2,80 € de bénéfices sous forme de services écosystémiques (régulation des inondations, réduction des vagues de chaleur, stockage de carbone, protection contre les aléas naturels). Ainsi, 639 millions d'euros de bénéfices ont été générés pour 225 millions d'euros de coûts, avec des retombées positives pour plus de 90 000 personnes (González-García *et al.*, 2025).

Dans certains cas, l'investissement initial peut être plus élevé, mais il peut être compensé par des économies de fonctionnement à plus long terme. À titre d'exemple, dans la commune de Douai (Hauts-de-France), où environ un quart de l'espace public est géré à l'aide de techniques alternatives de gestion des eaux pluviales, les économies réalisées sont estimées à environ 1 million d'euros par an par rapport à une gestion conventionnelle, soit une réduction des coûts de l'ordre de 30 à 40 % (Herin et Dennin, 2016).

Une efficacité qui fait ses preuves

Dans certains contextes, les SfN peinent encore à s'imposer face aux alternatives dites « grises », notamment en raison de délais de mise en œuvre perçus comme plus longs ou de doutes concernant leur capacité à réduire efficacement les risques. Toutefois, ces réserves tendent à s'atténuer à mesure que les retours d'expérience et les évaluations se multiplient. Ainsi, selon Vicarelli *et al.* (2024), 65 % des études comparatives concluent que les SfN sont plus performantes que les solutions grises pour l'atténuation des risques. Par ailleurs, aucune étude n'a mis en évidence une moindre efficacité systématique des SfN par rapport aux solutions d'ingénierie civile conventionnelles (Vicarelli *et al.*, 2024).

La restauration de la zone d'expansion des crues du Vignois est un excellent exemple d'efficacité des SfN. Avant 2019, le quartier du Vignois à Gonesse (Val-d'Oise) était régulièrement inondé par le Croult, contraint dans un lit artificialisé et bétonné. Le Syndicat mixte pour l'aménagement hydraulique des vallées du Croult et du Petit Rosne (SIAH) a alors engagé un vaste programme d'actions visant à réduire ce risque. Le projet, mené sur 12 ha, a consisté à remettre le cours d'eau dans son tracé d'origine et à créer une zone d'expansion des crues composée d'une série de bassins naturels capables de stocker jusqu'à 55 000 m³ d'eau. Depuis la fin des travaux, le quartier n'est plus inondé.



La restauration de la zone d'expansion des crues à Gonesse a permis de réduire les risques d'inondation mais également d'améliorer le cadre de vie des habitants, de renforcer la trame verte et bleue et de recréer des zones humides, habitats précieux pour la faune et la flore. © Gilles Lecuir

AMÉLIORER LA PRISE EN COMPTE DE LA BIODIVERSITÉ

Ces dernières années, le concept de SfN s'est largement diffusé et est aujourd'hui mobilisé par une grande diversité d'acteurs : élus, agents techniques, agriculteurs, aménageurs, urbanistes, écologues, forestiers, architectes, gestionnaires, entreprises... Il s'est peu à peu imposé comme un référentiel incontournable de l'action face aux crises climatiques et écologiques. Pourtant, derrière cette appropriation généralisée, un décalage persiste entre l'ambition écologique affichée et la réalité des projets mis en œuvre. Ce décalage peut notamment s'expliquer par le fait que les projets se réclamant des SfN sont portés par des corps de métier très variés, qui ne disposent pas toujours des connaissances ni des compétences nécessaires en ingénierie écologique. Ce phénomène semble particulièrement marqué en milieu urbain. À l'inverse, il apparaît moins prononcé dans les milieux naturels et aquatiques, où les projets sont plus fréquemment portés par des structures disposant d'une expertise spécifique, telles que des bureaux d'études spécialisés, des syndicats de rivière ou encore des Parcs naturels régionaux. Dans les faits, les SfN sont encore majoritairement conçues pour répondre à des enjeux de régulation (eau, température, risques), d'approvisionnement (bois, alimentation) ou de bien-être (santé, loisirs, cadre de vie). La biodiversité, pourtant présentée comme constitutive du concept, demeure souvent reléguée au rang de co-bénéfice. Plusieurs chercheurs soulignent ainsi la nécessité d'en faire un objectif à part entière, et non un effet secondaire attendu (Frascaria-Lacoste *et al.*, 2025 ; Knapp and MacIvor, 2023). Dans cette perspective, la littérature scientifique et la littérature grise formulent plusieurs recommandations pour mieux intégrer la biodiversité au sein des SfN.

S'inspirer davantage des milieux naturels pour concevoir les SfN

Ce décalage s'observe particulièrement en milieu urbain, où certains aménagements revendiqués comme SfN restent standardisés, simplifiés, voire déconnectés des dynamiques écologiques locales. Noues végétalisées composées de quelques espèces horticoles, alignements monospécifiques d'arbres, recours à des plants clonés, palettes végétales reproduites d'un site à l'autre : ces dispositifs répondent à des habitudes techniques, mais contribuent peu au renforcement de la biodiversité.

Intégrer pleinement la biodiversité dans une SfN suppose au contraire de reproduire le fonctionnement des milieux naturels. Cela implique une analyse fine des conditions pédologiques, climatiques et hydro-



La ville de Nantes a renforcé la place des végétaux locaux dans les espaces de nature le long des quais de l'Erdre.
© Gabrielle Huart

logiques propres à chaque site. Une plus grande attention doit être également portée à la diversité spécifique et génétique des espèces mobilisées (Wendling *et al.*, 2021). L'usage de végétaux d'origine locale participe à cette logique : adaptés aux conditions du territoire, inscrits dans des réseaux d'interactions écologiques co-évoluées (symbioses, pollinisation, mycorhization, chaînes trophiques), ils renforcent la résilience des plantations, des écosystèmes recréés ainsi que la pérennité des services rendus.

À titre d'exemple, dans le cadre de son programme « Oasis de biodiversité », la ville de Nantes a repensé les espaces de nature situés sur les quais de l'Erdre. Les buissons horticoles qui y étaient auparavant plantés ont été remplacés par des végétaux indigènes, issus à la fois de la pépinière municipale et de la gamme Végétal local®. Cette stratégie est également fortement soutenue et accompagnée par les Parcs naturels régionaux (PNR). Par exemple, le PNR de la Haute Vallée de Chevreuse a organisé la plantation de plus de 400 m de haies lors d'un chantier participatif à la ferme de la Matricaire, à Chevreuse (Yvelines). Le Parc fournit les plants d'origine locale (aubépine, noisetier, prunellier, sureau, charme, fusain ou encore érable champêtre) et organise les chantiers de plantation. De manière similaire, le PNR du Gâtinais français a soutenu un polyculteur installé à Pringy dans la plantation d'environ 6 km de haies favorables à la biodiversité et à la fonctionnalité écologique des paysages agricoles.



**VÉGÉTAL LOCAL ET FLORISCOPE :
deux démarches pour renforcer
la présence de végétaux locaux
dans les aménagements**



Des initiatives, comme la marque Végétal local® ont vu le jour afin de produire et de commercialiser des végétaux d'origine locale, issus de récoltes de graines sauvages et garantis sans sélection variétale. Ce label certifie une origine géographique et une diversité génétique des plants qui leur permettent de participer à la fonctionnalité écologique des milieux grâce à la co-évolution plante-faune, tout en conservant leur potentiel adaptatif vis-à-vis des changements globaux, maladies et parasites. L'ARB Île-de-France et Île-de-France Nature, en association avec le Conservatoire botanique du Bassin parisien, ont mis à disposition sur l'outil Floriscope de Plante & Cité une liste d'espèces indigènes indiquant leur disponibilité sous la marque Végétal local®. Certaines fiches espèces affichent également des critères liés à l'adaptation au changement climatique comme leur potentiel de résistance climatique en conditions chaudes et sèches, leur potentiel de rafraîchissement et leur potentiel de séquestration du carbone.

Le recours répété à des listes restreintes de végétaux (même locaux) peut conduire à une homogénéisation des aménagements, susceptible d'appauvrir la diversité biologique et de fragiliser la résilience des écosystèmes. Dans ce contexte, l'acceptation de la flore spontanée et le soutien aux processus de recolonisation naturelle apparaissent comme des leviers encore insuffisamment mobilisés. Certaines collectivités s'engagent toutefois déjà dans cette voie. À Lille, des démarches visent à mieux intégrer la dynamique spontanée de la végétation dans la gestion des espaces urbains. De son côté, la ville de Saint-Lunaire (35) fonde désormais largement la conception de ses nouveaux espaces de nature sur la flore spontanée. Si la commune peut réaliser un semis lors de la première année de travaux, il s'agit avant tout de donner un coup de pouce initial, avant de laisser la flore spontanée s'installer. Celle-ci est perçue comme l'une des meilleures chances de voir émerger des réponses végétales adaptées aux conditions climatiques futures.

Enfin, la biodiversité est fréquemment envisagée à travers le seul prisme des communautés végétales (Apfelbeck *et al.*, 2020). Une approche réellement systémique gagnerait à intégrer d'autres composantes du vivant (faune, micro-organismes, fonge) ainsi que le sol comme écosystème à part entière (Fulthorpe *et al.*, 2018 ; Molineux *et al.*, 2017). Ce changement de perspective permettrait de renforcer la cohérence écologique des SfN et d'accroître leurs bénéfices à long terme.

**À gauche : 2019, création d'une piste cyclable
à Saint-Lunaire (35) et d'un accotement sans plantation
ni semis.**

**À droite : 2024, l'accotement est totalement recouvert
d'une végétation spontanée. © Gilles Lecuir ▼**





Haie urbaine plantée puis laissée en développement spontané comme stratégie d'adaptation des espaces naturels urbains au contexte climatique futur (ville de Lille). © Gwendoline Grandin

Renforcer le recours à l'ingénierie ou génie écologique

Bien que la mise en œuvre des SfN soit censée s'appuyer sur les principes de l'ingénierie écologique, ceux-ci demeurent encore insuffisamment mobilisés dans la pratique (Frascaria-Lacoste *et al.*, 2025). Par définition, l'ingénierie écologique vise à développer des pratiques fondées sur les connaissances en écologie afin de protéger, restaurer ou gérer les écosystèmes (Barot *et al.*, 2012). Les savoirs et techniques qui en découlent s'inspirent des mécanismes qui gouvernent les écosystèmes : auto-organisation, forte diversité biologique, hétérogénéité des structures, efficacité d'utilisation de l'énergie et de la matière (Abbadie *et al.*, 2015).

L'ingénierie écologique ou génie végétal apporte ainsi un cadre scientifique, méthodologique et éthique à l'intervention sur les écosystèmes. Elle vise non seulement à mobiliser le vivant et les processus écologiques comme leviers d'action pour protéger et restaurer le vivant lui-même, mais aussi à générer des bénéfices pour les sociétés humaines, tout en limitant les impacts négatifs à l'échelle globale (selon le principe d'éviter les effets indirects ou délocalisés sur les écosystèmes).

Mobiliser de manière systématique l'ingénierie écologique permettrait de mieux intégrer les enjeux de biodiversité au sein des projets « SfN ». Elle constitue également un levier pour éviter la mise en œuvre de solutions susceptibles de générer, de manière indirecte, des impacts supérieurs aux bénéfices attendus. Cela peut notamment se produire lorsque le recours à des matériaux importés ou à des dispo-

sitifs fortement énergivores conduit à un déplacement des pressions écologiques hors du périmètre d'intervention. C'est par exemple le cas de certaines toitures ou radeaux végétalisés qui reposent sur l'utilisation d'une multiplicité de composants artificiels, ou de certains aménagements urbains faisant appel à de la terre végétale importée. En effet, cette dernière provient le plus souvent du décapage de terres agricoles, ce qui a pour effet de déplacer les impacts environnementaux vers les milieux agricoles, tout en générant des émissions de CO₂ liées à leur transport. En 2008, l'association Plante & Cité estimait à 3 millions de m³ le volume de terres végétales mobilisé en France pour des usages urbains (Vidal-Beaudet, 2018).

C'est dans cette logique que la ville de Lille mène, depuis 2015, des opérations de restauration des berges de la Deûle en mobilisant des techniques de génie écologique. Les interventions ont consisté à reprofiler les rives et à créer des zones de quiétude au moyen de peignes végétaux et de banquettes réalisés à partir de matériaux disponibles sur site. Ces aménagements permettent de limiter le batillage, de protéger les berges, de favoriser la nidification et d'offrir de nouvelles zones de ponte pour les espèces aquatiques. Les banquettes ont été conçues selon une approche « low tech », à partir de produits d'égavage municipaux complétés par des poteaux en châtaignier issus d'anciennes clôtures, implantés dans le sol vaseux afin d'en assurer la stabilisation.



Travaux de restauration écologique des berges de la Deûle à Lille, mis en œuvre selon les principes de l'ingénierie écologique. © Gwendoline Grandin



L'île Derborence en libre évolution au sein du parc Matisse à Lille. © Velvet

Penser les SfN à travers un gradient d'intervention : de la gestion écologique à la libre évolution

La qualité d'une SfN ne dépend pas uniquement de sa conception initiale, mais de la manière dont elle accompagne, ou contraint, les dynamiques du vivant dans le temps. Il n'est pas rare de voir des aménagements se revendiquant comme SfN, être gérés de façon intensive, parfois peu compatible avec les besoins des espèces mobilisées (Duffaut *et al.*, 2022). Ce décalage est particulièrement marqué en milieu urbain, où les habitudes d'entretien (tonte fréquente, taille systématique, contrôle de la végétation spontanée) restent fortement ancrées. Ainsi, il est fréquent d'observer des ouvrages de gestion des eaux pluviales régulièrement tondus, limitant leur capacité d'accueil pour la biodiversité et réduisant leur efficacité en matière d'infiltration et de ralentissement des eaux. Dans ces conditions, l'ouvrage remplit une fonction technique, mais peine à déployer son potentiel écologique. Plusieurs travaux soulignent dès lors la nécessité d'intégrer les exigences écologiques des espèces et de recourir à une gestion adaptative, en mesure de s'adapter à l'évolution des milieux dans le temps (Apfelbeck *et al.*, 2020 ; Duffaut *et al.*, 2022).

Pour aller plus loin, en matière de gestion, des questions légitimes se posent : faut-il systématiquement maintenir un contrôle actif des milieux ? Dans ce contexte, le concept de libre évolution propose une approche alternative. Il consiste à interrompre, ou à ne pas engager, d'interventions sur un milieu afin de laisser s'exprimer les processus écologiques spontanés. Plutôt que de concentrer les efforts de gestion sur certains habitats ou espèces cibles, elle invite à penser la gestion de l'écosystème dans sa globalité et selon les dynamiques écologiques. La non-gestion peut contribuer à réduire les coûts financiers et les

moyens humains liés à l'entretien, tout en renforçant la capacité d'adaptation des milieux face aux changements climatiques. Si ce concept trouve ses origines dans la gestion forestière, il tend aujourd'hui à être étendu à l'ensemble des milieux, qu'ils soient terrestres ou aquatiques, et à s'implanter jusque dans les espaces urbains. La libre évolution peut ainsi concerner aussi bien une friche urbaine, qu'une rivière ou une forêt ancienne.

À Lille, le paysagiste Gilles Clément, en collaboration avec l'artiste Claude Courtecuisse, a appliqué ce principe de libre évolution (que le paysagiste désigne sous le terme de « tiers-paysage ») au parc Matisse, situé face à la gare TGV. Ainsi est née l'île Derborence : une forêt inaccessible et livrée à elle-même sur environ 2 500 m², perchée sur un promontoire à l'allure de falaise, réalisé à partir de béton et de déblais issus du creusement de la gare.

Un site emblématique de non-intervention, cette fois en milieu naturel, est la réserve naturelle nationale de la forêt de la Massane. Cette réserve s'étend sur 336 hectares et est laissée en libre évolution depuis environ 150 ans ; certaines zones n'ont même pas connu d'intervention depuis plus de trois siècles. Cette ancienneté en fait un terrain d'étude privilégié pour la communauté scientifique, qui l'utilise comme référence pour analyser le fonctionnement des forêts anciennes. Par ailleurs, en raison de conditions climatiques plus chaudes et plus sèches que celles observées dans la plupart des hêtraies européennes, le site constitue un observatoire avancé pour évaluer les effets des changements globaux sur ces écosystèmes.

De plus en plus de structures et d'auteurs considèrent la non-gestion ou la libre évolution comme une SfN à part entière. En France, la Stratégie nationale pour les aires protégées, l'identifie comme un levier à même de renforcer la protection des éco-

systèmes et de faire évoluer la gestion des espaces protégés. Elle est également évoquée comme forme de restauration passive (et à moindre coût) dans les réflexions nationales sur le plan de restauration de la nature. Enfin, l'UICN, à travers son groupe de travail Wilderness et Nature Férale souligne que la libre évolution peut être mobilisée dans les SfN pour aider les territoires à s'adapter aux changements globaux (Cherel *et al.*, 2023).

Restaurer les connectivités écologiques : une mesure d'adaptation essentielle

L'efficacité des SfN dépend en partie de leur taille, car celle-ci conditionne les processus écologiques qu'elles peuvent accueillir et maintenir. Des espaces plus étendus offrent généralement une plus grande diversité d'habitats, ce qui favorise la présence d'un plus grand nombre d'espèces et permet le fonctionnement de cycles écologiques complets, incluant la reproduction, l'alimentation ou les déplacements. Toutefois, la taille ne constitue pas le seul facteur déterminant. L'efficacité des SfN dépend également de leur connectivité écologique, c'est-à-dire de leur capacité à être reliées entre elles et à interagir avec les espaces naturels environnants. Des SfN isolées verraient leur potentiel écologique limité.

À l'inverse, lorsqu'elles sont intégrées dans un réseau écologique, elles peuvent soutenir ou profiter aux populations d'espèces. Cette approche est particulièrement intéressante dans le cadre des opérations de restauration où la connectivité écologique facilite la recolonisation spontanée. Pour fournir des services écosystémiques à des échelles significatives, Knapp et MacIvor (2023) suggèrent ainsi de concevoir les SfN selon une approche multi-échelle, allant du site au paysage.

Cette connectivité écologique prend une importance particulière dans le contexte du changement climatique. En effet, de nombreuses espèces se déplacent progressivement vers le nord ou vers des altitudes plus élevées afin de retrouver des conditions climatiques favorables à leur survie. Ce phénomène, appelé migration climatique, se traduit par une véritable course entre le déplacement des espèces et celui des conditions climatiques. Or, la vitesse de redistribution des espèces animales et végétales reste largement inférieure à celle du déplacement des aires climatiques lié au réchauffement. Ce décalage est couramment désigné sous le terme de dette climatique. Si certaines espèces très mobiles ou à large répartition parviennent à suivre le déplacement des conditions climatiques, les espèces endémiques ou à faible capacité de



La Réserve naturelle nationale de la forêt de la Massane (Occitanie), créée en 1973 et gérée par l'Association des Amis de la Massane et la Fédération des Réserves naturelles catalanes, est l'un des sites les plus anciens et les plus emblématiques de France en matière de libre évolution. © D. Sorel/RNN MASSANE/FRNC

dispersion rencontrent davantage de difficultés. Ce retard est en outre accentué par les obstacles au déplacement liés à la fragmentation des paysages et à l'artificialisation des milieux.

Dans ce contexte, le maintien et la restauration de la connectivité écologique (notamment à travers les politiques de trame verte et bleue) apparaissent comme des mesures d'adaptation essentielles. Les projets de SfN peuvent contribuer à ces réseaux écologiques en jouant un rôle de relais, de corridor ou d'habitat, facilitant ainsi les déplacements des espèces.



DES ESPÈCES FROIDES EN REcul, DES ESPÈCES THERMOPHILES EN EXPANSION

En Île-de-France, la proportion d'espèces en déclin est nettement plus forte chez celles associées à des conditions de vie fraîches. Les insectes illustrent ce basculement : certaines espèces autrefois répandues diminuent fortement, comme la Cordulie bronzée dont la part relative d'observations au sein des données naturalistes recule d'environ un tiers en 15 ans. À l'inverse, des espèces thermophiles progressent, comme la Mante religieuse, désormais très largement établie en Île-de-France alors qu'elle était localisée à certains secteurs il y a 30 ans (Johan *et al.*, 2026). Ces évolutions traduisent un réagencement progressif des communautés biologiques face aux nouvelles conditions climatiques. Une piste d'action serait de mettre en place ou de renforcer les réseaux de microrefuges climatiques, constitués notamment de milieux forestiers, de zones humides ou d'autres habitats capables de maintenir des conditions microclimatiques plus fraîches (Ellis, 2020 ; Suggitt *et al.*, 2018).



La Cordulie bronzée (*Cordulia aenea*).
© Jean-Pierre Delapré

Des connaissances scientifiques inégaes

Ces dernières années, la littérature scientifique consacrée aux SfN a connu une augmentation particulièrement rapide. Une récente analyse bibliométrique montre que le nombre de publications est passé de 2 en 2014 à 4 020 en 2024 (Frascaria-Lacoste *et al.*, 2025). Cette dynamique de recherche demeure toutefois fortement concentrée sur le milieu urbain, qui représente près des trois quarts des études recensées. Les systèmes de gestion des eaux pluviales, les toitures végétalisées et les « forêts » urbaines figurent parmi les solutions les plus fréquemment étudiées (Aghaloo *et al.*, 2024). À l'inverse, les SfN déployées dans d'autres contextes (notamment forestiers ou ruraux) restent nettement moins étudiées. Par ailleurs, d'importantes lacunes persistent concernant leurs effets sociaux ainsi que leurs impacts réels sur la biodiversité (Frascaria-Lacoste *et al.*, 2025).

Une manière de remédier à ces limites consisterait à renforcer le suivi des projets après leur mise en œuvre. Ces suivis ne devraient pas se restreindre à l'évaluation de l'efficacité des SfN au regard des services écosystémiques initialement ciblés, mais intégrer également des dimensions écologiques, économiques et sociologiques. L'analyse des trajectoires écologiques, des coûts et des gains économiques ou encore des usages et appropriations sociales permettrait d'enrichir significativement les connaissances sur leurs effets à moyen et long terme. Dans cette perspective, le développement de projets conçus en collaboration étroite avec des équipes de recherche apparaît comme une voie prometteuse. De tels partenariats favoriseraient la production de connaissances ancrées dans des situations concrètes, tout en répondant aux attentes des scientifiques en matière de recherches appliquées aux problématiques de terrain, comme en témoignent certaines initiatives nationales telles que le programme Life Artisan ou encore le PEPR Solu-Biod.

Le projet de création de la zone tampon de Rampillon (Seine-et-Marne) illustre concrètement ce type de démarche. Situé en milieu agricole, ce site d'expérimentation a été conçu pour gérer les polluants, restaurer les zones humides et la biodiversité, et réduire les risques d'inondation. Il est le fruit d'un partenariat entre Aquil'Brie (coordination et valorisation), l'Inrae (suivi scientifique et recherche) et le syndicat mixte des Quatre Vallées de la Brie (mobilisation des acteurs et réalisation des travaux). Le projet fait l'objet d'un suivi depuis plus d'une dizaine d'années afin d'évaluer les effets de l'ouvrage sur la qualité de l'eau, la biodiversité ou encore le



Pour répondre au besoin d'augmenter le nombre de zones humides sur le bassin de l'Ancoeur, le site de Rampillon a intégré le programme démonstrateur Life ARTISAN afin de créer de nouvelles zones tampons et d'évaluer, avant et après travaux, leurs effets sur la biodiversité et la qualité de l'eau. © Erwan Cordeau

stockage du carbone. Les résultats sont significatifs : pas moins de 145 espèces différentes observées sur le site entre 2017 et 2023 et une réduction en moyenne de 30 % par an de la présence de nitrates et pesticides à l'exutoire (INRAE, 2025). Néanmoins, les porteurs de projet rappellent que pour atteindre les objectifs de qualité de l'eau de la nappe phréatique du Champigny, il faudrait qu'1 % du bassin-versant de l'Ancoeur soit en zone humide, soit environ 12 ha.

Vers de nouvelles approches mêlant les enjeux sociaux et l'écologie

L'amélioration de la prise en compte de la biodiversité ne se limite pas aux aspects techniques ; elle dépend aussi de notre capacité à identifier et dépasser certains freins culturels (habitudes d'aménagement, perceptions du beau et du propre, représentations de la nature...). L'élaboration des SfN gagnerait ainsi à s'ouvrir à des disciplines complémentaires comme la sociologie, l'anthropologie, la philosophie ou encore l'histoire (en plus de l'écologie, de l'hydrologie, de la pédologie ou du paysage). Cette interdisciplinarité permettrait de mieux comprendre les interactions entre sociétés et écosystèmes, mais aussi de rendre les projets acceptables, désirables et durables.

Selon Frascaria *et al.* (2025), une meilleure prise en compte de la biodiversité dans les SfN nécessite de repenser notre relation à la nature. Les auteurs mobilisent notamment le concept de restauration

socio-écologique, développé à la suite de la reconstruction de villes côtières après le tsunami de 2011 au Japon. Cette approche vise la réparation conjointe des écosystèmes et des sociétés humaines. Ils proposent ainsi d'adapter ces principes, intégrant des dimensions sociales et écologiques, à la mise en œuvre des SfN afin de mieux concilier bien-être humain et bénéfices pour la biodiversité. Parmi les recommandations figurent notamment la mobilisation des acteurs locaux dès les premières phases des projets (entretiens semi-directifs, ateliers participatifs, récits partagés ou jeux de rôle), afin de favoriser l'émergence de solutions co-construites, partagées et adaptées aux contextes locaux.

L'exemple de la restauration écologique de la rivière de la Bièvre à Jouy-en-Josas (Yvelines) est notamment cité pour illustrer ces nouvelles approches mêlant écologie et social. En plus des acteurs institutionnels, le projet de restauration a associé les habitants du quartier, les écoliers, les associations locales et des entreprises des environs. Chacun a pu participer à toutes les étapes du projet depuis sa conception. Les participants ont par exemple pris part à des chantiers participatifs, à des actions de nettoyage, à des animations pédagogiques, à des visites du site ou à des réunions de concertation. Les auteurs concluent que, dans ce cas précis, le projet est allé au-delà de la « simple » opération de restauration d'un cours d'eau : il a permis de construire

un projet collectif identitaire autour d'une rivière, de renforcer les liens sociaux tout en contribuant à la restauration de la biodiversité.

Dans une perspective complémentaire, Jean-Baptiste Narcy⁶, docteur en sciences de l'environnement et consultant spécialisé dans les politiques publiques de l'eau et de l'environnement, souligne que la gestion de l'eau et les projets de restauration écologique (et, par extension, les SfN) ne relèvent pas uniquement de solutions techniques. Leur réussite dépend également des dynamiques sociales, institutionnelles et politiques qui structurent les territoires (Bourdin *et al.*, 2011 ; Narcy, 2013). À ce titre, les sciences sociales jouent un rôle central pour éclairer la mise en œuvre des politiques environnementales, notamment à travers l'analyse des relations entre sociétés et nature, de la légitimité et de l'acceptabilité des politiques publiques, des conflits et jeux d'acteurs autour des ressources et des aménagements, et des processus d'accompagnement du changement dans les territoires.

6. Il est l'auteur du livre *Regards des sciences sociales sur la mise en œuvre des politiques de l'eau* et a participé à la rédaction du guide *Restauration hydromorphologique et territoires : concevoir pour négocier*.

LA PROTECTION DES MILIEUX NATURELS : UNE PRIORITÉ À NE PAS OUBLIER

Ce guide se concentre principalement sur les SfN déployables dans les milieux habités ou exploités par l'homme (agricoles, forestiers, urbains et aquatiques). Ce choix ne vise toutefois pas à minimiser les actions menées dans les milieux naturels, ni le rôle essentiel que joue leur protection. Le rapport de l'atelier co-organisé par l'IPBES et le GIEC sur Biodiversité et changement climatique rappelle que la protection des écosystèmes constitue l'un des leviers les plus efficaces pour enrayer l'érosion de la biodiversité, tout en générant d'importants co-bénéfices pour l'atténuation et l'adaptation au changement climatique (Pörtner *et al.*, 2021). À l'échelle mondiale, les surfaces protégées (environ 15 % des terres émergées et 7,5 % des océans) demeurent toutefois insuffisantes. Les auteurs estiment que ces surfaces devraient atteindre entre 30 % à 50 % pour répondre aux enjeux climatiques et écologiques.

En France, la Stratégie nationale des aires protégées (SNAP 2030) et la Stratégie nationale de la biodiversité (SNB 2030) réaffirment le rôle central des aires protégées dans la conservation de la biodiversité et l'adaptation aux changements globaux. Elles fixent notamment l'objectif de placer 30 % du territoire



Dans le bassin des Bas-Prés à Jouy-en-Josas (Yvelines), la Bièvre a retrouvé en 2025 un tracé sinueux en contrebas du musée de la Toile de Jouy dans le cadre d'un projet de renaturation porté par le Syndicat intercommunal pour l'assainissement de la vallée de la Bièvre (SIAVB). © Hervé Cardinal (SIAVB)

sous statut d'aire protégée, dont 10 % sous protection forte. À ce jour, seulement 1,6 % du territoire terrestre métropolitain (0,59 % en Île-de-France) bénéficie d'un niveau de protection forte, ce qui souligne la nécessité de renforcer les efforts dans ce domaine.

Dans le même temps, on observe ces dernières années un fort essor politique et médiatique des actions de restauration écologique, parfois au détriment de la protection des écosystèmes encore fonctionnels. Comme le souligne Seddon *et al.* (2021) les SfN sont souvent associées à des solutions visibles, telles que la plantation d'arbres, présentées comme des réponses rapides au changement climatique. Cette focalisation peut détourner l'attention de l'urgence de préserver et de connecter les écosystèmes existants, qui constituent pourtant la stratégie la plus efficace et la moins coûteuse pour maintenir la biodiversité et les services écosystémiques. La restauration écologique demeure en effet un processus long et incertain. Même lorsque les projets sont menés avec succès, les écosystèmes restaurés peinent à retrouver l'ensemble de leurs fonctions. Par exemple, une synthèse portant sur les zones humides montre que, même un siècle après des opérations de restauration, les structures biologiques et les fonctions biogéochimiques (notamment le stockage du carbone) restent en moyenne respectivement inférieures de 26 % et 23 % à celles des écosystèmes de référence (Moreno-Mateos *et al.*, 2012). Ces résultats rappellent que la possibilité de restaurer les écosystèmes ne doit ni affaiblir la priorité accordée à leur protection, ni nourrir un optimisme excessif quant à la capacité de la restauration à compenser les pertes de biodiversité (Moreno-Mateos *et al.*, 2015).

Ainsi, bien que les initiatives visant à restaurer les écosystèmes dégradés ou à renforcer l'adaptation des villes soient nécessaires, la protection des écosystèmes demeure prioritaire. La réserve des étangs de Bonnelles (Yvelines) illustre parfaitement cette idée. En 1990, la commune décide de racheter un site de 22 ha comprenant boisements, prairies, sources et roselières afin de créer une réserve naturelle volontaire, protégeant ainsi les écosystèmes menacés par un projet de golf. Pendant 25 ans, jusqu'à son classement en 2016 en Réserve naturelle régionale, la commune et le Parc naturel régional de la Haute Vallée de Chevreuse ont mené de nombreux travaux visant à restaurer la richesse écologique de cette zone humide. Cette protection a permis de maintenir de multiples services écosystémiques, tels que la prévention des inondations, l'épuration des eaux, l'alimentation des cours d'eau en période de sécheresse et le stockage du carbone.



La réserve naturelle des étangs de Bonnelles est un exemple de SfN ayant permis la protection de zones humides, écosystème précieux tant pour la biodiversité que pour l'atténuation et l'adaptation au changement climatique. © François Hardy (PNR de la Haute Vallée de Chevreuse)



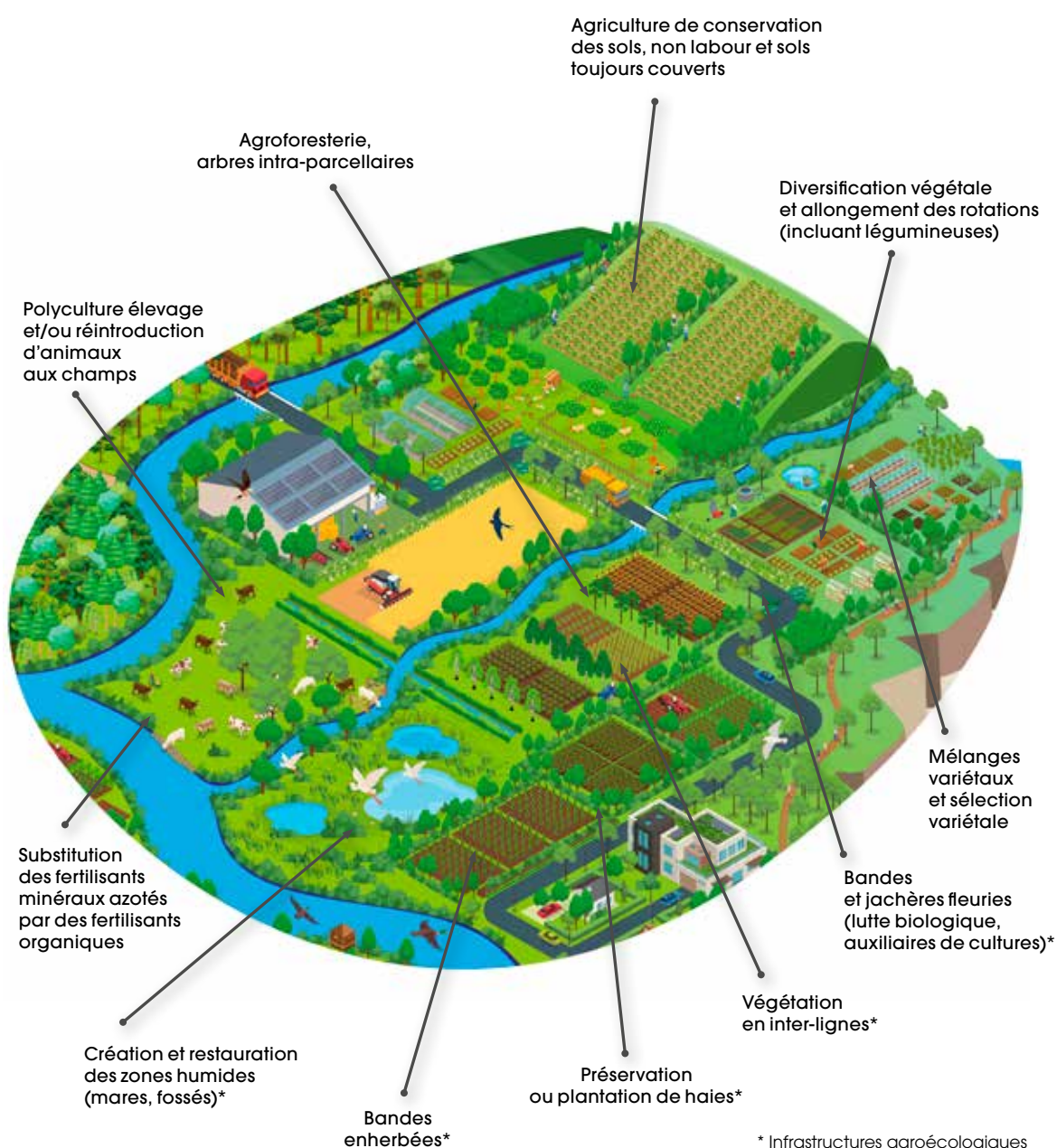
ADAPTER LES PRATIQUES DE GESTION DES ESPACES PROTÉGÉS AUX ENJEUX DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les états de santé de la biodiversité franciliennes publiés par l'ARB îdF en 2026 invitent à repenser les pratiques de gestion des espaces protégés. Ceux-ci sont désormais appelés à remplir plusieurs fonctions face aux changements climatiques : préserver les espèces les plus sensibles, offrir des espaces permettant la réorganisation des communautés biologiques, contribuer à l'adaptation et à l'atténuation, et favoriser la production de connaissances scientifiques relatives aux changements globaux. Plusieurs initiatives ont été développées pour accompagner cette évolution. Le programme LIFE Natur'Adapt (2018-2023) visait par exemple à intégrer les enjeux climatiques dans la gestion des espaces naturels, en proposant des méthodes et des retours d'expérience issus de sites pilotes. Cette dynamique se poursuit en partie aujourd'hui avec le programme LIFE Biodiv'France (2024-2032). En Île-de-France, le réseau des gestionnaires d'espaces naturels animé par l'ARB îdF contribue également à partager connaissances et retours d'expérience en la matière.

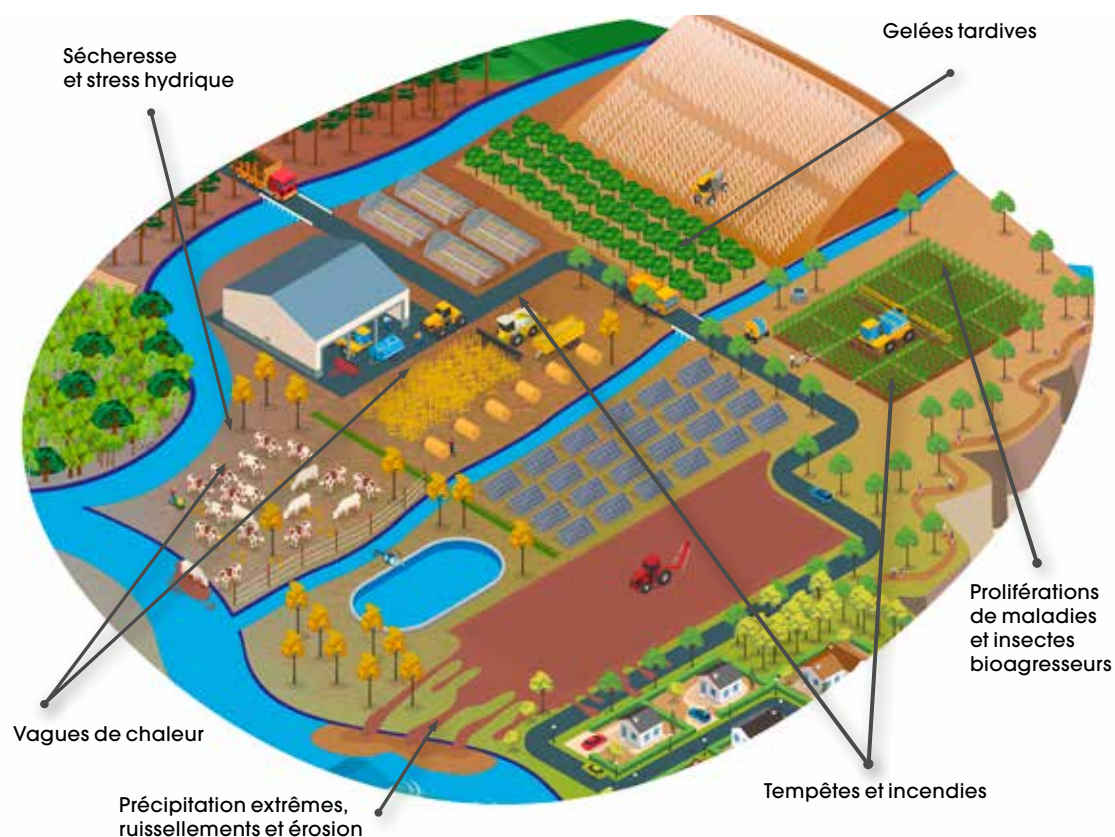


Bande fleurie séparant deux parcelles agricoles dans le Vexin. © Olivier Renault

3 • LE MILIEU AGRICOLE



RAPPEL DES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE EN MILIEU AGRICOLE



L'agriculture francilienne, qui occupe près de la moitié du territoire régional et repose principalement sur les grandes cultures (blé tendre, orge, maïs, betterave, colza), se trouve en première ligne face aux effets du changement climatique. Les observations récentes et les projections pour les prochaines décennies mettent en évidence une série de risques qui fragilisent la sécurité alimentaire, la viabilité économique des exploitations et la durabilité des sols. © Illustration - edeo-design.com

Sécheresse et stress hydrique

L'agriculture francilienne a plus que doublé ses besoins en eau depuis 2012, et ceux-ci devraient encore s'accroître de 45 % d'ici à 2050 selon les trajectoires actuelles (OCDE, 2025). Or, les projections indiquent qu'en Île-de-France la fréquence et l'intensité des sécheresses augmentent, avec un allongement du nombre de jours consécutifs sans pluie estimé à +1,7 jour par décennie (GREC francilien, 2021) et une diminution des précipitations estivales de 13 % en médiane. Ces sécheresses, accentuées par la hausse des températures estivales (+0,37 °C par décennie depuis 1950), entraînent un assèchement des sols. Dans les scénarios les plus défavorables, la région pourrait connaître d'ici la fin du siècle 5 à 7 mois de sécheresse par an. Ces conditions pourraient réduire l'eau disponible pour les cultures, provoquer des stress hydriques et diminuer les rendements, notamment pour les cultures d'été comme le maïs ou la betterave, mais aussi pour les

prairies (GREC francilien, 2022). Accessoirement, les questions du partage de l'eau avec la population et avec les autres utilisateurs de la ressource, ainsi que celle de la concentration des polluants d'origine agricole dans les captages d'eau potable devront être soulevées si les volumes des aquifères sont réduits.

Vagues de chaleur

L'augmentation du nombre et de l'intensité des vagues de chaleur constitue un facteur de stress supplémentaire. En période de canicule, la floraison et la pollinisation sont perturbées, entraînant une baisse de rendement pour les cultures légumières, le colza, etc. Les récoltes sont aussi avancées, ce qui peut affecter la qualité et le remplissage des grains pour les céréales. L'élevage subit également ces conditions, avec un stress thermique accru sur les animaux et une baisse de la productivité laitière et des conditions de pâturage.

Précipitations extrêmes et ruissellements

Si les cumuls annuels de précipitations ne montrent pas encore de tendance nette, la variabilité interannuelle s'accroît. Les projections indiquent une hausse des précipitations hivernales (+22 % en médiane), accentuant le risque d'inondations et de saturation des sols. Ces contrastes saisonniers fragilisent le cycle de croissance des cultures, augmentant les risques de pertes de récoltes lors des périodes critiques. L'épisode pluvieux de mai-juin 2016, responsable d'une crue majeure de la Seine, illustre la vulnérabilité du secteur face à ces événements.

Tempêtes et incendies

L'occurrence d'événements météorologiques violents devrait augmenter (vents et grêle), générant des pertes financières liées à des branches cassées dans les vergers, des tunnels abîmés dans les secteurs maraîchers et à des épisodes de verse en grandes cultures. En outre, depuis quelques années, les cultures de céréales deviennent de plus en plus sensibles aux feux de moissons. En 2019, le département de l'Oise avait été le département le plus touché de France, avec 3 000 ha de cultures détruites par ces

incendies démarrés par le frottement des lames des engins agricoles sur des pierres affleurantes.

Proliférations de maladies et insectes bioagresseurs

Le changement climatique accroît la pression sanitaire. La combinaison chaleur-humidité favorise l'apparition et la propagation de maladies cryptogamiques (rouille, fusariose) et d'invertébrés bioagresseurs (insectes, mollusques, etc.). Certaines espèces ou pratiques agricoles historiquement adaptées à la région deviennent moins viables. L'adaptation nécessite donc une réflexion sur les assolements, les rotations et le choix variétal afin de mieux répondre à ce climat.

Gelées tardives

Le réchauffement global entraîne un avancement du cycle phénologique des plantes. Le débourrement plus précoce de la vigne ou des arbres fruitiers accroît leur exposition aux épisodes de gel printanier, encore fréquents en Île-de-France. L'épisode de gel d'avril 2021 a montré l'ampleur des pertes possibles, avec des dommages importants pour les filières arboricoles et viticoles.



Champs de céréales dans le Gâtinais français. © Pierre-Yves Brunaud/L'Institut Paris Region

LES Sfn EN MILIEU AGRICOLE

En préambule, et avant de traiter de l'adaptation de l'agriculture au changement climatique, il faut souligner que l'agriculture en France contribue à hauteur de 18 % des émissions nationales de gaz à effet de serre (GES). L'agriculture doit par conséquent évoluer pour atténuer ses émissions et assurer sa contribution aux objectifs de décarbonation (- 46 % d'ici 2050 par rapport à 2015 selon la Stratégie nationale bas carbone - SNBC2) [The Shift Project, 2024], tout en contribuant à l'arrêt de la perte de biodiversité. Cette contribution aux émissions de GES repose majoritairement sur l'utilisation de ressources fossiles qui entrent dans la fabrication des carburants et des engrais minéraux azotés.

La littérature scientifique récente indique que les pratiques agroécologiques, c'est-à-dire fondées sur le fonctionnement écologique des agroécosystèmes, sont bénéfiques à la fois pour la biodiversité (dont font partie les innombrables et indispensables auxiliaires agricoles) et l'atténuation du changement climatique (Blaix *et al.*, 2026). Il est également démontré que ces mêmes pratiques constituent des solutions pour l'adaptation des fermes aux bouleversements qui se profilent pour la fin du siècle. Aussi, dans l'optique de faire face aux épisodes pluvieux extrêmes et aux sécheresses plus fréquentes et sévères, les agriculteurs visent à renforcer la capacité des sols et des systèmes agricoles à s'adapter aux aléas climatiques, tout en contribuant à la lutte contre l'érosion du vivant dans, et autour de leurs parcelles.

L'agriculture de conservation des sols

Certaines pratiques agricoles répondent à ces problématiques par la réduction voire l'arrêt du travail du sol ainsi que par le maintien de sols couverts en permanence. Ces pratiques, comme les techniques culturales simplifiées (TCS) ou l'agriculture de conservation des sols (ACS), limitent le recours aux engins agricoles – et donc l'utilisation de carburant – en réduisant ou en s'affranchissant du labour. Ce faisant, elles contribuent à la préservation de la biodiversité souterraine, en particulier les indispensables ingénieurs du sol que constituent les vers de terre, les bactéries et les champignons, ainsi que des services qu'ils fournissent en termes d'aération des sols et d'infiltration de l'eau en profondeur.

Le deuxième pilier de l'agriculture de conservation des sols consiste à ne jamais laisser les sols à nu en procédant notamment à un « semis sous couvert ». Cette technique repose sur l'implantation ou le maintien d'une ou plusieurs plantes de couverture à croissance rapide dans les parcelles cultivées afin de couvrir et protéger tout au long de l'année le sol

du vent, du soleil et de la pluie. Ce procédé permet également de limiter le tassement des sols par les engins, d'éviter le lessivage des éléments nutritifs, de limiter le développement des adventices, de décompacter naturellement la terre par le travail des racines après le passage des engins de récolte, de conserver l'humidité du sol au cours des périodes chaudes et d'enrichir naturellement la parcelle en matière organique, favorisant par là même la captation du carbone atmosphérique. Enfin, ces couverts intermédiaires accueillent temporairement les auxiliaires prédateurs de bioagresseurs des cultures tels qu'araignées, carabes, oiseaux insectivores nichant au sol, etc. ainsi que les organismes responsables de l'aération et du fonctionnement des sols (microfaune et macrofaune). Champignons et vers de terre concourent quant à eux de manière importante à un meilleur stockage et à une meilleure circulation de l'eau dans le sol, processus particulièrement utiles lors des événements pluvieux intenses tout comme lors des sécheresses prolongées.

Le dernier pilier de l'agriculture de conservation des sols est l'allongement des rotations culturales et la diversification des espèces cultivées (cultures associées), procédés qui permettent de lutter contre les adventices et de limiter le recours aux produits désherbants. Quand la rotation intègre des cultures légumineuses, cette technique permet également de réduire l'utilisation des engrais de synthèse, dont la production et l'utilisation sont génératrices de GES (voir page suivante).



IMPACTS DU LABOUR SUR LE SOL

Le travail du sol dégrade sa structure et détruit une partie des galeries creusées par les vers de terre anéciques, qui jouent un rôle essentiel dans l'infiltration de l'eau et la pénétration des racines en profondeur. En déstructurant les premiers horizons du sol et en enfouissant les résidus végétaux qui le protègent, le labour réduit l'infiltration de l'eau, augmente le ruissellement et favorise le détachement des particules sous l'action de la pluie comme du vent. Les sols labourés sont ainsi plus vulnérables à l'érosion hydrique et éolienne que les sols couverts de végétation (Selosse et Rafaelian, 2021). À l'échelle mondiale, les taux d'érosion des terres cultivées en labour conventionnel sont de l'ordre de 1 mm par an en moyenne, soit 10 à 100 fois supérieurs aux taux naturels de formation des sols (Montgomery, 2007). La dégradation de la porosité réduit également la capacité du sol à infiltrer et stocker l'eau, diminuant ainsi la réserve utile pour les cultures.



DES SOLS TOUJOURS COUVERTS

De manière globale, toute pratique tendant vers la restauration et la préservation de la couverture végétale des sols tout au long de l'année (cultures intermédiaires, semis direct sous couvert, végétalisation des rangs/inter-rangs, bandes et jachères fleuries, maintien de prairies, etc.) constitue un levier majeur d'atténuation et

d'adaptation au changement climatique. Ces modes de production protègent les sols de l'érosion tout en réduisant leur dessèchement, ils améliorent leur fertilité et favorisent la biodiversité auxiliaire présente au niveau du sol. Ils réduisent aussi le ruissellement en favorisant l'infiltration de l'eau et contribuent au stockage de carbone dans les sols.



Les terres laissées à nu sont davantage soumises à l'érosion par ruissellement lors des événements pluvieux. Lors des canicules, un sol nu peut atteindre une température supérieure de plus de 10 °C à celle d'un sol couvert de chaumes ou d'une interculture. La biodiversité y est quasi absente. À l'inverse, les sols toujours couverts retiennent davantage l'eau, limitent les variations de température et constituent des habitats favorables à de nombreux auxiliaires des cultures : araignées et insectes prédateurs, oiseaux nichant au sol, etc.

© Maxime Zucca, Olivier Renault



Comme toutes les plantes de la famille des légumineuses, la féverole possède la capacité de s'associer à des bactéries fixatrices d'azote. Cette association prend la forme de nodosités blanchâtres visibles sur ses racines. Lors de la décomposition de la plante, l'azote est restitué au sol sous forme assimilable, ce qui permet de se passer d'engrais azotés minéraux. © Olivier Renault

La substitution des fertilisants minéraux par des fertilisants organiques

Cette pratique constitue aussi une solution pour l'atténuation des émissions de GES issus de l'agriculture et pour l'adaptation de cette dernière au changement climatique. En effet, la fabrication des engrais minéraux azotés repose sur l'utilisation de gaz naturel, et leur acheminement sur de longues distances requiert l'utilisation de carburant. Enfin, leur utilisation par les plantes n'est pas optimale et les excédents non consommés sont réémis sous forme de protoxyde d'azote, l'un des trois principaux gaz à effet de serre avec le dioxyde de carbone et le méthane (environ 60 % du protoxyde d'azote est émis via les champs fertilisés, fumiers et autres sources agricoles) [Thompson *et al.*, 2019 ; Tian *et al.*, 2020]. Pour réduire l'impact des engrais minéraux sur leur santé et sur celle des milieux naturels, les agriculteurs et en particulier les agriculteurs en bio (Cisowski *et al.*, 2025), les remplacent par des engrais organiques de deux manières différentes : par la réintroduction d'animaux aux champs et/ou par l'introduction de légumineuses dans les rotations ou en cultures associées. Dans le premier cas, les animaux fertilisent les sols avec leurs déjections (on parle de transfert de fertilité), tout en concourant au tallage⁷ des céréales et à la destruction des éventuels couverts d'intercultures. Dans le second cas, les légumineuses bénéficient d'une association naturelle avec des bactéries symbiotiques, les *Rhizobium*, pour fixer l'azote de l'air. Elles redistribuent cet azote par des relations mycorhiziennes⁸ avec les autres plantes, mais surtout par la décomposition des parties non récoltées. Les trèfles, les luzernes, les lentilles, les pois, les féveroles, les haricots, etc. font partie de cette catégorie de plantes que l'on qualifie parfois d'engrais verts. Démocratisés pour les grandes cultures, les principes évoqués dans cette section s'adaptent dorénavant au maraîchage, à la viticulture et à l'arboriculture.

7. Production de tiges supplémentaires à partir du collet de la plante pour former une touffe dense. Le tallage est recherché dans la production des céréales puisqu'il permet de multiplier le nombre d'épis.
8. De nombreux champignons forment une association symbiotique avec les racines des plantes appelée mycorhize (du grec ancien myco, « champignon » et rhiza, « racine »). L'intérêt de cette association réside dans le fait que les filaments produits par les champignons coûtent cent fois moins d'énergie à fabriquer qu'une racine végétale. Ainsi, le champignon explore le sol à l'aide d'un réseau de filaments très dense, il y puise des éléments minéraux et de l'eau, qu'il troque avec la plante en échange de sucre issu de la photosynthèse.

Les infrastructures agroécologiques

Outre les adaptations de pratiques déployées au sein des parcelles agricoles, de nombreux agriculteurs développent des actions en dehors de ces dernières, en implantant et en entretenant des infrastructures agroécologiques : haies, bosquets ou arbres isolés, alignements de trognes, fascines, bandes enherbées inter- ou intraparcellaires, zones humides (mares et mouillères), ripisylves, fossés et talus enherbés, zone sableuses, tas de bois, murets et tas de pierres, etc. Les zones humides, points d'eau, ripisylves et fossés peuvent jouer un rôle dans l'adaptation des territoires au changement climatique. Les zones humides stockent les excédents d'eau et les restituent lors des sécheresses. Les fossés, pour peu qu'ils soient enherbés et sinueux, freinent la vitesse d'écoulement des eaux de pluie tout en permettant leur infiltration localement avant que l'eau ne circule dans les parcelles agricoles (entraînant leur érosion) ou ne ruisselle dans les espaces urbanisés en aval. Les ripisylves – ou forêts de bords de cours d'eau – atténuent les inondations par débordement et réduisent également l'érosion des berges tout en limitant le lessivage des intrants vers le cours d'eau. Parmi les infrastructures agroécologiques, l'arbre, sous toutes ses formes, joue un rôle tout particulier en matière d'adaptation au changement climatique. Comme en milieu urbain, ses rôles sont multiples :

- les arbres permettent le stockage du carbone à long terme et l'amélioration de la fertilité des sols : le carbone, capté dans l'air par la photosynthèse, ainsi que l'azote sont restitués au sol par la chute des feuilles et le renouvellement des racines. Ces propriétés augmentent la teneur en matière organique des sols, leur capacité à stocker l'eau et leur stabilité ;
- ils créent localement un microclimat plus frais et ombragé bénéfique aux animaux et aux cultures en cas de fortes chaleurs. Au sein des haies, ils jouent aussi le rôle de brise-vent, régulant la température et la vitesse du vent, réduisant l'évapotranspiration et l'effet asséchant mais aussi le risque de verse ou l'érosion éolienne sur une distance équivalente à 15 à 20 fois leur taille, soit sur plusieurs centaines de mètres ;
- alignements d'arbres et bandes enherbées contribuent à l'amélioration et la conservation des sols et à la lutte contre l'érosion en cas de fortes précipitations : le réseau de racines retient la terre, particulièrement dans les pentes (on parle quelquefois de « mesures naturelles de rétention des eaux »). Les racines profondes des arbres sont également capables d'aller chercher l'eau et les minéraux en profondeur, là où les cultures ne peuvent pas accéder. Elles peuvent ensuite redistribuer une partie de cette eau vers la surface (remontée hydraulique) et



L'arbre endosse de nombreuses fonctions et rend d'irremplaçables services pour l'atténuation et l'adaptation des paysages agricoles face au changement climatique. © Lucile Dewulf



Les haies et bandes enherbées accueillent des prédateurs de bioagresseurs tels que les guêpes parasitoïdes de la famille des Ichneumonidae, les larves de vers luisants (*Lampyrus noctiluca*) ou les coccinelles à sept points (*Coccinella septempunctata*). © Hemminki Johan

restituer les nutriments via la décomposition de la litière.

- à l'échelle du bassin versant, lors des fortes pluies, les haies et les arbres limitent la vitesse d'écoulement de l'eau vers les rivières et réduisent le risque d'inondation des parcelles ainsi que des habitations et équipements en aval. Ils stabilisent également les berges et filtrent une partie des nitrates et phosphates, améliorant ainsi la qualité de l'eau.

En plus des services qu'elles fournissent à l'agriculture et en matière d'adaptation, les infrastructures agroécologiques permettent d'accueillir la biodiversité et contribuent ainsi au maintien des équilibres écologiques. Elles offrent des ressources alimentaires (pollen, nectar, huiles, résines, bois), des sites de reproduction, des abris où passer l'hiver (dans les tiges creuses, sous l'écorce des ligneux ou dans la litière), des couloirs de déplacement au sein de la matrice agricole et des paysages adjacents (corridors écologiques de la trame verte et bleue). Elles sont donc une source importante d'auxiliaires (ingénieurs du sol, pollinisateurs, prédateurs de bioagresseurs), favorisant la régulation biologique et permettant de limiter le recours aux produits phytosanitaires.



BÉNÉFICES DES HAIES EN AGRICULTURE : QUELQUES CHIFFRES-CLÉS

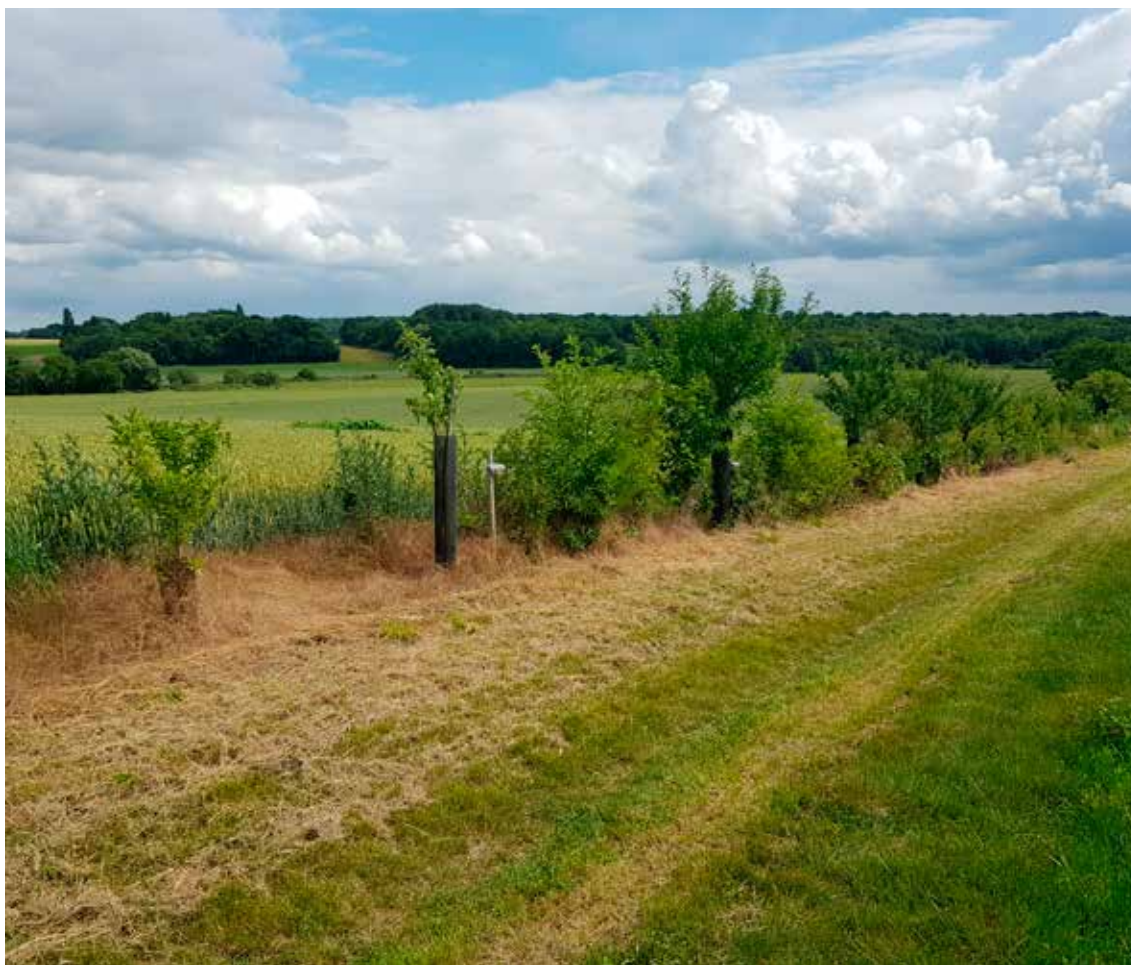
- Effet brise-vent : la protection des haies face au vent peut s'étendre jusqu'à 20 fois la hauteur de la haie, contribuant à réduire le stress thermique et hydrique.
- Gain de production : malgré une légère baisse de rendement en bordure immédiate, le gain peut atteindre jusqu'à +20 % à l'échelle de la parcelle, notamment grâce à l'amélioration des conditions microclimatiques et à la présence d'auxiliaires de culture.
- Infiltration de l'eau : elles limitent le ruissellement et les coulées de boue et augmentent la réserve en eau du sol de +5 à +10 % dans les horizons superficiels. Elles contribuent ainsi à atténuer à la fois les sécheresses et les inondations.
- Filtre naturel : elles interceptent pesticides et nutriments (azote, phosphore), limitent leur transfert vers les milieux aquatiques et peuvent réduire de 10 à 90 % la dérive des produits phytosanitaires sur une distance d'environ 3 fois la hauteur des arbres (Bernard *et al.*, 2023).

L'agroforesterie

Dans certains cas, les arbres sont complètement intégrés dans le système de culture. Ils sont alors implantés non seulement autour des parcelles, mais également en leur sein. Traditionnellement omniprésente dans tous les systèmes agricoles du monde, l'agroforesterie regroupe l'ensemble des pratiques traditionnelles et modernes associant l'arbre à des productions agricoles végétales ou animales, au cœur des parcelles ou en bordure de champs. Tous les systèmes agricoles sont concernés : cultures céréalières, élevage de plein air, maraîchage et viticulture. Ces systèmes prennent la forme de haies comportant plusieurs strates, d'arbres d'alignement, de prés-vergers, de bosquets, de vergers-maraîchers, de forêt pâturée (sylvopastoralisme), etc. Outre les bénéfices évoqués plus haut, les arbres et arbustes constituent une source de production économiquement valorisable telle que du fourrage ligneux complémentaire aux prairies de fauche ou aux pâtures notamment lors des années chaudes (haies fourragères), du bois de chauffage ou du bois

utile pour l'exploitation (piquets de clôture, litière, paillage), ainsi qu'une grande diversité de fruits (pommes, poires, merises, groseilles, cassis, sureau ou encore fruits à coques tels que noix et noisettes). Ils favorisent également la présence de champignons et produisent du nectar, contribuant ainsi à la production de miel.

Des études récentes montrent que les stratégies agroforestières sont celles qui participent le plus au stockage de carbone dans les sols, et donc à l'atténuation du changement climatique. La teneur en carbone du sol est de 19 % supérieure en moyenne dans les systèmes en agroforesterie par rapport aux parcelles en conditions similaires, mais sans arbres. L'agroforesterie surpasse également les autres stratégies pour la production agricole (hausse médiane de 35 %) ou la qualité du sol (+19 %). Ces systèmes améliorent aussi la biodiversité associée d'environ deux tiers, avec des résultats intéressants du point de vue du contrôle des bioagresseurs (+59 %) (Beilouin *et al.*, 2021 ; Lewis *et al.*, 2019).



L'agroforesterie repose sur l'introduction de l'arbre, sous toutes ses formes, dans et autour des parcelles agricoles. Ici, une haie fruitière en Essonne. © Agrof'ile

La polyculture-élevage

Les systèmes de polyculture-élevage réintègrent les animaux sur l'exploitation. L'Île-de-France n'a jamais été une véritable région d'élevage en raison de ses terres très productives, favorables aux grandes cultures, mais la mécanisation et les engrais minéraux ont peu à peu fait disparaître les animaux qui travaillaient dans les fermes (traction animale, transport de personnes et de marchandises, etc.). Outre son utilité pour la réduction de l'usage des engrais minéraux, pour la destruction des couverts d'interculture ou pour le tallage des céréales (voir plus haut), le retour des animaux aux champs permet d'introduire un autre élément important de l'adaptation de l'agriculture au changement climatique : la prairie. Ce milieu présente un intérêt largement démontré pour l'accueil de la biodiversité (notamment les auxiliaires agricoles) ou la production de fourrage.

Les prairies – plus particulièrement les prairies permanentes – sont aussi un atout dans la lutte contre l'érosion des sols dans la mesure où elles sont toujours couvertes par de la végétation herbacée. Elles ont une fonction épuratrice en limitant le lessivage de l'azote par les pluies et en diminuant le transfert des produits phytosanitaires par ruissellement vers les espaces non cultivés. Les prairies inondables participent à la réduction des inondations dans les zones périurbaines : lors des forts événements pluvieux, elles forment un champ d'expansion des crues qui réduit la vitesse de l'eau courante, qui lui permet de s'étaler puis de s'infiltrer lentement dans le sol. Enfin, les prairies permanentes jouent un rôle important dans le stockage du carbone (INRA, 2019). À ce titre, elles constituent un outil de l'atténuation et de l'adaptation au changement climatique.



Le retour des animaux aux champs constitue un atout majeur pour l'atténuation et l'adaptation au changement climatique dans la boîte à outils des agriculteurs. © Olivier Renault



La prairie, un élément essentiel pour le stockage du carbone. © Olivier Renault



STOCKAGE DU CARBONE ET BÉNÉFICES AGRICOLES

L'initiative internationale dite du « 4 pour 1000 » vise à augmenter chaque année de 0,4 % le stock de carbone organique des sols, notamment dans les 30 à 40 premiers centimètres. Cet objectif repose sur la mise en œuvre de pratiques agricoles durables et économiquement viables contribuant à la restauration des sols.

À l'échelle mondiale, la généralisation de ces pratiques pourrait permettre de séquestrer jusqu'à 1 gigatonne de carbone par an dans les sols agricoles, soit environ 10 % des émissions anthropiques de CO₂, et ainsi contribuer à l'atténuation du changement climatique. Le coût social évité associé à cette contribution est estimé à environ 600 milliards de dollars par an, sur la période 2020-2050 (Larbodière *et al.*, 2020). Au-delà de ces enjeux, les pratiques favorisant le stockage de carbone dans les sols génèrent des co-bénéfices directs pour les exploitations agricoles, qui constituent un levier central des SfN en agriculture. L'augmentation du carbone organique est généralement associée

à une amélioration de leur fertilité, de leur structure et de leur capacité de rétention en eau, renforçant ainsi les services écosystémiques indispensables à la production agricole. Selon les estimations de Larbodière *et al.* (2020), atteindre les objectifs de « 4 pour 1000 » pourrait contribuer à :

- une hausse des rendements agricoles (+23,4 % pour le maïs, +22,9 % pour le blé et +41,9 % pour le riz), représentant environ 135 milliards de dollars supplémentaires par an ;
- une augmentation de la capacité de stockage de l'eau dans les sols pouvant atteindre 1,25 milliard de m³ par an, pouvant contribuer à réduire progressivement les prélèvements mondiaux destinés à l'irrigation (jusqu'à 4 %) et à générer environ 44 milliards de dollars d'économies annuelles ;
- une diminution des besoins en intrants, notamment en engrais minéraux, ainsi qu'un renforcement de la résilience des systèmes agricoles face aux aléas climatiques.

La diversification végétale et les mélanges variétaux

Depuis les années 1980, de nombreux articles scientifiques publiés en écologie ont montré que les écosystèmes les plus diversifiés étaient les plus productifs et les plus stables face aux perturbations. Les écosystèmes agricoles n'échappent pas à cette règle. Une récente synthèse de l'INRAE montre que la diversification des cultures améliore non seulement la production mais aussi la biodiversité non cultivée, ainsi que divers services écosystémiques associés tels que l'amélioration de la qualité de l'eau et du sol, ou encore le contrôle des bioagresseurs et des maladies (Tibi (coord.) *et al.*, 2022).

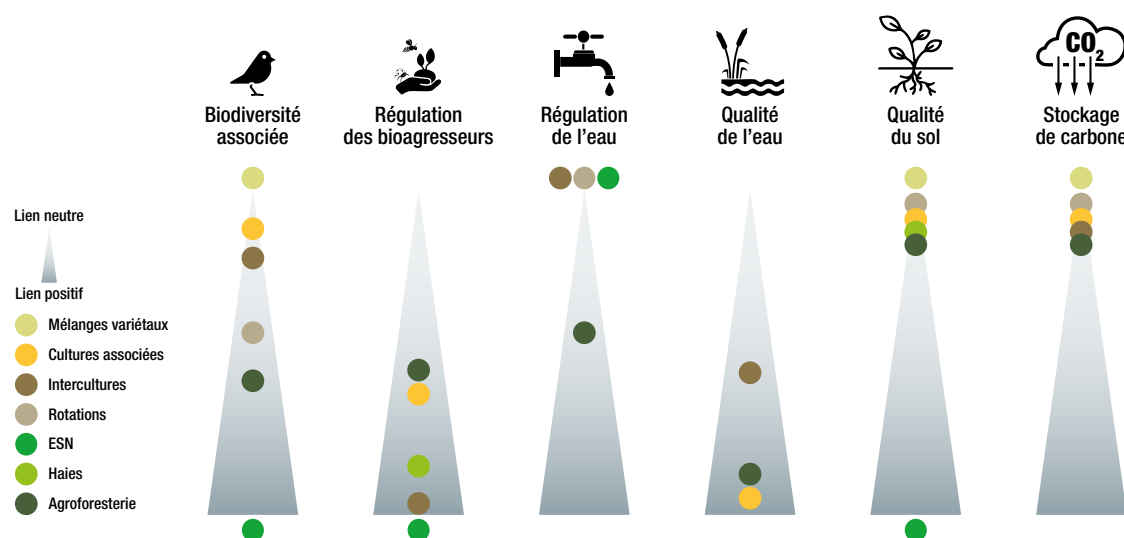
Cette diversité biologique peut se traduire à plusieurs niveaux :

- au niveau de la diversité spécifique (la diversité des espèces cultivées), en choisissant des espèces plus adaptées aux conditions climatiques à venir, en particulier en sélectionnant des espèces moins gourmandes en eau. Le sorgho et le tournesol font partie de ces espèces amenées à se développer. La diversification spécifique peut être déployée dans le temps, par l'allongement des rotations et par l'implantation de couverts d'intercultures, ou dans l'espace par la pratique des cultures associées (par exemple une céréale et une légu-

mineuse cultivées en même temps), le semis de bandes enherbées diversifiées ou l'introduction de l'arbre dans et autour des parcelles, tel qu'évoqué plus haut (agroforesterie, plantation de haies). Pour plus d'exemples, se référer au guide « Agriculture et biodiversité » de l'Agence régionale de la biodiversité en Île-de-France (Renault, 2024).

- au niveau de la diversité génétique (la diversité des gènes au sein des espèces cultivées), en implantant plusieurs variétés de la même espèce dans une même parcelle (mélanges variétaux) ou en sélectionnant des variétés plus résistantes au manque d'eau, ce qui permet de ne pas « mettre tous ses œufs dans le même panier ». Certaines variétés anciennes issues de grainothèques sont actuellement testées pour mesurer leur potentiel d'adaptation au changement climatique.

Ces solutions d'adaptation de type « gagnant-gagnant » ou « sans regret » apportent quantité de bénéfices environnementaux mais également économiques et sociaux aux agriculteurs.



Une expertise scientifique collective de l'INRAE (Tibi A., *et al.* 2022) présente les intérêts de différentes modalités de diversification végétale présentées plus haut : mélanges variétaux, cultures associées, couverts d'interculture, allongement des rotations, haies et éléments semi-naturels (ESN+), agroforesterie.

Les auteurs analysent l'intérêt de ces modalités pour la biodiversité associée aux écosystèmes agricoles, pour la régulation et la qualité de l'eau, pour la qualité du sol ou pour le stockage de carbone. L'intérêt de chaque modalité est mesuré, pour chaque « service », par son positionnement sur un axe « lien neutre » > « lien positif faible » > « lien positif maximal ». La figure montre que plusieurs pratiques ont un intérêt fort pour l'adaptation de l'agriculture au changement climatique à travers la régulation de l'eau, la qualité des sols ou le stockage du carbone, tout en présentant un intérêt pour la biodiversité associée. En cela, ces pratiques constituent de véritables solutions fondées sur la nature. D'après Tibi A. *et al.* 2022

OUTILS DE PLANIFICATION ET FINANCEMENTS

Malgré son importance pour l'alimentation, pour les paysages ou encore, comme on l'a vu, pour l'atténuation et l'adaptation au changement climatique, l'agriculture fait partie des activités qui perdent de la surface (-5 % entre 1988 et 2020 en Île-de-France) [L'Institut Paris Region et Région Île-de-France, 2025]. Une mesure importante consiste donc à garantir la pérennité de ces espaces sur le long terme. Au niveau national, cela se traduit par la loi TRACE (« trajectoire de réduction de l'artificialisation concertée avec les élus »), version assouplie de la loi « climat et résilience » votée en 2021 et qui se fixait un objectif de « zéro artificialisation nette » (ZAN) des sols à l'échelle nationale en 2050. Au niveau régional, le Schéma directeur de la Région Île-de-France - Environnemental (SDRIF-E), approuvé par décret le 10 juin 2025, assure une protection des espaces agricoles à plusieurs niveaux :

- il réduit la consommation d'espaces, notamment agricoles, en accentuant la sobriété foncière régionale ;
- il apporte une protection stricte à 37 300 ha de terres agricoles supplémentaires, correspondant aux espaces les plus fortement soumis à la pression urbaine ;
- il cartographie et protège 95 liaisons permettant le passage des engins agricoles et les accès entre sièges d'exploitation et parcelles agricoles. Ces préconisations sont ensuite déclinées de diverses manières à l'échelle locale, dans les documents d'urbanisme tels que schémas régionaux de cohérence territoriale (SCOT) et plans locaux d'urbanismes (intercommunaux) PLU(i).

Une autre mesure réside dans l'accompagnement des agriculteurs qui mettent en place des actions favorables à l'environnement et au climat. Ces mesures agroenvironnementales et climatiques (MAEC) sont financées par le second pilier de la Politique agricole commune européenne (PAC) : le Fonds européen agricole pour le développement rural (FEADER). Leur mise en œuvre est partagée entre l'État et les Régions. La Région Île-de-France est également impliquée dans un certain nombre de dispositifs d'accompagnement du monde agricole à travers sa Stratégie régionale pour la biodiversité (SRB), son Pacte agricole 2018-2030, son Plan d'avenir pour l'élevage francilien, son Plan régional pour une alimentation locale, durable et solidaire et son Plan Bio État-Région.

Depuis 2019, l'Agence de l'eau Seine-Normandie accompagne le déploiement de paiements pour services environnementaux (PSE) sur les aires d'ali-



Le PNR de la Haute Vallée de Chevreuse et le conseil général des Yvelines ont créé en 2012 une mare de stockage des eaux de ruissellement provenant du plateau agricole de la Madeleine pouvant retenir 3 500 m³ d'eau et protégeant ainsi le village de Milon-la-Chapelle situé en aval. © Gwendoline Grandin

mentation de captages (AAC) et les zones humides du bassin Seine-Normandie. Ce dispositif consiste à rémunérer les agriculteurs pour les services qu'ils rendent à la collectivité via la protection ou le maintien des fonctions bénéfiques des écosystèmes locaux (principe de service environnemental) comme la production d'une eau brute de qualité. La plupart des pratiques citées précédemment sont éligibles. D'autres collectivités, départements, intercommunalités, etc. ont mis en place des actions dédiées à l'accompagnement des agriculteurs dans des pratiques vertueuses. On peut par exemple citer :

- les projets alimentaires territoriaux (PAT). Ces projets collectifs souvent portés par des groupements de communes ont pour but de relocaliser l'agriculture et l'alimentation et de développer une alimentation durable et de qualité accessible à tous sur leur territoire en soutenant notamment les circuits courts ou les produits locaux et de qualité dans la restauration collective. La région Île-de-France compte 13 PAT en 2026 ;
- les périmètres de protection des espaces agricoles naturels et périurbains (PPEANP ou PEAN) qui sécurisent le foncier menacé par la pression urbaine tout en proposant un projet de territoire destiné à favoriser le maintien, le développement ou la reprise des activités agricoles sur le territoire.
- la zone de protection naturelle, agricole et forestière (ZPNAF) de Paris-Saclay, renommée « Terres Protégées de Paris-Saclay » en 2025, qui vise à garantir la pérennité de l'agriculture du plateau en évitant notamment la spéculation foncière, à renforcer le dialogue entre l'agriculture et le monde urbain, et à préserver la biodiversité et les espaces forestiers.

RETOURS D'EXPÉRIENCE

La ferme de Christophe Parent à Oiserry (77)

Couvrant un parcellaire de 260 ha, la SCEA Parent se situe sur la commune de Oiserry, au nord de la Seine-et-Marne. Outre Christophe Parent (qui incarne la cinquième génération d'exploitants sur ce territoire), la ferme emploie un salarié et plusieurs apprentis partagés avec un autre exploitant voisin. La production est valorisée en coopérative et un peu en vente directe (pommes de terre et oignons).

Depuis trois ans, Christophe Parent s'est lancé dans l'agriculture de conservation des sols (ACS) pour la production de ses céréales, betteraves, colza, lin, haricots verts, pommes de terre, oignons. Suite à une sollicitation de la coopérative Valfrance qui fournit des blés de qualité pour la filière McDonald's™, il a intégré un groupe d'agriculteurs pionniers mettant en place des pratiques agricoles vertueuses, comme l'ACS.

Cette évolution a été progressive et aujourd'hui, la ferme est intégralement en non-labour, avec des sols toujours couverts (intercultures mêlant légumineuses comme la féverole, et brassicacées comme le radis et la moutarde) et partiellement en semis-direct sous couvert (blé semé directement dans les repousses de colza). Un apport de compost permet aussi d'enrichir les sols et de contrebalancer la consommation de matière organique par les couverts frais. L'agriculteur a également accompagné le changement de ses pratiques par la plantation de deux haies d'un kilomètre afin de réduire la taille de deux grands ilots parcellaires.

Les objectifs visés par le passage en ACS étaient :

- de retrouver une structuration verticale des sols, et notamment de casser la semelle de labour afin de permettre à l'eau de s'infiltrer davantage et aux plantes d'explorer le sol plus profondément à la recherche d'eau et de minéraux ;
- de retrouver une meilleure portance des parcelles pour le passage des engins agricoles et de réduire l'érosion liée aux pluies de printemps ;
- de permettre, notamment grâce aux couverts automnaux, de stimuler la vie des sols ;
- de fixer du carbone.

Christophe Parent explique que son passage en ACS a été favorisé par l'accompagnement par sa coopérative et par le fait qu'il partage du matériel commun avec son voisin (réduisant ainsi les coûts d'investissement). Il a aussi bénéficié de financements régionaux pour la plantation de ses haies.

S'il n'est pas totalement confiant vis à vis des conditions climatiques à venir, il trouve que l'ACS rend son métier plus intéressant et plus valorisant dans la mesure où cela le contraint à revoir son agronomie et ses méthodes, à observer davantage ses parcelles et à y passer plus de temps, à réfléchir à l'avance à ses couverts, etc.

« ON RÉAPPREND TOUT, C'EST CE QUI FAIT LE PLUS PEUR
ET QUI EST LE PLUS VALORISANT. »

Pour en savoir plus

- <https://www.fermedelouchette.com/>



L'agriculture de conservation des sols favorise la présence des « ingénieurs du sol » (lombrics, cloportes, acariens...) essentiels pour la fertilité des sols. © Bruno Honoré

La Fabrique végétale à Lumigny-Nesles-Ormeaux (77)

Localisée en Seine-et-Marne, la Fabrique végétale est une ferme briarde de 118 ha en agriculture biologique. Elle accueille trois exploitants indépendants : un cultivateur en grandes cultures, une productrice de plantes à parfum, médicinales et aromatiques et un maraîcher. La production est majoritairement valorisée en vente directe et en circuits courts.

Après la découverte du concept d'agroforesterie lors d'un voyage au Brésil, Rémi Seingier et Claire Bertrand ont souhaité développer cette pratique sur la ferme familiale afin de limiter l'érosion des sols et d'enrichir ces derniers en matière organique pour accroître la résilience de l'exploitation sur le temps long. À partir de 2014, ils ont implanté 10 km d'alignements d'arbres et arbustes au sein d'une parcelle en pente : 2 000 arbres (19 espèces) et 9 000 arbustes (34 espèces) ont ainsi été plantés. Cette importante diversité a pour buts d'obtenir la plus longue période de floraison possible pour favoriser les pollinisateurs, une présence de fruits étalée sur l'année et un stockage accru de carbone dans le sol. Les nouvelles plantations constituent également une source de revenu complémentaire à double vocation : production de « bois d'œuvre et biomasse » et de plantes à parfum, aromatiques et médicinales valorisées sous forme d'huiles essentielles, eaux florales, etc.

De nouveaux alignements ont été mis en place en 2019. Aussi, en 2025, la Fabrique végétale comptait 15 km d'alignements d'arbres, soit 127 m linéaires d'alignements par hectare. Ces infrastructures agroécologiques permettent :

- de capter du carbone dans les arbres et dans le sol. Depuis 10 ans, le taux de matière organique au pied des ligneux de la parcelle a été multiplié par deux. Cette action contribue ainsi à l'atténuation du changement climatique ;
- de mieux gérer les excédents d'eau et les périodes sèches, ainsi que de réduire l'effet asséchant du vent sur les cultures ;
- de stabiliser les rendements agricoles de la ferme. La parcelle en agroforesterie n'est pas la plus productive mais elle offre les rendements les plus constants, ce qui permet de compenser les rendements des autres parcelles lors des mauvaises années ;
- de stimuler la vie du sol (bactéries et champignons, vers de terre, insectes, acariens, etc.) et d'accueillir pollinisateurs et prédateurs de bioagresseurs. Un partenariat avec l'association Pie Verte Bio 77 a permis de dénombrer une trentaine d'espèces d'oiseaux nicheurs en 2025 contre une vingtaine quatre ans plus tôt.



Les alignements intraparcellaires de la Fabrique végétale, en Seine-et-Marne. © Olivier Renault

La principale difficulté de la transition de la ferme vers l'agroforesterie a été de tenir compte du réseau de drainage existant dans une parcelle en pente très hydromorphe car surplombant une nappe phréatique affleurante.

L'action a été récompensée en 2020 par le 1^{er} prix des pratiques agroécologiques du concours général agricole, section « Agroforesterie - catégorie implantation », et est accompagnée par l'association Agrof'Île.

Pour en savoir plus

- Le site internet de la ferme : <https://lafabriquevegetale.fr>
- Le cycle de webinaires « S'adapter au changement climatique en Île-de-France, volet #5. Du constat à l'action : déployer les SfN dans les milieux agricoles et forestiers », présentation de Rémi Seingier : <https://www.institutparisregion.fr/environnement/sadapter-au-changement-climatique-en-ile-de-france/>
- La brochure « Les Solutions fondées sur la Nature pour la sécurité alimentaire en France de l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) » : <https://uicn.fr/solutions-fondees-sur-la-nature-repondre-aux-defis-de-lalimentation-et-de-la-biodiversite>

Les aménagements d'hydraulique douce sur le bassin versant de la Nonette par le Syndicat Interdépartemental du SAGE de la Nonette (SISN)

Le bassin versant de la Nonette s'étend sur 410 ha, à cheval sur les départements de l'Oise et de la Seine-et-Marne. Il recueille les eaux de la Nonette et ses deux affluents principaux, l'Aunette et la Lauvette. Le territoire, couvert à 90 % par des espaces ruraux majoritairement agricoles (55 %) et forestiers (23 %) s'est révélé particulièrement vulnérable aux phénomènes de ruissellement, d'érosion des sols et d'inondations à l'occasion d'événements pluvieux extrêmes, événements dont la fréquence est amenée à s'accroître avec le changement climatique. Dans le cadre de la mise en place du Schéma d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE) du bassin versant de la Nonette, le Syndicat Interdépartemental du SAGE de la Nonette (SISN) a mis en œuvre trois programmes pluriannuels d'aménagements d'hydraulique douce (un par sous-bassin versant). Ces aménagements ont pour objet de freiner les écoulements d'eau en surface, de favoriser l'infiltration de l'eau et la recharge de la nappe phréatique et de réduire la vitesse des ruissellements avant qu'ils n'atteignent les cours d'eau, contribuant ainsi à diminuer les risques d'inondation en aval ainsi que le risque de pollution des rivières. Les solutions choisies sont fondées sur la nature et jouent donc aussi un rôle bénéfique pour l'accueil de la biodiversité (corridors écologiques et réservoirs de la trame verte et bleue) et pour l'attractivité paysagère du territoire. Ces aménagements reposent sur l'implantation d'infrastructures naturelles perpendiculairement à la pente. On comptait ainsi, en 2025 :

- 7 km de haies hydrauliques et de bandes enherbées pour freiner et infiltrer l'eau ;
- 500 m de fascines sur les espaces les plus impactés par le ruissellement pour ralentir l'eau et piéger les sédiments ;
- 1,7 km de fossés et de noues captant et canalisant les écoulements ;
- 3 000 m² de bandes enherbées favorisant l'infiltration des eaux.

Les travaux ont été réalisés en concertation avec les élus, propriétaires fonciers et agriculteurs du territoire afin de tenir compte de l'activité et des contraintes de ces derniers, qui adaptent concomitamment leurs pratiques : travail du sol en travers de la pente, cultures adaptées et gestion des couverts d'interculture.

En partie financées par les agences de l'eau (le reste à charge est financé par le Syndicat), ces aménagements sont délibérément simples, rapides et répli-

cables. Plusieurs indicateurs permettent d'en suivre l'évolution ainsi que leur impacts sociaux et environnementaux, et d'adapter les pratiques de gestion pour mieux répondre aux objectifs de conservation des sols et de protection de l'eau.

L'action a été récompensée en 2024 par les Trophées de l'adaptation au changement climatique ARTISAN.



Aménagements d'hydraulique douce fascines réalisés par le Syndicat Interdépartemental du SAGE de la Nonette.
© Clara Morvan – SISN

Pour en savoir plus

- Le site internet du Syndicat Interdépartemental du SAGE de la Nonette : <https://www.syndicat-sage-nonette.fr/actions/ruissellement-erosion/>
- La page de présentation des trophées ARTISAN de l'adaptation au changement climatique, avec une vidéo et une fiche projet décrivant l'action : <https://www.trophees-adaptation-life-artisan.com/2e-edition-nationale/>

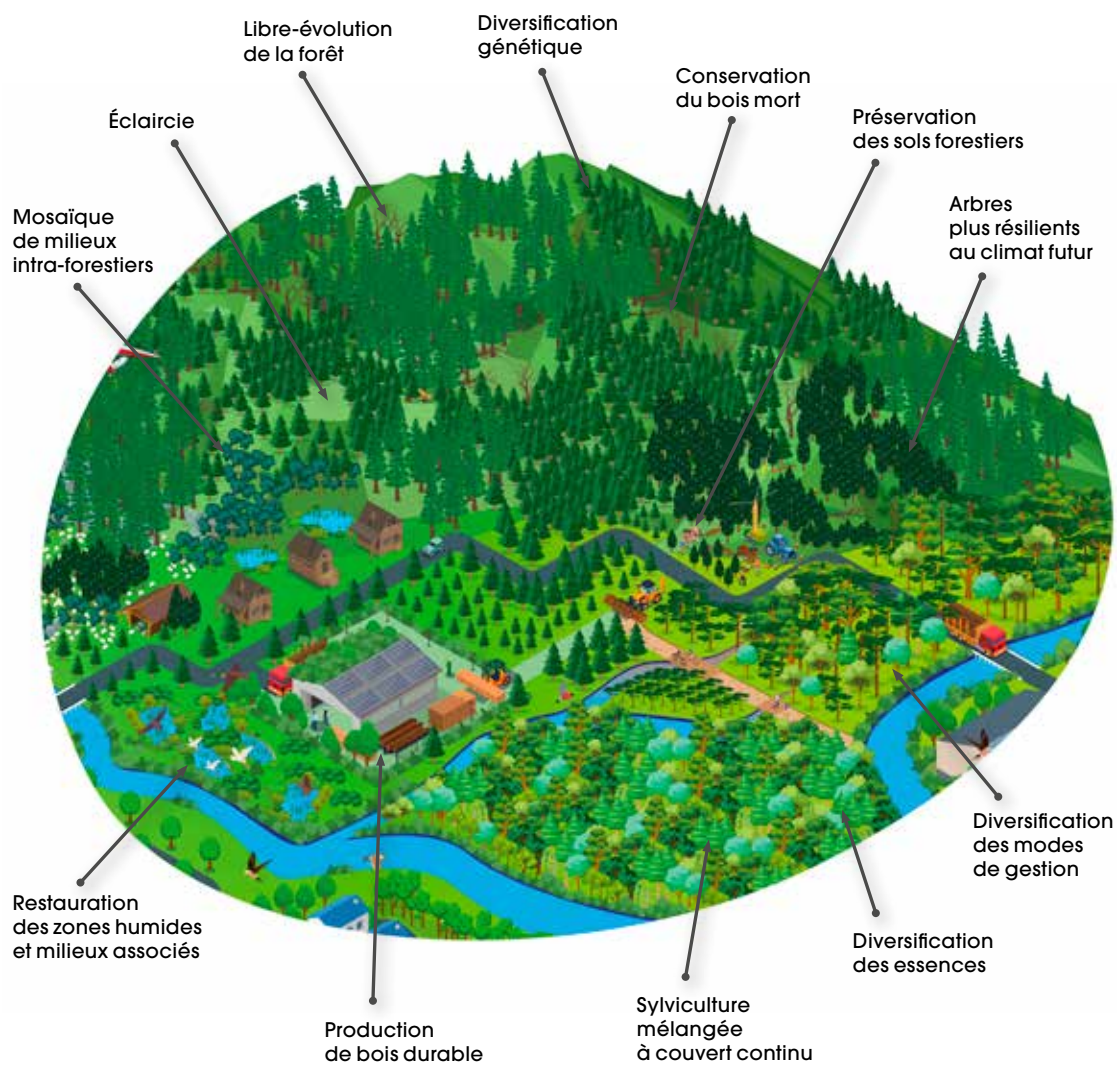


Vallée de l'Yvette à Chevreuse (78). © Gabrielle Huart



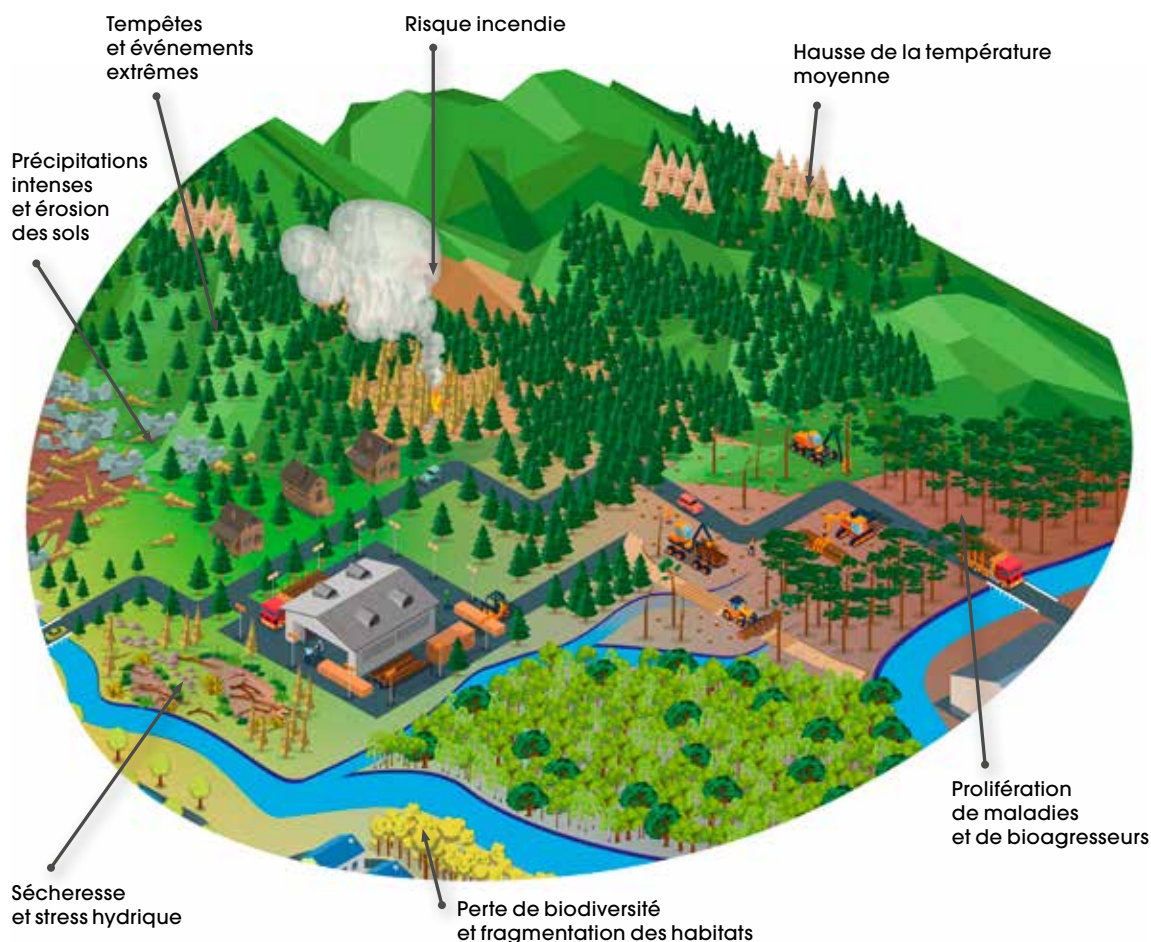
Tapis de jacinthes des bois en forêt de L'Isle-Adam (Val-d'Oise). © Maxime Zucca

4 • LE MILIEU FORESTIER



© Illustration - edeo-design.com

RAPPEL DES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE EN MILIEU FORESTIER



Le changement climatique exerce une pression croissante sur les forêts franciliennes, affectant leur résilience, leur biodiversité et leur capacité à remplir leurs fonctions écologiques, sociales et économiques. La modification des conditions climatiques affecte les habitats forestiers et les services écosystémiques qu'ils offrent, comme la régulation du cycle de l'eau ou le stockage du carbone. Selon l'Office national des forêts (ONF), certaines essences n'ont pas le temps de s'adapter à l'évolution rapide du climat et rencontrent déjà des difficultés de régénération naturelle. Les mécanismes d'adaptation des forêts sont en moyenne dix fois plus lents que le rythme actuel du réchauffement climatique. © Illustration - edeo-design.com

Risque incendie

Sécheresse des sols et canicules se combinent pour augmenter le risque « feu de forêt ». Ce risque est particulièrement élevé en Île-de-France, région caractérisée par une forte fréquentation des massifs forestiers, massifs par ailleurs fortement fragmentés par l'urbanisation et les infrastructures de transport. Dans ce contexte, et bien que les forêts franciliennes soient à 90 % composées d'essences feuillues, donc moins inflammables que les forêts résineuses, la région a été désignée « nouveau territoire du feu » par les services de l'État en 2023, à l'instar des régions du sud de la France, traditionnellement plus vulnérables à cette problématique. La Direction régionale et interdépartementale de l'alimentation, de l'agri-

culture et de la forêt (DRIAAF) a confié à la délégation régionale Île-de-France Centre-Val de Loire du Centre National de la Propriété Forestière (CNPFI) et à L'Institut Paris Region la production d'un atlas du risque « feu de forêt ». Ces travaux ont permis de cartographier et de catégoriser les massifs forestiers d'Île-de-France par niveaux de risque. Les secteurs les plus sensibles sont le sud de l'Essonne et de la Seine-et-Marne, en particulier la forêt de Fontainebleau.

Tempêtes et événements extrêmes

L'augmentation possible de la fréquence ou de l'intensité des événements extrêmes pourrait entraîner des dégâts importants dans les massifs forestiers :

chute d'arbres en cascade, mise en lumière des sols, perte de l'ambiance forestière, arrivée d'espèces opportunistes, développement des bioagresseurs et des maladies... conduisant à perturbations importantes susceptibles de modifier durablement la structure des forêts.

Précipitations intenses et érosion des sols

L'augmentation de l'intensité des précipitations favorise les phénomènes d'érosion, en particulier lorsque la couverture végétale est affaiblie par les sécheresses ou les dépérissements. Cette érosion peut entraîner une perte de fertilité des sols et réduire leur capacité à soutenir la régénération naturelle des peuplements forestiers ainsi qu'à réguler le cycle de l'eau et du carbone.

Sécheresse et stress hydrique

Les sécheresses constituent l'un des principaux facteurs de vulnérabilité des forêts franciliennes face au changement climatique. Près de 60 % des forêts d'Île-de-France sont situées sur des sols présentant une faible réserve utile en eau, ce qui les rend particulièrement sensibles aux déficits hydriques répétés (DRIAAF, 2019). L'augmentation de l'évapotranspiration et la diminution de la disponibilité en eau affectent directement la croissance des arbres et peuvent conduire à leur dépérissement prématuré. Certaines essences apparaissent particulièrement vulnérables à ces conditions, notamment le chêne pédonculé, le hêtre ou le frêne. La diminution de leur vitalité entraîne une baisse de la production de bois et une modification progressive de la composition des peuplements forestiers, avec des conséquences sur la biodiversité associée.

Perte de biodiversité et fragmentation des habitats

La raréfaction de certaines essences sensibles au réchauffement peut entraîner la disparition d'habitats spécifiques pour de nombreuses espèces animales et végétales. La fragmentation des habitats est également renforcée par l'urbanisation des lisières forestières. Par ailleurs, la diminution du nombre d'arbres âgés et du bois mort, qui constituent des habitats essentiels pour un très grand nombre d'espèces (insectes saproxyliques, oiseaux cavernicoles, chauves-souris), compromet le maintien des équilibres écologiques au sein des massifs forestiers, et par conséquent leur fonctionnalité.

Prolifération de maladies et de bioagresseurs

Le changement climatique favorise la dynamique des bioagresseurs (hanneton, processionnaires...) et des maladies (chalarose du frêne, encre du châtaignier...). Ces agents sont naturellement présents en forêt, où ils participent aux processus naturels, mais le manque ou l'excédent d'eau stressent et affaiblissent les arbres, les rendant plus sensibles aux attaques biologiques. Les températures plus élevées tout au long de l'année favorisent le cycle biologique des bioagresseurs en leur autorisant une saison de reproduction plus longue. Ces déséquilibres biologiques peuvent entraîner des mortalités importantes et modifier profondément la structure des peuplements forestiers. Ce risque est d'autant plus élevé dans les parcelles accueillant une faible diversité d'essences.

Hausse de la température moyenne

Les projections climatiques indiquent une hausse notable des températures en Île-de-France d'ici 2071-2100, avec des impacts directs sur la phénologie des essences forestières (PRFB, 2019). Le changement climatique pourrait induire un déplacement en latitude des niches climatiques des essences forestières de 1 à 7 km par an. Or il est estimé par exemple que les chênes ou les hêtres migrent de 100 km sur une période de plus de 500 ans. Ainsi, dans le cadre d'une simulation d'un réchauffement important (+ 3,35 °C en moyenne), seules 12 % (en surface) des forêts européennes actuelles pourraient s'adapter à l'horizon 2100 (Han *et al.*, 2021).



Pompier du Service départemental d'incendie et de secours de Seine-et-Marne en lutte contre un feu de forêt. © SDIS 77 ►

LES Sfn EN MILIEU FORESTIER

Les forêts sont à la fois vulnérables aux impacts du changement climatique et essentielles pour en limiter les effets et s'y adapter. L'enjeu de la gestion forestière consiste donc à optimiser, de façon conjointe et à l'échelle du territoire régional, les capacités d'adaptation et d'atténuation des peuplements forestiers, tout en conservant leur potentiel de production de bois, d'accueil du public et de préservation de la biodiversité ainsi que des services écosystémiques associés. Pour y parvenir, il est recommandé de s'appuyer sur des outils de diagnostic des impacts climatiques afin d'adapter la gestion forestière aux nouvelles contraintes, et d'intégrer des projections climatiques dans la planification forestière.

En préambule, et avant d'évoquer les solutions d'adaptation au changement climatique, il convient

de rappeler que les forêts constituent au niveau mondial le deuxième puits de carbone de la planète après les océans. Or, le puits forestier français décline et la forêt ne pourra pas absorber toutes nos émissions (voir encadré). Il est donc fondamental de continuer à travailler à toutes les échelles territoriales et dans tous les secteurs d'activité sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

De façon générale, les récentes publications scientifiques montrent que la biodiversité est le facteur clé de la résilience des forêts face aux perturbations du climat (Beugnon *et al.*, 2024 ; Luan *et al.*, 2024). Les scientifiques ont ainsi pu observer que la combinaison d'une plus grande diversité végétale et d'organismes décomposeurs peut atténuer, voire entièrement compenser, les effets d'un climat sec sur le recyclage des éléments, et ce pour une grande variété d'écosystèmes forestiers.



LE Puits DE CARBONE FORESTIER FRANÇAIS

Les derniers résultats de l'inventaire forestier national indiquent que le changement climatique entrave la capacité des arbres à capter le CO₂ émis par les activités humaines, et donc la capacité des forêts à assurer leur rôle de puits de carbone en raison de trois facteurs :

- Une diminution de l'accroissement annuel des arbres. Lors des épisodes de forte chaleur, les arbres limitent les pertes d'eau en fermant leurs stomates, organes qui permettent les échanges gazeux avec l'air ambiant. La photosynthèse est donc réduite, ainsi que la croissance des arbres – et par conséquent le stockage du carbone. Les périodes chaudes trop longues peuvent même aller jusqu'à la chute précoce des feuilles, trop coûteuses à entretenir.
- Une augmentation de la mortalité des arbres : la cause de mortalité la plus importante en volume est constituée par les tempêtes (cf. Lothar et Martin en 1999 et Klaus en 2009 dans le sud de la France). Les sécheresses prolongées peuvent, quant à elles, provoquer des embolies mortelles dans les vaisseaux où circule la sève brute. Les canicules peuvent conduire à la brûlure des feuilles de la canopée. La température létale des arbres de nos régions se situe entre 40 et 45 °C. Enfin, pathogènes, parasites et ravageurs

variés bénéficient aussi de la faiblesse des arbres induite par des sols trop secs ou trop engorgés. Parmi ces insectes bioagresseurs et pathogènes figurent la sous-famille des scolytes et celle des processionnaires, les maladies fongiques telles que la charlarose du frêne, l'encre ou le chancre du châtaignier, la suie de l'érable, la maladie des bandes rouges touchant les résineux, etc.

- Dans les peuplements déperissants, des coupes sanitaires ou préventives sont réalisées par les forestiers pour pouvoir rentabiliser le bois tant qu'il possède encore de la valeur.

Le puits de carbone est calculé par l'accroissement des arbres, auquel on retranche leur mortalité naturelle et les prélèvements. Au cours de la dernière décennie, l'évolution de ces trois facteurs a entraîné une division par deux du puits de carbone forestier français. Dans certaines régions françaises, le puits est même négatif, ce qui signifie que les peuplements forestiers émettent plus de CO₂ qu'elles n'en absorbent. C'est le cas en région Grand-Est et dans les Hauts-de-France (Ciais *et al.*, 2025). En Île-de-France, le puits de CO₂ est resté constant au cours des 30 dernières années, possiblement parce que les forêts sont majoritairement utilisées à des fins récréatives et par conséquent soumises à une faible pression de récolte.



© Maxime Zucca

La diversification des essences et la diversification génétique

En matière de régulation des températures, de lutte contre les canicules et pour faire face aux vagues de chaleur, la diversification des essences forestières optimise l'effet tampon du microclimat forestier (on parle aussi d'ambiance forestière) [Beugnon *et al.*, 2024 ; Luan *et al.*, 2024] : en moyenne un peuplement mélangé (jusqu'à 24 espèces) peut engendrer une baisse de température de $2,5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ en été, et une hausse de $0,4\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,04\text{ }^{\circ}\text{C}$ en hiver par rapport à un peuplement monospécifique (Schnabel *et al.*, 2025). La biodiversité permet aussi une meilleure résistance aux bioagresseurs et aux pathogènes spécialisés (Jactel *et al.*, 2021). Il est en effet plus difficile pour une espèce parasite ou xylophage spécialisée de trouver son arbre hôte si ce dernier est entouré d'essences variées (on parle d'effet de dilution). En outre, des forêts diversifiées opposent aux bioagresseurs des stratégies et des cocktails de molécules de défense plus variés. Dans une forêt où la diversité des espèces permet le maintien de multiples fonctions écologiques (réseau trophique, cycle des nutriments, production de biomasse, etc.) les défenses naturelles des arbres sont renforcées par l'action combinée de nombre de prédateurs, de parasitoïdes ou de champignons alliés des arbres.

Cette défense s'organise au niveau spécifique mais aussi au niveau génétique : au sein d'une même espèce d'arbre, certains individus bénéficient d'un patrimoine génétique original leur conférant une résistance naturelle aux bioagresseurs. C'est le cas de certains frênes qui résistent à la chalarose. Pour cette raison, il est recommandé de ne pas abattre entièrement un peuplement dépérissant et de vérifier s'il n'est pas possible de sélectionner en son sein ces génotypes particuliers. Le Schéma régional de gestion sylvicole (SRGS) d'Île-de-France (CNPF, 2023) recommande aussi aux forestiers de choisir, à l'occasion des opérations de régénération, « des provenances ou des essences plus résistantes, et [de favoriser] les mélanges. Cela suppose des diagnostics stationnels (sol & climat) plus fins et une meilleure surveillance des forêts ». De plus, dans nos forêts tempérées qui n'ont pas évolué avec le feu comme les forêts méditerranéennes, les incendies conduisent à une fragilisation des écosystèmes et augmentent leur fragilité vis-à-vis des insectes bioagresseurs.

Il existe encore peu de recul scientifique sur les liens entre incendies de forêt et changement climatique sous nos latitudes. Toutefois, les mesures d'adaptation visant à réduire le risque d'incendie s'appuient



Le Grand capricorne (*Cerambyx cerdo*) est une espèce patrimoniale, protégée au niveau national et déterminante de sites Natura 2000. C'est une espèce saproxylophage qui s'attaque préférentiellement aux chênes de gros diamètre fragilisés par des facteurs de stress. Favorisée par le changement climatique, son statut de protection pourrait engendrer des problèmes de conciliation des enjeux pour la sylviculture francilienne. La diversification des essences pourrait représenter une solution dans la boîte à outils des forestiers.
© Tobias Verfuss

là encore sur la diversité : diversité des essences présentes, diversité des modes d'exploitation, diversité des âges et des strates. Un mélange d'espèces indigènes à faible inflammabilité (érables, aulnes, frênes, bouleaux, etc.) et à couvert dense (chênes, hêtres, châtaigniers, etc.) peut contribuer à limiter la propagation du feu par un ombrage continu défavorable à la croissance du sous-bois combustible (ADEME et OFB, 2024a), par une inertie thermique et une hygrométrie plus forte ou encore par la réduction de l'intensité des vents (Du Bus de Warnaffe, 2023) tout en permettant une meilleure régénération après incendie. Ce mélange d'espèces peut être obtenu par sélection progressive ou, après un incendie, par l'expression de la régénération naturelle. Lorsque celle-ci ne peut pas s'exprimer, il est possible de recourir à la plantation d'un mélange en espèces indigènes à faible inflammabilité et à couvert dense. Toutefois, il peut arriver, dans certaines situations, qu'une forêt constituée de nombreuses strates puisse être sensible à la montée du feu dans la canopée. Il est donc recommandé de créer des coupures de combustible en débroussaillant localement dans les zones connues de départ de feux : en lisière de forêts mais aussi à proximité des parcelles agricoles travaillées mécaniquement ainsi qu'à proximité des habitations et des zones d'activités humaines (voir



OBLIGATIONS LÉGALES DE DÉBROUSSAILLEMENT ET DÉFENSE DES FORÊTS CONTRE L'INCENDIE

En raison du changement climatique, l'Île-de-France a été désignée « nouveau territoire du feu » par les services de l'État en 2023. Cette désignation implique notamment le développement d'un programme d'acculturation au risque incendie de forêt dans notre région et la mise en place d'obligations légales de débroussaillage (OLD) sur certaines communes. L'OLD impose au propriétaire de tout bâtiment ou infrastructure situés dans une zone exposée au risque d'incendie de forêts de maintenir un espacement entre les arbres, et de réduire les broussailles et bois morts dans un rayon de 50 m autour de la construction (IGN *et al.*, 2024).

À plus large échelle, la maîtrise de l'urbanisation est également un élément-clé dans une région qui présente des paysages mixtes de forêts et d'habitations. En effet, la fragmentation des milieux forestiers par les zones urbaines et agricoles renforce le risque feu de forêt (Curt et Rigolot, 2020). Plusieurs massifs franciliens sont inclus dans de grandes agglomérations ou directement à leur lisière, jouxtant des jardins privés, des parcs publics, où les risques de départ de feu sont substantiels : barbecues, camping sauvage, brûlage de végétaux, bricolage, jet de mégots, feux d'artifice amateurs, parkings automobiles, etc. En plus de multiplier les risques de départ de feu en lisière, l'encercllement des forêts franciliennes par l'urbanisation peut également compliquer l'accès des secours. Dans les régions méditerranéennes où les incendies de forêt sont malheureusement des événements de plus en plus courants, des solutions de sylvopastoralisme pour diminuer l'inflammabilité des peuplements en réduisant la biomasse combustible ont été mises en œuvre avec succès (UICN France, 2022).



Sylvopastoralisme à Fontainebleau.
© Guillaume Larrègle

l'encadré ci-contre) [Curt et Rigolot, 2020]. En dehors des pistes de défense des forêts contre les incendies (DFCI) et des secteurs où s'applique l'obligation légale de débroussaillage, il n'est pas recommandé de procéder à l'ouverture de grandes surfaces par coupes rases. En effet, non seulement celles-ci affectent la biodiversité forestière mais elles ont aussi tendance à augmenter la température du sol et à laisser au sol d'importants rémanents secs et favorables au feu (branches et végétation de sous-bois comme la fougère aigle). Enfin, sachant que 90 % des incendies de forêt sont d'origine humaine, il est indispensable d'intensifier la surveillance des boisements ainsi que la sensibilisation du public.

Pour conclure cette section sur la diversification des peuplements forestiers, il est intéressant de souligner que les solutions qui prévalent pour l'adaptation des forêts au changement climatique sont souvent les mêmes que celles qui sont recommandées pour l'atténuation. Ainsi, les scientifiques expliquent que les peuplements diversifiés en espèces ligneuses montrent des stocks et des flux de carbone plus importants que les forêts peu diversifiées (Bouget *et al.*, 2020). Pour chaque espèce d'arbre supplémentaire, le stock total de carbone augmente de 6,4 %.

La sylviculture mélangée à couvert continu

Aussi appelée sylviculture proche de la nature, la sylviculture mélangée à couvert continu (SMCC)⁹ est un mode de gestion sylvicole qui promeut la (bio)diversité à tous les niveaux : diversification des espèces, des gènes (voir ci-dessus), mais aussi des âges/diamètres/hauteurs des arbres et des strates de végétation (mousses, herbes, arbustes et arbrisseaux, arbres) [ADEME et OFB, 2024]. Il défend également le maintien d'un couvert arboré continu. Il exclut donc les coupes rases (dans lesquelles les arbres ont mécaniquement tous le même âge puisque leurs prédécesseurs ont été coupés en même temps), favorisant ainsi un ombrage et une humidité plus importants, et par conséquent une meilleure résistance du peuplement lors des épisodes de fortes chaleurs. En effet, sous couvert forestier, la température peut-être de 2 °C à 15 °C moins élevée lors des pics de chaleur qu'en milieu ouvert (De Frenne *et al.*, 2021), ce qui favorise la survie des jeunes plants. La SMCC préconise aussi l'augmentation du mélange d'essences afin de ne pas « mettre tous ses œufs dans le même panier », la régénération naturelle ou encore le maintien d'arbres-habitats et d'une pluralité de milieux intraforestiers patrimoniaux : mares, landes, etc.

9. <https://askafor.eu/> et <https://prosilva.fr/>

En matière d'adaptation au changement climatique, la sylviculture mélangée à couvert continu apporte également de multiples intérêts vis-à-vis des tempêtes : ce type de gestion par éclaircies prudentes favorise la croissance des arbres en hauteur, en profondeur et en largeur, ce qui augmente leur résistance mécanique aux vents violents. La diversité spécifique permet une variabilité d'enracinement et de résistance mécanique, et la couverture homogène ne crée pas de couloirs d'accélération des vents comme dans les coupes à blanc. Depuis 2017, l'ONF s'oriente progressivement vers ce type de gestion forestière dans toutes les forêts publiques franciliennes (ONF, 2017).

Parmi les pratiques sylvicoles bénéfiques à la fois pour la biodiversité et pour l'adaptation au changement climatique, outre la diversification des âges, des strates et des essences, figurent le maintien des arbres habitats, des mares ou des landes, comme sur cette photo.

© Gwendoline Grandin ►



LES COUPES RASES

Selon le Réseau mixte technologique pour l'adaptation des forêts au changement climatique (RMT AFORCE) et le Groupement d'intérêt public Écosystèmes forestiers (GIP ECOFOR), une coupe rase est une « coupe qui retire en une fois la quasi-totalité des arbres du peuplement et laisse le sol majoritairement nu (dépourvu de végétation herbacée ou ligneuse de plus de 50 cm de haut environ) avant régénération, artificielle le plus souvent, du peuplement » (RMT AFORCE et GIP ECOFOR, 2023). Les coupes rases, aussi qualifiées de coupes à blanc, ou coupes définitives, mènent à une perte du microclimat forestier et à une dégradation/minéralisation très rapide de l'humus. Elles favorisent une végétation nitrophile (friande de sols riches en minéraux, notamment en azote) et héliophile (favorisée par la lumière) comme les

ronces ou la fougère aigle. Une partie de l'azote s'infiltre dans les eaux souterraines. La couche supérieure du sol sèche, impactant la vie du sol, pourtant primordiale en forêt. La coupe rase expose également les jeunes pousses à des variations fortes de température auxquelles elles ne sont pas adaptées dans la mesure où elles nécessitent la protection ombragée des arbres âgés pour grandir. Lorsque le forestier choisit de replanter après la coupe, les sécheresses induisent d'importants taux d'échec : en 2022, du fait des températures très élevées, le taux de plantation en échec a été de 38 % au niveau national, bien au-delà des années 2015 à 2020 au cours desquels il s'établissait autour de 25 % environ. Le succès des plantations a été meilleur en 2025, avec un taux d'échec de 21 %, mais moins bon qu'en 2024 (15 % d'échec) (MASA, 2026).



Les travaux scientifiques récents montrent des effets négatifs des coupes rases sur la biodiversité, les sols et sur l'adaptation des forêts au changement climatique. © Maxime Zucca

La pratique d'éclaircies

Une étude scientifique récemment parue confirme que la diversité des essences forestières constitue une garantie de productivité forestière en condition de stress hydrique (voir plus haut), mais elle précise aussi que cette garantie peut s'affaiblir dans des boisements accueillant une forte densité d'arbres (Bertrand et Morin, 2026). C'est pourquoi il peut être intéressant de pratiquer des éclaircies dans les peuplements afin de réduire la concurrence entre les arbres pour la ressource en eau lors des périodes sèches prolongées.

La pratique d'éclaircies est une recommandation du SRGS d'Île-de-France pour l'adaptation des forêts aux vagues de chaleur, mais le document précise que les forestiers doivent tenir compte du contexte stationnel de leurs parcelles : humidité, pente, type d'essences présentes, densité initiale du peuplement, développement du sous-bois, etc. En effet, une éclaircie excessive peut conduire à une perte du microclimat forestier, conduisant à une élévation délétère de la température des feuilles des arbres restants et à une augmentation de leur stress (voir les conséquences des coupes rases ci-dessus) [Du Bus de Warnaffe, 2023].

La conservation du bois mort ou mourant

Le bois mort ou mourant forme un compartiment important de la biodiversité forestière. On estime que ce compartiment accueille un quart des espèces

forestières en métropole, soit plus de 10 000 espèces (Nivet *et al.*, 2012) : champignons, insectes saproxylophages, pics, amphibiens, etc.

Le maintien du bois mort sur pied ou au sol favorise les champignons saprophytes et mycorhiziens. Ces derniers collectent les éléments minéraux tels que le phosphore pour les arbres, les protègent contre d'éventuels pathogènes ou encore gèrent les flux d'eau dans le sol. Ainsi, la présence de bois mort et le maintien de rémanents d'exploitation permet à la fois la reconstitution des sols forestiers (ce qui rend superflu l'usage d'engrais forestiers) et une meilleure résistance du peuplement lors des épisodes de sécheresse. Par ailleurs, si la présence de litière, d'aiguilles et de brindilles sont des facteurs aggravants en cas d'incendie, le maintien de gros bois mort gorgé d'humidité constitue au contraire un facteur limitant. Pour les mêmes raisons, la récolte des souches est à éviter (Société botanique de France et UICN France, 2023).

Lors de l'exploitation forestière, les menus bois (branches de diamètre inférieur à 7 cm) doivent être laissés en forêt dans la mesure où ces derniers contribuent au renouvellement des sols forestiers. Le programme régional forêt-bois 2019-2029 souligne en effet que le sol peut constituer un élément clé pour la séquestration substantielle de carbone, en fonction de la biodiversité présente, de la gestion du sol et de la qualité de ce dernier (DRIAf et Région Île-de-France, 2020).



Les gros bois morts dont la lignine a été consommée par les champignons lignivores sont gorgés d'eau et peuvent constituer un outil dans la lutte contre les incendies de forêts. © ONF



Les branches mortes et la litière de feuilles sont rapidement dégradées par les champignons et par la microfaune. Cette activité de décomposition et de recyclage contribue à l'enrichissement des sols forestiers, ainsi qu'à une meilleure rétention de l'eau. © Olivier Renault

La protection des sols forestiers

Les sols sont un compartiment fondamental à considérer pour l'adaptation des forêts au changement climatique. Comme mentionné ci-dessus, ils résultent de la dégradation du bois, de la litière et des animaux morts par les organismes détritiques qu'ils abritent. Si les arbres emmagasinent du carbone dans leur bois, celui-ci est aussi stocké, quasi à part égale, dans la biomasse du sol. On estime que les sols forestiers français contiennent 2,5 fois plus de carbone organique que les sols cultivés. Les stocks de carbone à l'hectare des sols forestiers sont du même ordre de grandeur que ceux des prairies permanentes (MTEBFMP, 2025).

Ils constituent par ailleurs le support de l'enracinement des arbres ainsi que leur réserve en eau et en nutriments. Les pratiques d'exploitation forestière qui prennent soin des sols, à savoir le non-tassement par les engins et le maintien des rémanents et du bois mort (chablis, volis, branches mortes, etc.), préservent ces fonctions importantes : elles garantissent d'une part un meilleur ancrage des arbres pour résister aux tempêtes, et d'autre part un sol plus profond, plus vivant, riche en matière organique et en ingénieurs du sol (micro-organismes et macro-invertébrés). Ces derniers favorisent l'infiltration, la rétention et la restitution de l'eau, permettant aux peuplements de résister à la sécheresse (ADEME

et OFB, 2024). Toutes les opérations forestières entravant la régénération des sols ou tassant ces derniers (engins lourds sur sols non portants) sont donc à éviter pour l'adaptation des forêts au changement climatique. Pour répondre à ces contraintes, la sylviculture mélangée en couvert continu préconise l'ouverture de cloisonnements pérennes (voies de circulation) afin d'éviter la compaction des sols par les engins de coupe et de débardage sur l'intégralité de la surface forestière. Une attention particulière doit être portée sur les forêts à sol hydromorphe car plus un sol est gorgé d'eau, plus il est sensible au tassement (Vennin *et al.*, 2025)¹⁰. Dans les conditions les plus humides, la mobilisation du débardage à cheval ou par câble mat est aussi envisageable (mais les coûts sont plus élevés). Enfin, certains massifs forestiers situés aussi bien sur les coteaux qu'en fond de vallée, peu accessibles aux engins donc peu exploitables, doivent être absolument préservés : ils jouent un rôle essentiel dans la stabilisation des sols et par conséquent dans la protection contre l'érosion, le ruissellement et les glissements de terrain (UICN France, 2022).

10. Les engins d'exploitation ont un effet direct sur la composition végétale de peuplements forestiers, sélectionnant des espèces favorisées par les sols compactés et engorgés. Cet effet est plus fort que celui du changement climatique lui-même.



L'utilisation d'engins forestiers lourds sur des sols forestiers non ressuyés peut contribuer à des tassements ou à des ornières. Or, un sol tassé peut perdre entre 20 et 40 % de productivité (à noter, toutefois, sur les zones dédiées au cheminement des engins, des ornières temporaires peuvent accueillir des espèces patrimoniales telles que le Sonneur à ventre jaune, un petit crapaud présent dans les forêts du nord-est de l'Île-de-France). © Olivier Renault

Le renouvellement des forêts

Après une coupe de bois, pour renouveler la forêt, les forestiers s'appuient préférentiellement sur la régénération naturelle, c'est-à-dire sur les semis en place, quand ils sont présents. En effet, la diversité génétique des semences combinée à la sélection naturelle par les contraintes environnementales favorise l'émergence d'individus plus adaptés aux pathogènes et aux aléas climatiques, qui peuvent ensuite faire l'objet d'une exploitation sélective. La régénération naturelle dépend de deux facteurs : la présence de semenciers et celle des grands herbivores, en particulier les chevreuils et les cerfs. En l'absence de grands carnivores dans notre région, des opérations ponctuelles de régulation par la chasse peuvent être organisées afin de réduire la pression d'herbivorie sur les jeunes plants. La diversification des essences évoquées précédemment contribue également au brouillage de l'appétence pour le gibier, et peut limiter les impacts des ongulés sur la régénération naturelle (ADEME et OFB, 2024).

Lorsque cette dernière ne fonctionne pas (banque de semences inexistante, déficit de semenciers, par exemple), il est possible de recourir à la plantation. Dans ce cadre, les forestiers s'interrogent sur les essences à planter en vue d'adapter leurs peuplements aux conditions futures. Deux solutions techniques sont actuellement considérées : la migration assistée d'individus d'essences indigènes de l'Île-de-France, mais provenant du sud de leur aire biogéographique, ou bien l'implantation de nouvelles espèces provenant d'autres zones géographiques présentant les conditions climatiques futures projetées par modélisation en Île-de-France (Paris connaîtra le climat de Montpellier en 2100, selon les modélisations de la TRACC). Plusieurs auteurs penchent en faveur de la première solution. En effet, il peut être tentant d'importer des espèces depuis d'autres continents (translocation) en se basant sur les conditions climatiques attendues estimées par les modèles climatiques sur la zone d'étude, mais la littérature scientifique soulève un certain nombre de questions, parmi lesquelles :

- la maladaptation de ces espèces exotiques aux gels tardifs qu'elles ne rencontrent pas dans leur aire d'origine ;
- la non prise en compte des combinaisons entre la diversité génétique des individus et les relations inter-espèces – notamment les cortèges mycorhiziens – de la communauté d'origine des arbres transloqués (Du Bus de Warnaffe, 2023) ;
- l'importation conjointe de pathogènes et de bioagresseurs exotiques, organismes envers lesquels seules les relations interspécifiques



L'agent pathogène de la chalarose du frêne a été importé en Europe avec l'introduction de frênes de Mandchourie provenant de Chine. © Olivier Renault

mentionnées précédemment permettent une résistance efficace ;

- le potentiel envahissant, allélopathique¹¹ ou allergène des nouvelles espèces introduites (Société botanique de France, 2021). Enfin, un article récent suggère que la translocation d'espèces méditerranéennes pourrait avoir un impact négatif sur le microclimat forestier et la vitesse de décomposition de la litière forestière tout en augmentant le risque incendie (Michalet *et al.*, 2023). Les auteurs préconisent donc de travailler sur la diversification et la stratification du couvert existant pour maintenir le microclimat forestier (température et humidité sous la canopée) et le régime des précipitations afin de permettre aux essences indigènes de s'adapter plus facilement aux changements climatiques (ADEME et OFB, 2024).

11. L'allélopathie est un phénomène biologique par lequel un organisme produit une ou plusieurs substances biochimiques perturbant la germination, la croissance, la survie ou la reproduction d'autres organismes.



LA MALADIE DE L'ENCRE

La maladie de l'encre touche de plein fouet les forêts franciliennes, et en particulier le châtaignier, deuxième essence la plus présente dans nos massifs. Elle est causée par un pathogène nommé *Phytophthora* qui s'attaque aux racines des arbres et qui se propage d'individu à individu par la progression de son mycélium ou par le transport de ses spores par l'eau et les animaux (dont l'humain). Ce pathogène connaît une augmentation ces dernières années, notamment en raison des nouvelles conditions climatiques de l'Île-de-France, caractérisées par des hivers plus doux et des printemps pluvieux qui favorisent sa propagation. Malheureusement, la seule mesure sanitaire viable aujourd'hui pour endiguer cette maladie est d'effectuer des coupes rases dites « sanitaires ». Le remplacement des arbres coupés s'appuie ensuite sur la régénération naturelle, c'est-à-dire sur la germination naturelle des graines se trouvant sur place lorsque c'est possible, mais aussi, plus souvent, sur la plantation de nouvelles essences forestières diversifiées.



70 % de la forêt domaniale de Montmorency est constituée de châtaigniers, en partie mourants car touchés par la maladie de l'encre. L'ONF entreprend des coupes et des plantations de nouvelles essences plus résistantes pour faire face au dépérissement massif de cette forêt. © Gabrielle Huart

La préservation de la mosaïque d'habitats forestiers

La forêt accueille une grande diversité d'habitats autres que les boisements proprement dits : landes sèches ou humides, pelouses forestières, clairières et trouées, mares, marais et zones tourbeuses, ainsi que ruisseaux, fossés et dépressions humides. Leur juxtaposition forme une véritable mosaïque écologique, à l'origine de la richesse biologique des milieux forestiers. Ces habitats sont indispensables à de nombreuses espèces, qui y trouvent des conditions favorables à leur reproduction, leur alimentation ou leurs déplacements. Par exemple, les mares forestières sont essentielles aux amphibiens, tandis que les clairières bénéficient aux plantes héliophiles, aux insectes pollinisateurs et à de nombreux oiseaux. Au-delà de leur intérêt écologique, ces milieux jouent un rôle clé dans l'adaptation et l'atténuation face aux changements climatiques. Les zones humides contribuent à la régulation du cycle de l'eau, au stockage du carbone et à l'atténuation des effets des sécheresses et des fortes pluies. Les milieux ouverts, quant à eux, favorisent la diversité des espèces et donc la résilience des écosystèmes forestiers face aux perturbations. Préserver cette diversité d'habitats revient ainsi à renforcer la capacité des forêts à s'adapter aux évolutions climatiques tout en participant à la régulation du climat.

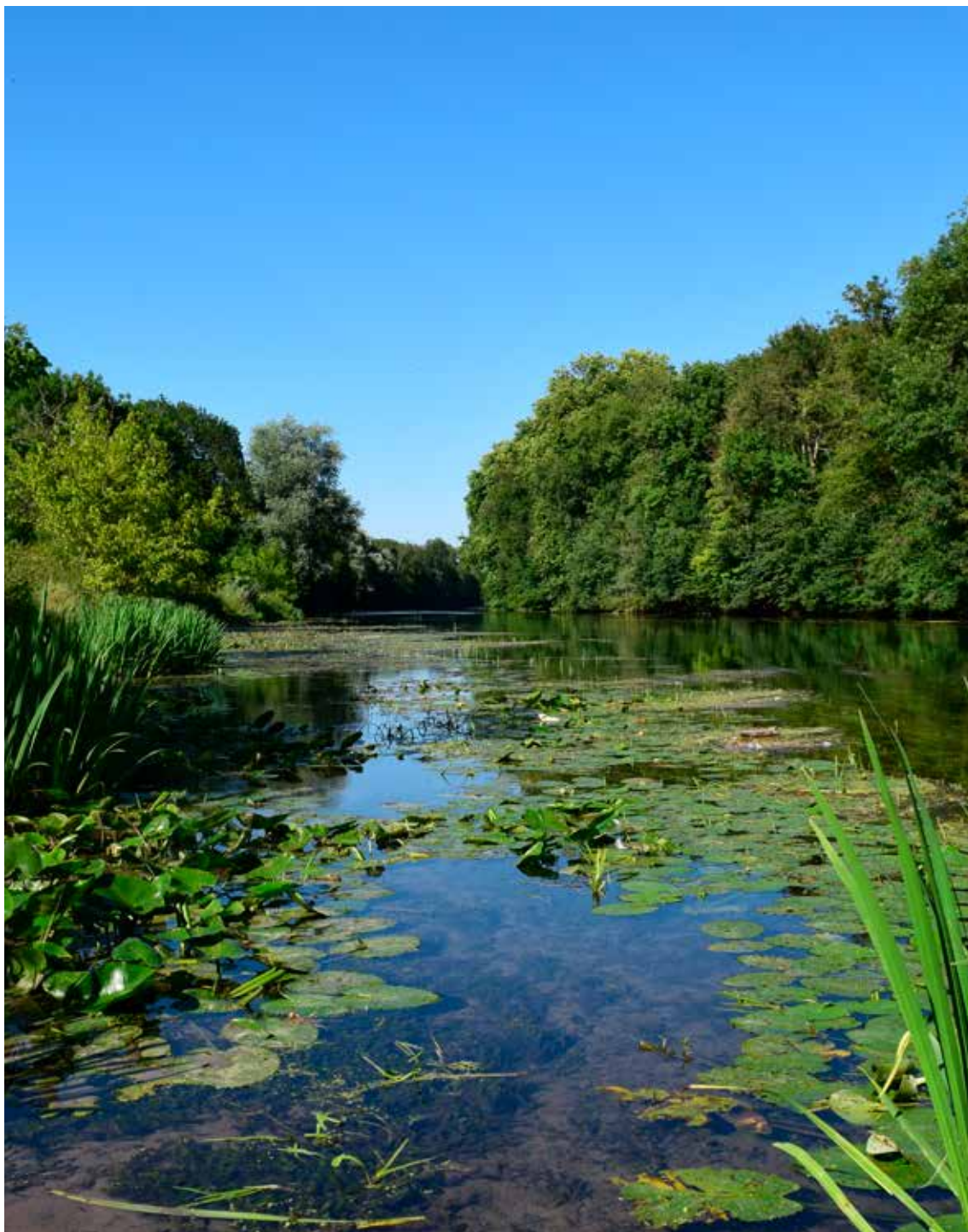


Les mares forestières jouent un rôle important dans la captation des eaux de pluie et dans le rafraîchissement du microclimat forestier. © Ophélie Ricci

Les ripisylves : milieux à protéger et restaurer

Il s'agit des forêts linéaires qui bordent les cours d'eau. On les appelle aussi forêts alluviales ou forêts riveraines. Elles sont souvent constituées d'arbres particulièrement adaptés aux variations d'hygrométrie des sols : aulnes, saules, frênes, trembles,

etc. Ces forêts sont également à maintenir dans la mesure où elles permettent de tamponner les inondations par débordement et de limiter la vitesse d'écoulement des cours d'eau (cette SfN est détaillée dans le chapitre sur les solutions en milieux aquatiques et humides).



Forêt alluviale de la vallée du Loing. © Lucile Dewulf

La libre évolution

La littérature scientifique souligne depuis de nombreuses années que les modes de gestion forestière les plus favorables au stockage de carbone sont également ceux qui profitent le plus à la biodiversité, à savoir : ne rien faire (Bouget *et al.*, 2020 ; Chuine *et al.*, 2023). On parle de dynamique de libre évolution, caractérisée par l'absence d'intervention humaine, qu'elle soit volontaire ou involontaire. Si une jeune forêt en croissance séquestre rapidement du carbone dans le bois sur pied, il est toutefois inexact d'affirmer que les forêts sénescentes absorbent peu de carbone voire qu'elles deviennent des sources de gaz à effet de serre. En effet, des études montrent que même les forêts les plus âgées continuent à séquestrer du carbone (Luyssaert *et al.*, 2008) et que la fixation du carbone augmente avec la taille et l'âge des arbres (Stephenson *et al.*, 2014). Par ailleurs, les compartiments de bois mort, de litière forestière et de carbone organique des sols font des vieilles forêts de prodigieux puits de carbone, offrant un stockage durable sur le long terme. L'absence de gestion favorise également la qualité des sols et crée des zones refuges pour de nombreuses espèces, en particulier celles dépendantes des stades forestiers sénescents. Enfin, les forêts en libre évolution constituent également de véritables laboratoires à ciel ouvert, où les communautés végétales et animales peuvent s'adapter et se réorganiser naturellement face au réchauffement climatique.

Pour toutes ces raisons, la libre évolution des forêts est de plus en plus intégrée dans les pratiques institutionnelles et associatives. Le Plan National d'Action pour les Vieux bois et les Forêts Subnaturelles (PNA VBFS), prévu pour 2026, devrait notamment valoriser cette approche. Sur le terrain, elle est déjà mise en œuvre par l'ASPAS dans la Réserve de Vie Sauvage de 490 ha au sein du Parc naturel régional du Vercors, par l'association Francis Hallé qui porte un projet visant à restaurer 70 000 ha de vieilles forêts dans le massif des Vosges, ainsi que par le réseau FoRêts en Évolution Naturelle (FRENE), qui a inscrit 33 131 ha de forêt en libre évolution en Auvergne Rhône-Alpes. Le projet Sylvae, porté par les Conservatoires d'espaces naturels, et le programme PRELE en Normandie visent également à créer des espaces forestiers laissés en libre évolution sur le long terme. Enfin, dans les forêts dont il a la gestion, l'ONF contribue à cette dynamique à travers ses réserves biologiques intégrales (RBI) et ses îlots de vieux bois. En Île-de-France, la forêt de Fontainebleau compte 1 060 ha en RBI sur un total de 1 350 ha dans la région. Ces dispositifs sont complétés par le maintien d'un à trois arbres « habitats » – aussi appelés arbres « bio » ou « à haute valeur écologique » – par hectare. Ces derniers sont identifiés par un triangle de couleur « chamois » tracé sur leur écorce à la bombe de peinture.



La réserve biologique intégrale du Chêne brûlé en forêt de Fontainebleau. Les arbres y sont laissés en libre évolution. Des coupes de sécurisation peuvent avoir lieu à proximité des routes et des chemins. Les bois coupés sont laissés sur place. © ONF

La production de bois durable

Bien sûr, il n'est pas envisageable de laisser toutes les forêts franciliennes en libre évolution, d'une part, elles sont très fréquentées par le public, ce qui implique une gestion visant à limiter les risques pour les usagers, notamment à proximité des chemins et des sites d'accueil. D'autre part, les forêts sont également exploitées pour répondre à différents besoins de la société. Ces besoins peuvent contribuer à stocker d'importantes quantités de carbone dans les produits issus de l'exploitation forestière.

Il existe une littérature prolifique sur l'intérêt et la faisabilité du stockage du carbone dans les produits-bois (Roux *et al.*, 2017 ; ADEME, 2021 ; Chuine *et al.*, 2023 ; Du Bus de Warnaffe, 2023), dont on peut retenir que pour maximiser l'atténuation des effets du changement climatique, une « hiérarchie des usages » doit être respectée. Cette hiérarchie préconise en premier lieu l'utilisation du bois coupé en forêt pour des produits à longue durée de vie : charpentes, menuiserie, ameublement, parquets, etc. Puis dans les usages à durée de vie plus courte : palettes, caissettes, cartons, papiers, etc., et enfin pour le bois énergie. Cette dernière catégorie doit idéalement mobiliser en premier lieu les coproduits de première et de seconde transformation : sciure de sciage et de façonnage, chutes de bois inutilisables, etc. La science démontre en effet que l'exploitation industrielle de forêts/d'arbres entiers pour produire du bois énergie est un facteur d'accélération du changement climatique, même si l'on prend en compte les mécanismes de substitution énergétique des énergies fossiles par le bois (« Lettre de 800 scientifiques concernant le bois-énergie », 2018 ; Searchinger *et al.*, 2018 ; Peng *et al.*, 2023). Elle est en outre source de pollution atmosphérique aux particules fines, ces dernières étant les principales responsables de 40 000 décès par an, selon Santé Publique France (Medina *et al.*, 2021).

N.B. : en Île-de-France, en 2023, 63 % du bois commercialisé est utilisé en bois énergie (source : *Les chiffres clés du bois énergie en Île-de-France*, Fibois Île-de-France).



Grume de chêne abattu en forêt régionale de Ferrières, pressentie pour la reconstruction de la cathédrale de Notre-Dame de Paris. Ce type d'usage permet le stockage du carbone sur une très longue durée.
© Olivier Renault



Débardage équin pour l'évacuation des coupes et rejets, plus respectueux de l'environnement et du savoir-faire.
© SM4VB ►

OUTILS DE PLANIFICATION ET FINANCEMENTS

Le changement climatique représente un défi majeur pour les forêts d'Île-de-France, avec des impacts variés sur la biodiversité, la santé des arbres et la résilience des écosystèmes. Pour répondre à ces enjeux, il est essentiel d'adopter des stratégies intégrées de gestion durable en misant sur la diversification des essences, la préservation des sols et de l'eau, la prévention des incendies et l'adoption de solutions fondées sur la nature. La mise en œuvre de ces solutions passe par une meilleure coordination entre les acteurs de la filière sylvicole et une intégration de ces stratégies dans les politiques régionales de gestion forestière.

Le Schéma directeur de la Région Île-de-France - environnemental (SDRIF-E), approuvé par décret le 10 juin 2025, est le document de planification de l'aménagement en Île-de-France. Il court jusqu'en 2040 et vise entre autres à protéger les forêts franciliennes de l'urbanisation, à y renforcer la biodiversité et à mieux valoriser la ressource en bois du territoire. Dans ce contexte, il cible une diminution de la consommation des espaces agricoles, naturels et forestiers par la réduction des capacités d'urbanisation sur certains territoires « sauf actions de renaturation permettant de compenser le dépassement et un gain d'espaces non artificialisés ». Il souligne également l'impact de la fragmentation des massifs forestiers par les infrastructures de transport et vise à réduire le rythme de cette dernière, voire à la résorber. Ces préconisations générales doivent ensuite être reprises dans d'autres outils de planification tels que le schéma régional de cohérence écologique (SRCE), les schémas de cohérence territoriale (SCOT), les plans locaux d'urbanisme (PLU, PLUi ; cf. les zones N et les espaces boisés classés) ou encore les plans climat-air-énergie territoriaux (PCAET). À ce titre, les collectivités territoriales ont un rôle central à jouer à travers le déploiement de ces outils sur leur territoire, mais aussi en favorisant des financements pour la gestion durable des massifs, la préservation de la biodiversité et le renforcement des services écosystémiques. En particulier, les forêts urbaines et périurbaines ont une influence grandissante à jouer en tant qu'îlots de fraîcheur pour lutter contre l'îlot de chaleur urbain.

Le Programme régional de la forêt et du bois 2019-2029 d'Île-de-France est aussi un document important. Il s'agit du cadre de la politique forestière en Île-de-France sur lequel doivent être basés d'autres documents tels que le schéma régional de gestion sylvicole, les directives régionales d'aménagement, etc.

Il est organisé selon cinq orientations stratégiques :

- gérer nos forêts de manière dynamique, durable et multifonctionnelle dans un contexte de changement climatique ;
- renforcer la compétitivité et l'emploi de la filière bois régionale et interrégionale ;
- encourager les dynamiques territoriales ;
- répondre aux attentes sociétales en matière de nature, de paysage et d'accueil du public ;
- communiquer sur la gestion forestière, la biodiversité, la filière forêt-bois et ses métiers.

Les forêts franciliennes sont également concernées :

- par des outils de connaissance comme les zones naturelles d'intérêt écologique faunistique et floristique (ZNIEFF), la réserve de biosphère de Fontainebleau-Gatinais ;
- par des outils de maîtrise foncière, à l'instar des périmètres régionaux d'intervention foncière (PRIF), des espaces naturels sensibles (ENS), des bois communaux ou des propriétés du conservatoire des espaces naturels ;
- par des outils à portée contractuelle, tels que contrats et chartes du réseau européen Natura 2000 ou encore les chartes forestières de certains territoires ;
- par des outils de protection à portée réglementaire tels que les parcs naturels régionaux, les réserves naturelles régionales et nationales, les réserves biologiques domaniales dirigées ou intégrales.

Pour les deux dernières catégories d'outils, la gestion forestière est théoriquement fondée sur des inventaires faune-flore-fonge, sur des diagnostics écologiques, sur l'identification d'enjeux qui forment la base d'un document de gestion révisé à plus ou moins longue échéance : documents d'objectifs Natura 2000, plans de gestion, schémas d'aménagement, etc. Ainsi, 64 % de la surface du réseau Natura 2000 est constituée de forêts, les PNR accueillent plus de 32 % de la forêt francilienne, et environ 25 000 ha de forêts font l'objet de mesures de protection fortes (réserves biologiques ou arrêtés de protection biotope), limitant voir interdisant l'exploitation économique de ces massifs (DRIAAF et Région Île-de-France, 2020).

Le classement en forêt de protection (relevant de l'article Article L141-1 du code forestier) interdit tout changement d'affectation ou tout mode d'occupation du sol de nature à compromettre la conservation ou la protection des boisements. Dans notre région, six massifs forestiers sont classés comme tels, pour un total de 63 100 ha : la Forêt de Sénart (91), le Massif de Fontainebleau (77/91), la Forêt de Fausses-

Reposes (78/92), le Massif de Rambouillet (78), la forêt de Montmorency (95) et l'Arc boisé du Val-de-Marne (91/94/77).

Bien que dénuée d'intérêt économique, la libre évolution est le mode de gestion forestière le plus approprié pour la préservation d'une certaine biodiversité inféodée au bois vieux et mort, ainsi que pour le stockage du carbone sur le long terme, et par conséquent pour l'atténuation du changement climatique (Leturcq, 2020). Ce mode de gestion – ou plutôt de non-gestion – est particulièrement bénéfique à l'accueil de certaines espèces menacées parce que spécialisées dans l'exploitation d'arbres très âgés : c'est le cas par exemple du Taupin violacé (*Limoniscus violaceus*) ou du Pique-prune

(*Osmoderma eremita*). Au niveau national, plusieurs programmes mettent en œuvre ce type de non-gestion : cf. la section consacrée à la libre évolution p. 68. L'outil récent que constituent les obligations réelles environnementales (ORE), institué par la loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages (2016), permet également aux propriétaires de terrains forestiers de maintenir des espaces en libre évolution pour une durée pouvant s'étendre sur 99 ans. Enfin, une proportion inconnue de parcelles forestières privées sont laissées à l'abandon parce que leurs propriétaires ignorent qu'ils en sont détenteurs. Ces forêts abandonnées sont donc involontairement menées en libre évolution.



Le scarabée pique-prune (*Osmoderma eremita*) est une espèce protégée au niveau national en France. Le maintien de cette espèce nécessite la conservation d'un réseau de boisements comportant quelques arbres très âgés (à minima 150-200 ans pour espérer abriter l'espèce, mais plus de 300-400 ans pour les conditions les plus favorables), suffisamment proches les uns des autres et porteurs de cavités à terreau. © Alexandre Lainé

RETOURS D'EXPÉRIENCE



Forêt de Chantilly. © Jean-Luc Hercent

La préservation de la forêt de Chantilly par le collectif « Ensemble, sauvons la forêt de Chantilly »

Le massif forestier de Chantilly, propriété de l'Institut de France et géré par l'ONF, est situé à cheval entre l'Île-de-France et les Hauts-de-France. Il couvre plus de 6 300 ha en plein cœur du Parc Naturel Régional Oise-Pays de France. La partie francilienne est représentée par deux forêts : le bois de Bonnet et une partie de la forêt de Coye, qui représentent 952 ha de l'ensemble du massif. Depuis les années 2000, la forêt fait face à d'importantes difficultés en grande partie liées au changement climatique : dépérissement du chêne pédonculé (sécheresses répétées, déficit hydrique, conditions pédologiques limites), déclin de la régénération naturelle, explosions ponctuelles des populations de Hanneton forestier.

En 2019, un programme de recherche-action intitulé « Ensemble sauvons la forêt de Chantilly » s'est constitué sous la forme d'un laboratoire à ciel ouvert pour concevoir, expérimenter scientifiquement et diffuser des solutions durables et fondées sur la nature en vue d'adapter ce massif emblématique à l'évolution climatique. Le collectif est piloté par un comité exécutif mené par l'Institut de France, l'ONF, le PNROise-Pays de France, l'INRAe, le Conservatoire botanique national de Bailleul, et accompagné par plus de 400 bénévoles (naturalistes, scientifiques, forestiers retraités et citoyens).

Des analyses menées collectivement sur le climat, le sol, la faune (notamment les bioagresseurs), la flore, la pression des grands herbivores, la génétique des chênes, etc. ont permis d'étudier les causes de dépérissement des chênes afin d'identifier des pistes d'adaptation pour assurer la résilience de l'écosystème forestier. Ces dernières ont été intégrées dans le nouveau plan d'aménagement de la forêt de Chantilly :

- basculement vers une sylviculture mélangée à couvert continu en abandonnant notamment les coupes rases afin de garantir le maintien d'une ambiance forestière plus fraîche et d'éviter le tassement des sols par les engins d'exploitation ;
- si besoin, migration assistée de chênes méridionaux et d'essences plus adaptées aux conditions climatiques projetées, et diversification du peuplement par sélection d'autres essences d'avenir ;
- soutien des fonctions écologiques naturelles de la forêt, notamment par accompagnement de la régénération naturelle (suivi de la pression exercée par les grands herbivores) et maintien de parcelles en libre évolution pour reconstituer des forêts matures, plus résilientes sur le long terme ;
- capitalisation et diffusion large des connaissances acquises via des conférences.

Le collectif « Ensemble, sauvons la forêt de Chantilly » constitue aujourd'hui un modèle de réponse territoriale au changement climatique, combinant recherche scientifique, engagement citoyen local et solutions fondées sur la nature pour favoriser la résilience d'un écosystème forestier vulnérable.

Pour en savoir plus

- La brochure du Château de Chantilly-Institut de France « La forêt du Château de Chantilly, un lieu à la croisée des chemins » :
https://chateaudechantilly.fr/app/uploads/2025/10/2025_Recueil_foret_Complet_A4_BD_Credit_agricole_compressed.pdf
- La plateforme de partage Recherche Data Gouv dédiée aux travaux du collectif « Ensemble, sauvons la forêt de Chantilly » :
<https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataverse/chantilly>
- La page dédiée au projet sur le site internet du PNR Oise-Pays de France :
<https://www.parc-oise-paysdefrance.fr/actions/foret-et-filiere-bois/adaptation-foret-de-chantilly-feader>

L'adaptation des forêts au changement climatique développée par l'Office national des forêts

L'ONF est le principal gestionnaire de la forêt publique. En France métropolitaine et en outre-mer, il gère près de 11 millions d'hectares de forêts appartenant à l'État et aux collectivités territoriales (Régions, Départements, Communes forestières).

Aux premières loges pour constater les effets du changement climatique sur la forêt, l'ONF développe depuis plusieurs décennies des pratiques destinées à adapter cette dernière aux sécheresses, aux tempêtes, aux précipitations extrêmes.

L'unité territoriale d'Auberive (Haute-Marne) a été pionnière en matière de déploiement, dès les années 1990, de la sylviculture mélangée à couvert continu en proposant une gestion forestière favorisant le mélange d'essences, de strates et d'âges afin de garantir la résilience structurelle de la forêt. En plus des essences forestières prioritaires traditionnelles telles que les chênes, hêtres, châtaigniers, pins, etc., l'unité d'Auberive s'intéresse à de nouvelles espèces d'avenir telles que tilleuls, cormiers, alisiers, érable

champêtre, identifiées comme plus résistantes aux températures élevées. Les avancées de ce mode de gestion sont valorisées par le biais de formations dispensées sur le site d'Auberive par la Futaie Irrégulière École (FIE) auprès d'un public tant professionnel qu'amateur, en plein cœur du Parc national des Forêts.

En Île-de-France, la gestion en futaie irrégulière a été adoptée en 2017 par l'ONF. Celle-ci se met en place au fur et à mesure du renouvellement des plans d'aménagement des différents massifs. Ainsi, les agences franciliennes s'attachent à diversifier les modes de renouvellement (spécifique et génétique) de la forêt en s'appuyant sur la régénération naturelle existante et sur la plantation lorsque cette dernière est déficiente (par exemple dans les forêts dominées par le châtaignier). En matière de plantation, elles font appel à des semences d'espèces indigènes provenant du sud de la Loire et ne s'interdisent pas d'implanter de nouvelles essences elles-mêmes méridionales (migration assistée). Par exemple, suite au constat qu'en sept ans, les feuillus du massif de Fontainebleau sont passés de



Gestion en futaie irrégulière en forêt domaniale d'Auberive (52). © Jean-Jacques Boutteaux

23 à 40 % en classe D à F (mal en point), avec un pic à 48 % lors de la sécheresse de 2022, l'ONF a décidé de miser sur le chêne pubescent, connu sa résistance à la sécheresse et pour sa capacité d'adaptation génétique. L'Office prévoit de planter 60 000 plants de cette espèce par an à Fontainebleau (Cassette, 2025). En parallèle, il favorise l'augmentation de la diversité des essences, donne plus d'espace aux arbres d'avenir, limite l'impact des engins forestiers par la mise en place de cloisonnements, est attentif à l'équilibre gibier/renouvellement forestier, préserve des îlots de sénescence, un réseau d'arbres habitats ainsi que des milieux ouverts remarquables. L'ensemble combiné et réparti dans l'espace de ces actions définit ce que l'Office appelle « la forêt mosaïque ». Enfin, l'Île-de-France faisant désormais partie des « nouveaux territoires de feu », l'ONF développe sa compétence de défense des forêts contre les incendies (DFCI), renforçant ses actions de contrôle, de formation et de sensibilisation de tous les publics.

Pour en savoir plus

- La page du centre de ressources pour l'adaptation au changement climatique dédiée aux forêts :
<https://www.adaptation-changement-climatique.gouv.fr/dossiers-thematiques/milieux/>
- Le concept de forêt mosaïque de l'ONF :
<https://www.onf.fr/vivre-la-foret/%2B/8e4::infographie-la-foret-mosaïque-une-nouvelle-sylviculture-face-au-changement-climatique.html>
- Le cycle de webinaires « S'adapter au changement climatique en Île-de-France, volet #5. Du constat à l'action : déployer les SfN dans les milieux agricoles et forestiers », présentation de Julien Simon :
<https://www.institutparisregion.fr/environnement/sadapter-au-changement-climatique-en-ile-de-france/>

La démarche Sylv'ACCTES et sa mise en œuvre en Île-de-France

Sylv'ACCTES est une association reconnue d'intérêt général qui propose une démarche innovante de financement et d'accompagnement technique des propriétaires forestiers publics et privés pour une sylviculture exemplaire, fondée sur la nature, avec des bénéfices pour la biodiversité mais aussi en matière de lutte contre le changement climatique.

Depuis sa création en 2015 en région Auvergne Rhône-Alpes, l'association accompagne plus de 12 500 ha de forêts dans une gestion vertueuse.

La démarche Sylv'ACCTES vise à encourager des itinéraires sylvicoles allant au-delà des obligations réglementaires en faveur du stockage de carbone, des paysages, de la biodiversité et de la résilience des peuplements. Concrètement, Sylv'ACCTES valorise des pratiques visant à stimuler les dynamiques de réaction naturelle des peuplements forestiers, à savoir :

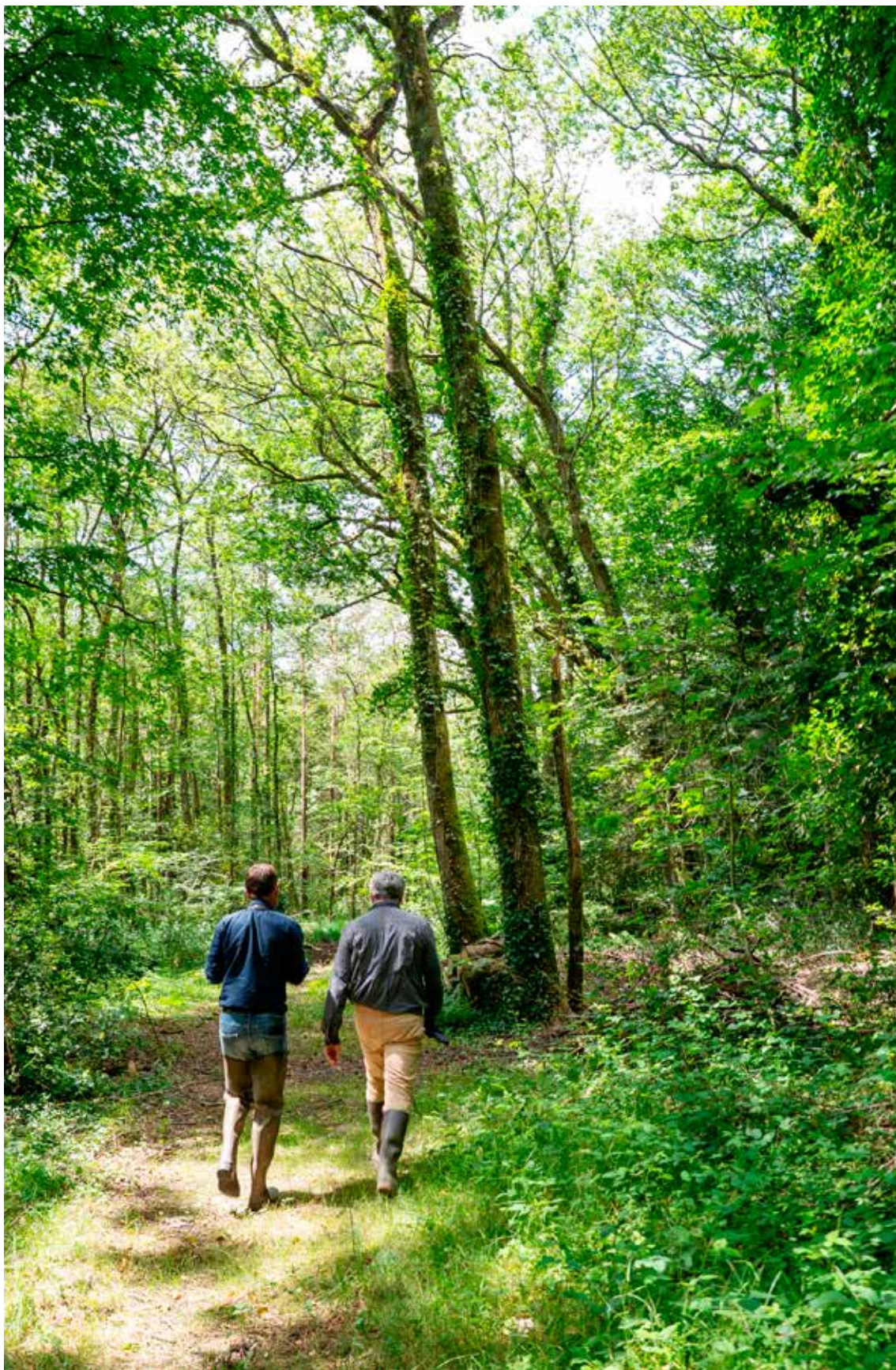
- favoriser les dynamiques de régénération naturelle au profit des essences forestières les plus adaptées au climat à venir ;
- diversifier les essences et les classes d'âges pour rendre la forêt plus résistante aux perturbations ;
- sélectionner et accompagner les arbres d'avenir ;
- compléter localement en essences d'arbres adaptées quand la régénération naturelle est trop faible ou inadaptée ;
- préserver la qualité des sols forestiers en limitant le recours à des opérations mécaniques impactantes et en installant des réseaux de cloisonnements ;
- conserver des arbres morts ou remarquables pour la biodiversité.

Ces pratiques sont mises en place dans le cadre de Projets sylvicoles territoriaux (PST) élaborés en concertation avec l'ensemble des parties prenantes de la forêt (collectivités, forestiers, syndicats des eaux, associations de protection de la nature, chasseurs, acteurs du tourisme, etc.). Le PST se traduit ensuite par la déclinaison de scénarios de gestion rassemblant différentes interventions sylvicoles (coupes et travaux) permettant d'atteindre les objectifs définis en commun. Les travaux sylvicoles sont financés sur la base d'un mécanisme de contribution volontaire : mécénats d'entreprises ou subventions de collectivités territoriales.

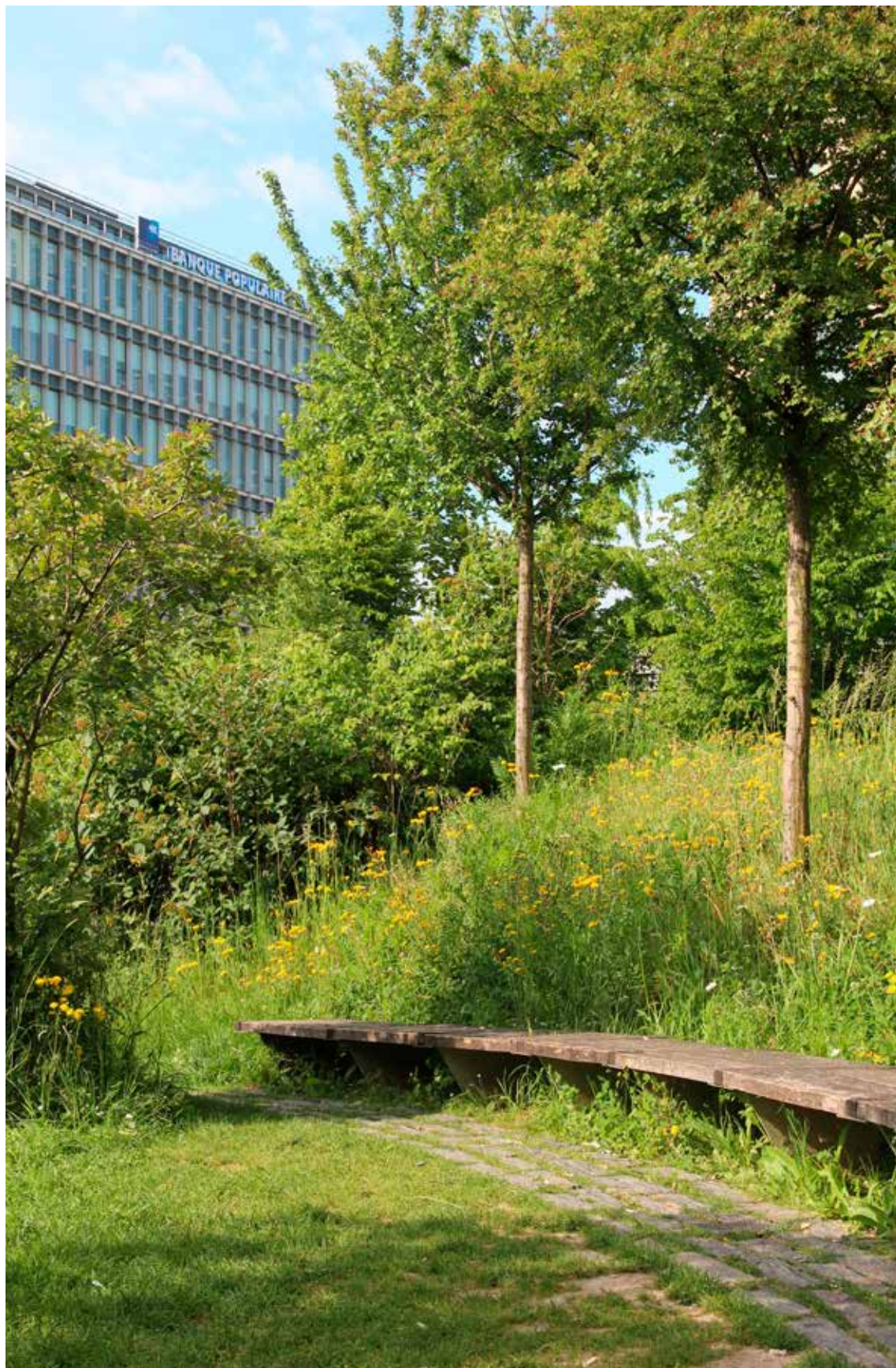
En Île-de-France, la Région a fait appel à l'association Sylv'ACCTES dans le cadre de la stratégie régionale forêt-bois (acte 2) votée en 2023. La démarche se met progressivement en place sur deux territoires expérimentaux : le Gâtinais français et le territoire du Montois, en partenariat avec le PNR du Gâtinais français, le Département de Seine-et-Marne, le Centre national de la propriété forestière, le réseau Collectivités forestières Île-de-France, la Chambre d'agriculture et l'interprofession FIBOIS Île-de-France.

Pour en savoir plus

- Le site internet de l'association Sylv'ACCTES :
<https://sylvacctes.org/>

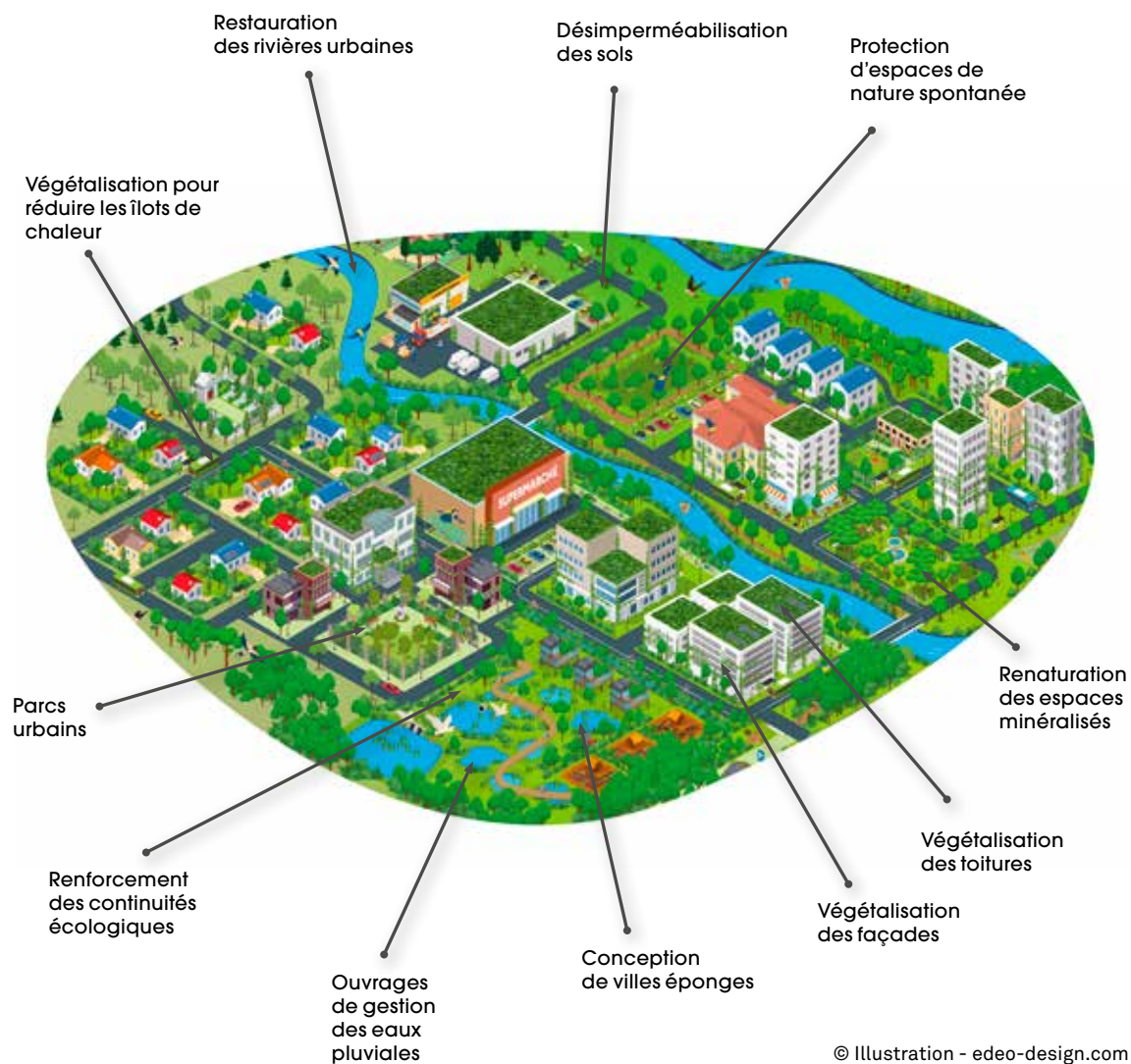


Bois de Coët-Caret à Herbignac (44). © Gilles Lecuir

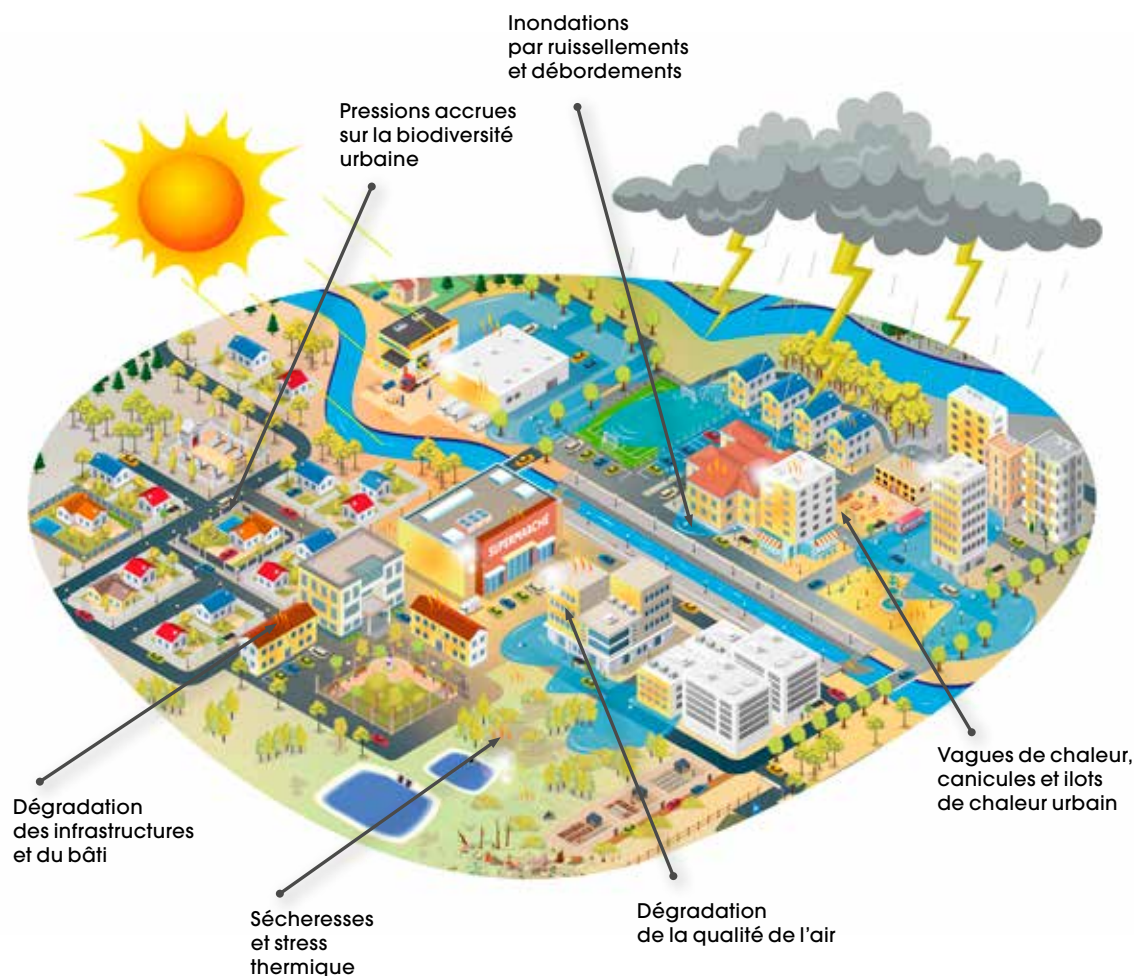


ZAC Paris Rive Gauche, jardins des Grands Moulins. © Corinne Legenne/L'Institut Paris Region

5 • LE MILIEU URBAIN



RAPPEL DES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE EN MILIEU URBAIN



En Île-de-France, où près de 90 % des habitants vivent dans des zones urbanisées et où la densité de population est huit fois plus importante qu'à l'échelle nationale, atteignant 20 000 hab/km² à Paris, les villes franciliennes sont particulièrement vulnérables aux effets du changement climatique. Les sols imperméabilisés, les cours d'eau canalisés, les pollutions de l'air et de l'eau, le manque d'espaces verts... sont autant de facteurs aggravants les impacts du changement climatique sur la santé humaine et de la biodiversité urbaine. Les différents effets du changement climatique en milieu urbain tendent à se cumuler et à interagir. Par exemple, une vague de chaleur peut s'accompagner d'une dégradation de la qualité de l'air, tandis qu'une période de sécheresse peut être suivie d'épisodes pluvieux intenses générant du ruissellement et des inondations. Cette combinaison d'aléas renforce la vulnérabilité globale des villes et complexifie la gestion des risques. © Illustration - edeo-design.com

Inondations par ruissellements et débordements

L'imperméabilisation des sols limite fortement l'infiltration de l'eau de pluie, entraînant une augmentation des volumes de ruissellement et une saturation rapide des réseaux d'assainissement. Les eaux de ruissellement, fréquemment chargées en polluants, ainsi que les eaux usées, sont davantage susceptibles d'être rejetées directement dans les milieux naturels, contribuant à la dégradation des cours

d'eau et à l'appauvrissement de la biodiversité aquatique. L'intensification des pluies extrêmes accroît le risque d'inondation urbaine, causé par débordement des réseaux ou ruissellement en surface. Ces événements, notamment associés à la canalisation des cours d'eau, peuvent également provoquer des inondations par débordements. Ces phénomènes peuvent provoquer des dégâts importants sur les infrastructures, les bâtiments et les réseaux, tout en perturbant fortement les mobilités et les

activités économiques. Entre 2013 et 2020, 65 % des arrêtés de catastrophe naturelle liés aux inondations concernent le ruissellement, contre 35 % pour les débordements de cours d'eau. Par ailleurs, 57 % des sinistres entre 1995 et 2019 ont eu lieu hors zones inondables, révélant l'importance croissante de ces phénomènes. Les crues « éclair » de juin 2016, qui ont touché 465 communes, dont Paris, résultent de la combinaison d'un ruissellement important lié aux pluies exceptionnelles et du débordement de plusieurs cours d'eau.

Pressions accrues sur la biodiversité urbaine

Le changement climatique accentue les pressions déjà exercées sur la biodiversité, notamment liées à la pollution, l'artificialisation des sols, la fragmentation des habitats... Les villes fonctionnent déjà comme des « filtres » écologiques, favorisant les espèces les plus tolérantes et entraînant une homogénéisation de la biodiversité (ARB idF, 2026). La multiplication des contraintes entraîne une diminution de la richesse spécifique et les espèces les plus sensibles, en particulier celles inféodées à des conditions thermiques plus fraîches, déclinent progressivement. *A contrario*, des espèces plus généralistes semblent s'adapter à ce nouveau contexte urbain, ce qui contribue à une simplification des communautés écologiques.

Dégradation des infrastructures et du bâti

L'alternance de sécheresses et de fortes précipitations peut provoquer des phénomènes de retrait-gonflement des argiles (RGA), fragilisant les bâtiments et les réseaux. Le risque RGA est la première cause de sinistralité devant les inondations en Île-de-France. D'ici 2050, l'impact du RGA devrait atteindre 138 millions d'euros de dommages en moyenne par an en Île-de-France contre 72 millions aujourd'hui d'après la Caisse centrale de réassurance (DRIEAT, 2025). Par ailleurs, les fortes chaleurs peuvent entraîner des dysfonctionnements des réseaux de transport et d'énergie, affectant le fonctionnement global de la ville.

Sécheresses et stress thermique

Les périodes de sécheresse plus longues et plus fréquentes accentuent les tensions sur la ressource en eau. La baisse de la recharge des nappes et des débits des cours d'eau peut fragiliser l'alimentation en eau potable, notamment en période estivale, lorsque la demande est maximale. Les espaces verts urbains sont également affectés, avec un stress hydrique accru qui limite leur capacité à jouer leur

rôle de régulation thermique et de support de biodiversité. À l'horizon 2050, 69 à 71 % des essences d'arbres urbains pourraient être menacées dans des villes comme Paris (Esperon-Rodriguez *et al.*, 2022).

Dégradation de la qualité de l'air

Les épisodes de chaleur favorisent la formation d'ozone troposphérique et aggravent les pollutions atmosphériques. En milieu urbain dense, ces phénomènes sont amplifiés par les émissions locales (trafic routier, chauffage, activités industrielles). La combinaison chaleur-pollution constitue un facteur de risque majeur pour la santé humaine, notamment pour les populations les plus vulnérables.

Vagues de chaleur, canicules et îlots de chaleur urbain

En milieu urbain, les surfaces minérales, souvent sombres, ainsi que les bâtiments absorbent le rayonnement solaire le jour et le restituent la nuit, entraînant un réchauffement marqué de l'air. Ce phénomène, appelé îlot de chaleur urbain (ICU), se traduit par des températures plus élevées dans les zones denses que dans les espaces ruraux environnants. À Paris, les écarts de température nocturne entre le centre-ville et des zones plus végétalisées comme les bois de Boulogne ou de Vincennes sont en moyenne de 2,5 °C, mais peuvent atteindre 8 °C en période de canicule et jusqu'à 10 °C lors de l'épisode de 2003 (Météo France, 2018).

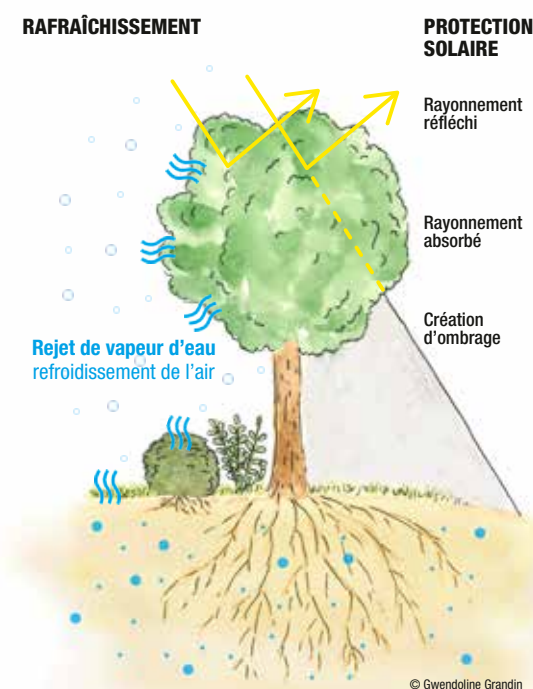
Les vagues de chaleur, amplifiées par cet effet, ont des impacts multiples sur les territoires urbains. Elles affectent la santé et le bien-être des populations, augmentent les besoins énergétiques liés au refroidissement des bâtiments et fragilisent la biodiversité (stress hydrique, perturbation des cycles biologiques, mortalité accrue). En Île-de-France, la canicule de 2022 a entraîné 325 décès supplémentaires, soit une surmortalité de 21 %. Les populations les plus vulnérables (personnes âgées, enfants ou ménages en situation de précarité énergétique) sont particulièrement exposés. D'après L'Institut Paris Region, 31 % de la population régionale résident dans des îlots considérés comme fortement vulnérables à la chaleur (Cordeau, 2026). La canicule de 2003 illustre l'ampleur du phénomène, avec une surmortalité atteignant +219 % dans le Val-de-Marne (IPR, 2022). À l'échelle européenne, une étude publiée dans *The Lancet Planetary Health* (2023) classe Paris parmi les villes les plus exposées au risque de mortalité lié à la chaleur, avec un risque multiplié par 1,6 chez les personnes de plus de 85 ans lors d'épisodes de températures élevées.

LES SFN EN MILIEU URBAIN

La végétalisation pour réduire les îlots de chaleur urbains

Les espaces de nature contribuent à faire baisser les températures, en particulier durant les mois les plus chauds, et participent ainsi à l'atténuation de l'effet d'îlot de chaleur urbain. La végétation, et plus particulièrement les arbres, rafraîchit la ville grâce à plusieurs mécanismes complémentaires : l'ombrage, la limitation de l'absorption et du stockage de chaleur (contrairement aux revêtements minéraux des routes ou des bâtiments) ainsi que le refroidissement de l'air ambiant par évapotranspiration (Soltanifard et Amani-Beni, 2025).

Si des solutions dites « grises », comme l'installation de brumisateurs ou l'usage de revêtements clairs (peintures blanches, matériaux réfléchissants), sont parfois privilégiées par les collectivités pour leur efficacité immédiate, elles n'offrent pas de co-bénéfices, notamment pour la biodiversité. À ce titre, les programmes de végétalisation des espaces publics (places, trottoirs, avenues, etc.) apparaissent particulièrement pertinents. Toutes les



L'évapotranspiration contribue au refroidissement de l'air, tandis que le houppier des arbres réfléchit une partie du rayonnement solaire, en absorbe une autre et crée des zones d'ombre. L'ensemble de ces mécanismes participe ainsi à l'amélioration du confort thermique (Schéma inspiré de l'APUR). © Gwendoline Grandin



COMPRENDRE

L'ÉVAPOTRANSPIRATION ET SON RÔLE DANS LE RAFRAÎCHISSEMENT URBAIN

L'évapotranspiration correspond à l'ensemble des flux d'eau vers l'atmosphère résultant de deux processus : l'évaporation et la transpiration des végétaux. L'évaporation concerne l'eau interceptée par les feuilles, l'eau stockée dans les sols ainsi que celle présente dans des plans d'eau ou rivières. La transpiration correspond, quant à elle, à la perte d'eau par les plantes : l'eau absorbée par les racines circule dans la plante puis s'évapore au niveau des feuilles à travers de minuscules orifices appelés stomates.

Ce processus de transpiration permet aux plantes de maintenir un gradient de pression nécessaire à la circulation de la sève et de refroidir leurs feuilles lorsque les températures sont élevées. Dans les deux cas, la transformation de l'eau liquide en vapeur nécessite de l'énergie sous forme de chaleur prélevée dans l'air ambiant. Cette consommation d'énergie entraîne un refroidissement très localisé de l'air ambiant. À savoir : l'intensité de l'évapotranspiration dépend de plusieurs facteurs comme les conditions météorologiques (température, humidité de l'air, vent, rayonnement solaire), les caractéristiques du sol et de la disponibilité en eau, ainsi que les propriétés de la végétation (espèce, surface foliaire, densité ou encore structure du couvert végétal).

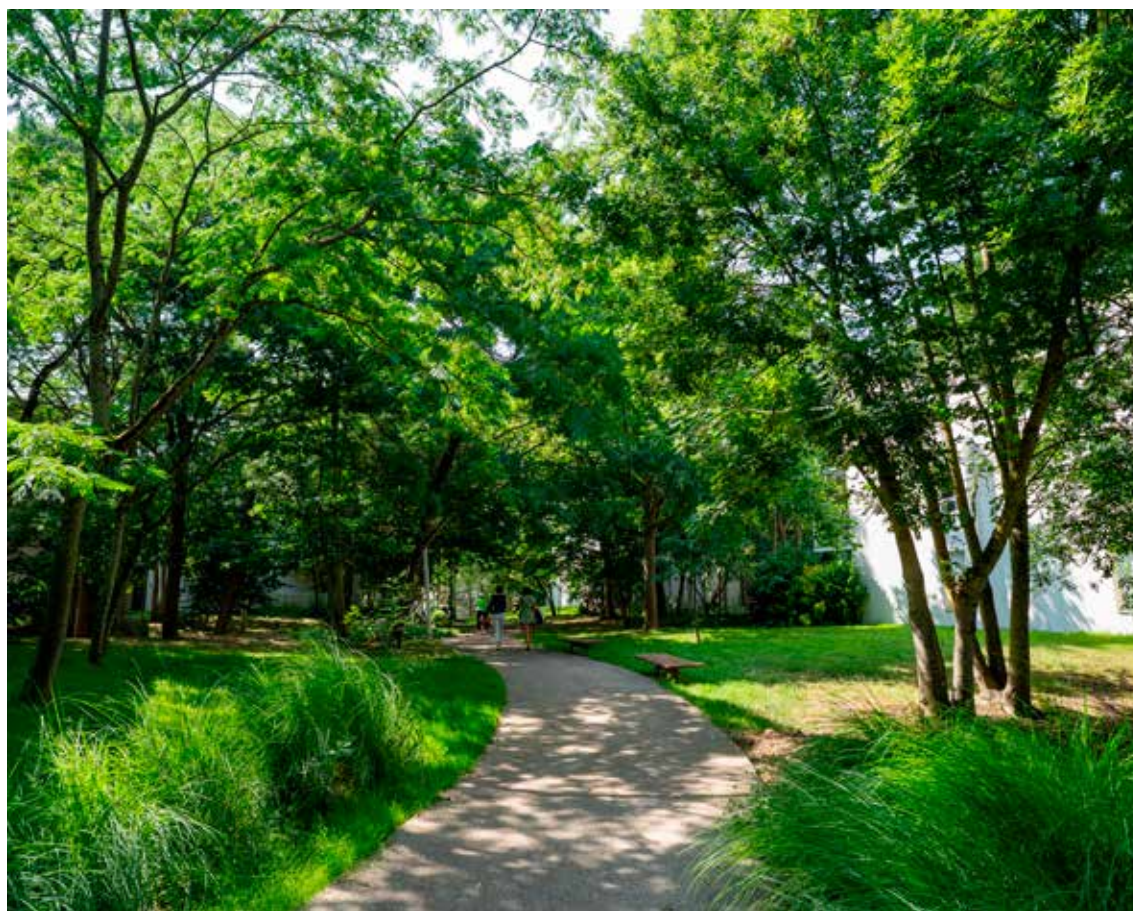
formes de végétation peuvent y contribuer : arbres isolés, alignements, haies, massifs de buissons ou d'arbustes. Toutefois, leur efficacité en matière de rafraîchissement varie selon les types de végétation. Les arbres figurent parmi les végétaux les plus performants pour réduire la température de l'air en journée. Ils associent un fort pouvoir d'ombrage à une capacité durable d'évapotranspiration, rendue possible par des systèmes racinaires profonds capables de mobiliser l'eau du sol sur de longues périodes. Deux synthèses bibliographiques récentes montrent que la présence d'arbres en ville peut entraîner une diminution locale de la température de l'air comprise entre 0,5 et 5,8 °C (Yang *et al.*, 2026), et réduire la température ressentie par les piétons jusqu'à 12 °C¹² (Li *et al.*, 2024).

12. La température ressentie, distincte de la température de l'air mesurée, correspond à la sensation de froid ou de chaleur perçue par une personne. Elle est estimée à partir d'indices météorologiques intégrant plusieurs paramètres (température de l'air, humidité, vent, rayonnement solaire), ainsi que des facteurs physiologiques, tels que le refroidissement du corps lié à l'évaporation de la sueur à la surface de la peau.

Tous les arbres ne présentent cependant pas le même potentiel de rafraîchissement. Certaines espèces développent des stratégies d'adaptation à la sécheresse, telles que des feuilles petites ou épaisses, ou encore la fermeture des stomates durant la journée. Si ces caractéristiques limitent les pertes en eau, elles réduisent également l'évapotranspiration et, par conséquent, la capacité de refroidissement. Dans cette perspective, il convient d'éviter aussi bien les espèces très consommatrices d'eau, susceptibles de subir rapidement un stress hydrique, que les espèces extrêmement économes, dont l'effet rafraîchissant demeure limité.

Les essences généralement recommandées pour rafraîchir les villes se distinguent par une surface foliaire importante, composée de feuilles larges et nombreuses. Les feuillus apparaissent globalement plus efficaces que les conifères, en raison de taux de transpiration plus élevés (Soltanifard et Amani-Beni, 2025). Certaines essences présentent un effet particulièrement marqué, comme plusieurs espèces de chênes (*Quercus petraea*, *Quercus robur*), d'érables (*Acer pseudoplatanus*, *Acer platanoides*) ou d'ormes (*Ulmus laevis*, *Ulmus minor*), le tilleul à grandes

feuilles (*Tilia platyphyllos*) ou encore le charme commun (*Carpinus betulus*) (Amossé et al., 2024). Des outils d'aide au choix des espèces existent pour accompagner les collectivités, notamment l'étude Sésame du Cerema, déclinée aux contextes parisiens et séquanodionysiens. Par ailleurs, les arbres matures offrent des performances supérieures à celles des jeunes sujets grâce à un houppier plus développé (Sabrin et al., 2023 ; Stanley et al., 2019). Une vigilance particulière s'impose donc face aux stratégies reposant principalement sur de vastes programmes de plantation lorsqu'elles ne s'accompagnent pas d'un volet de préservation de l'existant. Le maintien des arbres déjà présents, en particulier des sujets les plus âgés, constitue un levier prioritaire. En effet, même si leur effet rafraîchissant varie selon l'état du houppier, ils offrent davantage d'habitats pour la biodiversité et ne nécessitent pas d'arrosage, contrairement aux jeunes plantations. Cette approche est notamment portée par le Plan canopée de la Seine-Saint-Denis ou celui de la ville de Strasbourg, qui visent à la fois l'augmentation de la couverture arborée et la préservation du patrimoine arboré existant.



Les arbres combinent un fort pouvoir d'ombrage et une capacité d'évapotranspiration importante, ce qui les rend particulièrement efficaces pour améliorer le confort thermique en milieu urbain. © Gilles Lecuir



Les programmes de plantation pour rafraîchir la ville doivent veiller en priorité à la protection du patrimoine existant, en particulier les arbres âgés qui offrent de nombreux micro-habitats pour la faune. © Gwendoline Grandin



L'IMPORTANCE DE LA DISPONIBILITÉ EN EAU

Lorsque l'eau vient à manquer, les plantes limitent leur transpiration afin de se protéger des risques d'embolie dans leurs vaisseaux conducteurs.

L'effet rafraîchissant des plantes par évapotranspiration n'est donc possible que si elles disposent d'une quantité d'eau suffisante, ce qui peut constituer une contrainte en période estivale (Marquet *et al.*, 2018).

Au-delà du choix des essences, il est essentiel de favoriser l'infiltration naturelle et la rétention de l'eau dans les sols. Maintenir des espaces de pleine terre, favoriser des fosses continues ou encore multiplier les ouvrages de gestion alternative des eaux pluviales (jardins en creux, noues, mares) sont des stratégies pertinentes.

Dans cette perspective, la Métropole du Grand Lyon a développé le concept d'arbre de pluie. Il consiste

à désimperméabiliser les abords des pieds d'arbres, agrandir les fosses de plantation et adapter les bordures ou les pentes afin de diriger les eaux de ruissellement vers les arbres.

Cette solution favorise l'infiltration des pluies, réduit le ruissellement urbain et améliore l'alimentation en eau des arbres, renforçant ainsi leur croissance tout en apportant ombre et fraîcheur durant l'été. À titre indicatif, certains chercheurs préconisent un ratio d'environ 0,6 à 1 m³ de sol par m² de houppier projeté, ce qui implique des volumes supérieurs à 30 m³ pour un arbre de développement moyen (Lindsey et Bassuk, 1991). Lorsque le contexte le permet, la conception de fosses continues ou connectées est à privilégier par rapport aux fosses individuelles.



La mutualisation des volumes de sol permet aux systèmes racinaires de s'étendre davantage et de partager les ressources hydriques, offrant ainsi une résilience nettement supérieure © Stéphanie Lux

AMÉLIORER LA QUALITÉ DE L'AIR PAR LA VÉGÉTATION : POTENTIELS ET LIMITES

L'augmentation des fortes chaleurs favorise la dégradation de la qualité de l'air, notamment en accentuant la formation d'ozone à partir de polluants précurseurs issus des activités automobiles et industrielles. Dans ce contexte, les SfN, à travers les stratégies de végétalisation, constituent des leviers intéressants pour améliorer la qualité de l'air en milieu urbain.



LA DIVERSITÉ DES POLLUANTS ATMOSPHÉRIQUES

Les polluants atmosphériques regroupent un large ensemble de familles chimiques aux propriétés et durées de vie très variées. Les lignes directrices de l'Organisation mondiale de la Santé identifient toutefois un nombre restreint de polluants prioritaires en raison de leurs impacts avérés sur la santé humaine : les particules fines ($PM_{2.5}$ et PM_{10}), l'ozone (O_3), le dioxyde d'azote (NO_2), le dioxyde de soufre (SO_2) et le monoxyde de carbone (CO) (Organisation mondiale de la Santé, 2021). En milieu urbain, ces polluants proviennent principalement du trafic routier, du chauffage résidentiel (notamment au bois et au fioul), des activités industrielles, ainsi que des chantiers et travaux, qui contribuent aux émissions de particules et à la remise en suspension de poussières.

La végétation, qu'il s'agisse d'arbres, de haies ou de parcs, peut améliorer la qualité de l'air par différents mécanismes : interception des particules, absorption de certains polluants gazeux, modification locale du microclimat et effet d'écran vis-à-vis des sources d'émission. L'efficacité de ces processus dépend toutefois de nombreux facteurs : nature des polluants, espèces végétales, structure foliaire, densité du couvert, conditions météorologiques, disponibilité en eau et positionnement par rapport aux sources de pollution. Les arbres sont généralement les plus efficaces pour capter les polluants, notamment lorsqu'ils sont de grande taille. Les sujets matures (diamètre du tronc > 76 cm à 1,37 m du sol) peuvent éliminer des quantités de polluants plusieurs dizaines de fois supérieures à celles des jeunes arbres (Lauwaet *et al.*, 2020). Les espèces à feuillage dense, composées de petites feuilles, rugueuses ou poilues, sont plus perfor-

mantes pour la captation des particules que celles à couronne ouverte, dotées de grandes feuilles lisses (Amossé *et al.*, 2024 ; Gauthray-Guyénet *et al.*, 2022). Les surfaces foliaires cireuses peuvent aussi adsorber certains polluants organiques liposolubles, tels que les polychlorobiphényles (PCB) et les dioxines (Lauwaet *et al.*, 2020).

Pour la captation des particules fines, on peut notamment citer le tilleul (*Tilia cordata*, *Tilia platyphyllos*), le saule blanc (*Salix alba*), le chêne pubescent (*Quercus pubescens*) et le charme commun (*Carpinus betulus*) (Amossé *et al.*, 2024). Parmi les arbustes, le néflier commun (*Mespilus germanica*) et le cornouiller sanguin (*Cornus sanguinea*) contribuent également à cet effet, tandis que le lierre (*Hedera helix*), en tant que plante grimpante, joue un rôle complémentaire (Sternberg *et al.*, 2010).

Concernant l'absorption des polluants gazeux, plusieurs espèces se distinguent également, telles que le noyer commun (*Juglans regia*), les chênes (*Quercus robur*, *Quercus petraea*), le peuplier tremble (*Populus tremula*), les tilleuls, le merisier (*Prunus avium*), les érables (*Acer campestre* et *Acer platanoides*), le châtaignier (*Castanea sativa*), l'aubépine (*Crataegus monogyna*), ainsi que certaines espèces arbustives comme les ronces et le sureau noir (*Sambucus nigra*) (Amossé *et al.*, 2024).

À ce jour, quelques outils permettent de sélectionner des essences spécifiquement au regard de la qualité de l'air. L'outil Sésame du Cerema consti-



Tilleul à petites feuilles. © Audrey Muratet



Lierre grimpant. © Gilles Lecuir

tue la principale référence en France, en intégrant notamment des indicateurs relatifs à la captation des polluants et aux émissions de composés organiques volatils.

Cependant, l'amélioration de la qualité de l'air par la végétation présente plusieurs limites (Maison *et al.*, 2024). En effet, la majorité des particules captées restent déposées à la surface des feuilles et peuvent être remises en suspension ou lessivées par la pluie. La végétation agit donc davantage comme un réservoir temporaire que comme un puits permanent de pollution. Si des aménagements végétalisés peuvent jouer le rôle d'écrans physiques, réduisant l'exposition des populations lorsqu'ils sont suffisamment denses, dans les rues étroites à fort trafic (effet « canyon ») une implantation inadaptée des arbres peut au contraire freiner la ventilation naturelle et favoriser l'accumulation de polluants.

Enfin, la contribution globale du patrimoine arboré urbain à la qualité de l'air fait débat d'un point de vue quantitatif (Amossé *et al.*, 2024). Bien qu'il soit établi que les arbres piègent des polluants, cette rétention est-elle significative par rapport aux émissions totales ? L'exemple de l'Eurométropole de Strasbourg montre, en comparant le taux d'élimination des polluants par les arbres et les taux d'émission atmosphérique, que la végétation urbaine permet d'éliminer 0,03 % du CO, 7 % des PM₁₀, 1,5 % des PM_{2,5} et 0,5 % du SO₂ (Selmi *et al.*,



Érable champêtre. © Audrey Muratet



Chêne pubescent. © Audrey Muratet

2016). Ces travaux de modélisation démontrent un effet non négligeable, en particulier sur la pollution particulaire, qui pourrait être renforcé par des actions visant à augmenter la couverture arborée. Néanmoins, les auteurs s'accordent pour souligner que, pour améliorer réellement la qualité de l'air, la priorité reste la réduction des émissions à la source, la végétation devant être considérée comme un levier complémentaire.

Disservices liés à la qualité de l'air : émissions de COVB et de pollens

Outre leurs nombreux bénéfices, les végétaux peuvent aussi générer des disservices¹³, notamment via les émissions de composés organiques volatils (COV) et de pollens. Certains COV émis par les plantes (isoprènes, monoterpènes...) participent à la formation de particules fines (PM₁₀ et PM_{2,5}) ou d'ozone – en particulier en présence de fortes concentrations de NO_x et en conditions de forte chaleur et d'ensoleillement (Churkina *et al.*, 2017). Outre le fait d'éviter les espèces les plus émettrices, la diversification des espèces apparaît comme la stratégie la plus robuste pour limiter les émissions de COV, car l'efficacité du choix d'une espèce peu émettrice reste très dépendante du contexte local (climat, conditions urbaines, interactions avec d'autres plantes). Des études montrent que moins la diversité spécifique est élevée, plus les émissions de COVB sont importantes (Ren *et al.*, 2017). Par ailleurs, en rafraîchissant localement l'air, les arbres contribuent indirectement à limiter la formation d'ozone (Amossé *et al.*, 2024).

Les émissions de pollens constituent un autre enjeu. Leur prise en compte reste complexe, en raison de l'absence de consensus sur l'allergénicité des espèces (Gauthray-Guyénet *et al.*, 2022). Toutefois, plusieurs facteurs sont identifiés comme pouvant aggraver le risque allergique : la surreprésentation d'arbres mâles (pour l'absence de production de fruits), une faible diversité spécifique et une densité insuffisante de végétation (Cariñanos *et al.*, 2017 ; Nowak and Ogren, 2021 ; Sousa-Silva *et al.*, 2021). Ces résultats appuient les recommandations visant à diversifier les plantations, non seulement au niveau des espèces mais aussi à des niveaux taxonomiques plus élevés (famille, ordre) (Paquette *et al.*, 2021 ; Sousa-Silva *et al.*, 2021).

13. Fonctions écologiques perçues comme négatives pour le bien-être humain.



Les espaces arborés à structure pluristratifiée présentent généralement les effets de rafraîchissement les plus élevés.
© Gabrielle Huart

Les parcs urbains comme îlots de fraîcheur

Comme pour la végétation, tous les espaces de nature ne participent pas de la même façon au rafraîchissement des villes. En journée, les milieux herbacés sont moins efficaces que les formations arborées pour réduire la température de l'air. Si le rafraîchissement direct de la végétation herbacée reste modeste, son influence globale demeure significative grâce à la faible inertie thermique des sols (comparativement aux surfaces minéralisées) et aux flux d'évaporation de l'eau contenue dans le sol. La nuit, la réduction des processus de transpiration et le piégeage du rayonnement thermique sous la canopée tendent à limiter l'avantage des formations arborées. Dans ce contexte, les surfaces herbacées peuvent présenter des températures nocturnes comparables, voire inférieures, à celles des zones arborées. Ainsi, le maintien d'espaces de pleine terre intégrant une diversité de strates végétales constitue une SfN pertinente pour atténuer les températures urbaines.

Dans les boisements urbains et les parcs arborés, l'effet d'îlot de fraîcheur en journée dépend principalement de la densité et de la structure de la canopée,

à la fois horizontale et verticale (Wang *et al.*, 2023). La diversité et l'organisation des strates végétales jouent ainsi un rôle déterminant. Les espaces combinant plusieurs hauteurs de végétation (arbres, arbustes et plantes basses) sont généralement les plus efficaces pour abaisser les températures (Best *et al.*, 2023 ; Pattnaik *et al.*, 2025). Au-delà des programmes de création de boisements urbains, aussi appelés micro-forêts, la diversification des strates dans les parcs déjà arborés constituerait donc une solution à la fois efficace et relativement peu coûteuse pour améliorer leur pouvoir rafraîchissant.

Outre la composition des communautés végétales, la surface des espaces de nature influence l'ampleur et la portée de l'effet de refroidissement. À Londres, des parcs de 5 à 15 ha génèrent une baisse de température de 0,6 à 1 °C perceptible jusqu'à 180 à 330 m au-delà de leurs limites, tandis que les squares de moins de 0,5 ha ont un impact limité (Vaz Monteiro *et al.*, 2016). Une étude de l'APUR (Atelier parisien d'urbanisme) menée au parc des Buttes Chaumont met en évidence une différence de 4 °C entre le parvis de la gare de l'Est et l'entrée du parc, avec un rafraîchissement particulièrement marqué à proximité immédiate de celui-ci (APUR, 2012).

Une synthèse récente suggère qu'un seuil d'environ 1 ha distingue les espaces de nature capables de diffuser un refroidissement à plusieurs centaines de mètres (300 à 500 m) des petits espaces, dont les effets dépassent rarement 100 à 200 m (Soltanifard et Amani-Beni, 2025). Ces seuils constituent des repères utiles pour orienter les projets de renouvellement urbain ou de renaturation. Afin d'améliorer durablement le confort thermique en ville, il apparaît préférable de préserver ou de créer des espaces de nature continus dont la surface se rapproche des seuils identifiés, plutôt que de se limiter à une multiplication de petits aménagements dispersés, dont les effets restent plus localisés et de moindre portée. Enfin, l'organisation des parcs et autres espaces de nature à l'échelle de la ville joue un rôle déterminant. Multiplier les espaces de nature ombragés et les connecter entre eux permet de renforcer leur effet

cumulatif (Bruxelles environnement, 2025 ; Soltanifard et Amani-Beni, 2025b). Plus le réseau de jardins, parcs et espaces de nature est dense et étendu, plus le refroidissement devient significatif et perceptible à grande échelle. La localisation des espaces de nature est également importante : placés au vent de la ville, ils peuvent contribuer à diffuser l'air plus frais vers d'autres quartiers. Ce constat souligne qu'en matière d'adaptation climatique, les espaces de nature doivent être pensés comme un système plutôt que comme une juxtaposition d'éléments isolés. Il convient ainsi de relier parcs, squares, alignements d'arbres, berges, friches végétalisées et jardins au moyen de corridors végétalisés et de continuités paysagères. L'objectif est de constituer une véritable trame de fraîcheur urbaine, tout en renforçant simultanément les continuités écologiques.



DOIT-ON SYSTÉMATISER LA PLANTATION DE MICRO-FORÊTS POUR AMÉLIORER L'ADAPTATION DES VILLES ?

Face à la volonté d'atténuer le changement climatique, de préserver la biodiversité et de répondre à une forte attente citoyenne, de nombreuses villes développent des « micro-forêts urbaines ». Selon une étude de Plante & Cité, 41 % d'entre elles appliquent, totalement ou partiellement, la méthode Miyawaki (Laille *et al.*, 2023). Conçue initialement pour restaurer des formations forestières tropicales et subtropicales par des plantations très denses, cette méthode reste peu documentée sous les climats tempérés. Les bénéfices souvent avancés (croissance rapide, captation du carbone, îlots de fraîcheur, gain de biodiversité) doivent donc être nuancés. Des alternatives, souvent moins coûteuses, existent : favoriser la recolonisation spontanée de la végétation, réaliser des plantations moins denses, ou préserver durablement boisements, forêts et vergers (Houeix *et al.*, 2025).



L'écoquartier de la Bottière-Chênaie, à Nantes, intègre des espaces laissés en libre évolution qui ont évolué en une quinzaine d'années vers les premiers stades d'un boisement. © Gilles Lecuir

Les villes éponges

En milieu urbain, les SfN destinées à limiter les risques d'inondation, de ruissellement et de pollution des eaux pluviales s'appuient sur la capacité des sols et de la végétation à ralentir les écoulements, favoriser l'infiltration et assurer un stockage temporaire de l'eau. Elles marquent une rupture avec le modèle historique du « tout-tuyau », fondé sur l'évacuation rapide des eaux vers les réseaux, en privilégiant au contraire une gestion à la source des eaux pluviales.

Cette approche, aujourd'hui largement regroupée sous les notions de ville éponge ou de gestion intégrée des eaux pluviales¹⁴, se déploie à différentes échelles (du quartier à la ville, jusqu'au bassin versant) et mobilise une diversité d'actions : protection des sols, renaturation d'espaces artificialisés, désimperméabilisation, restauration de zones humides, création de parcs inondables, etc.

Dans cette perspective, la qualité et la protection des sols constituent un levier central. Les documents d'urbanisme, notamment les PLU, peuvent intégrer des outils comme les coefficients de pleine terre afin de limiter l'imperméabilisation et de maintenir des surfaces infiltrantes. Au-delà de la quantité de sols préservés, leur qualité physique et biologique doit également être prise en compte. La ZAC de la Courrouze à Rennes illustre cette démarche : un diagnostic préalable des sols et des écoulements a permis d'adapter le nouveau quartier au site, de préserver la végétation existante et de limiter le tassement des sols dès la phase chantier.

14. La gestion intégrée des eaux pluviales relève ainsi d'une approche globale. Tandis que la gestion alternative repose sur la mise en œuvre d'ouvrages végétalisés et infiltrants permettant de gérer les eaux au plus près de leur point de chute (voir page 90).



QUEL RÔLE DES SFN DANS LA DÉPOLLUTION DES EAUX DE RUISSellement ?

Les eaux de pluie se chargent progressivement en polluants, d'abord par les retombées atmosphériques, puis par le ruissellement sur les surfaces urbaines (voiries, toitures...). Leur niveau de pollution dépend notamment de l'usage des sols, de l'intensité du trafic et surtout de la distance parcourue en surface, qui favorise l'accumulation des contaminants (Bacot *et al.*, 2022 ; Barraud et Bertrand-Krajewski, 2022). Les SfN permettent de réduire ces pollutions sans toutefois les éliminer complètement, grâce à des mécanismes de filtration, décantation et rétention dans les sols et la végétation. Leur efficacité dépend du type de polluant et des caractéristiques des ouvrages (type de sol, communautés végétales et microbiennes présentes). Elles contribuent ainsi surtout à limiter la diffusion des contaminants.

Des travaux du GRAIE montrent que le risque de pollution des sols et des nappes reste faible lorsque l'infiltration est réalisée au plus près du point de chute (Chocat *et al.*, 2022).

Dans ce cadre, il est recommandé de limiter les distances de ruissellement afin de réduire la concentration de polluants dans les écoulements. Le rôle dépolluant des ouvrages peut être renforcé par des aménagements spécifiquement conçus pour améliorer la qualité des eaux pluviales, tels que les roselières, lagunes, prairies filtrantes ou fossés drainants. Ceux-ci assurent une filtration complémentaire et une dépollution partielle des eaux avant leur rejet dans le milieu naturel.

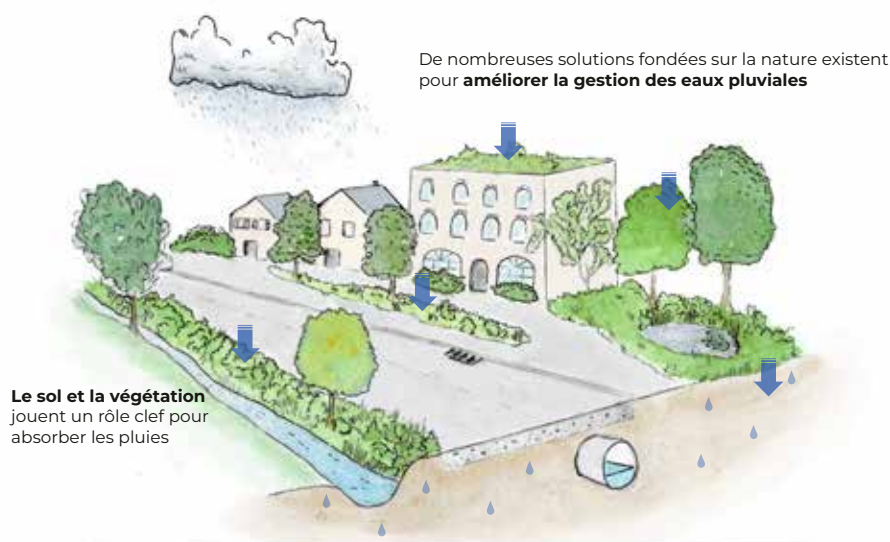


Illustration du concept
de ville éponge inspirée
de Boris Transinne.
© Gwendoline Grandin

Les parcs urbains peuvent jouer un rôle structurant dans la gestion des eaux pluviales et la limitation des risques d'inondation à l'échelle des quartiers et des villes. Selon leur conception, ils permettent d'articuler plusieurs fonctions : ralentissement des ruissellements, stockage temporaire lors d'épisodes pluvieux intenses (notamment dans des jardins en creux), puis infiltration progressive dans les sols. Les parcs inondables sont conçus comme des systèmes multifonctionnels, conciliant gestion du risque et usages quotidiens. Certains peuvent ainsi être temporairement inondés en cas de fortes pluies tout en restant accessibles en période sèche.

À Brest, le parc de Kertatupage a ainsi été repensé pour accueillir les eaux pluviales du quartier, inondé lors d'épisodes intenses. Les travaux ont permis de creuser certaines zones, de rouvrir un cours d'eau auparavant canalisé et de créer des mares favorables aux amphibiens. En Île-de-France, la ZAC des Chênevreux à Nanterre (92) illustre également cette approche intégrée : un réseau de noues y redirige les eaux de ruissellement vers un parc structuré autour d'une succession d'ouvrages paysagers dédiés à la gestion des eaux pluviales. Certains espaces restent en eau permanente tandis que d'autres deviennent temporairement inondables, tout en conservant leurs usages de promenade et de loisirs. Labellisé EcoJardin depuis 2013, le parc met également en évidence l'intérêt économique des solutions alternatives de gestion des eaux pluviales. Une évaluation de l'ARB Île-de-France (2015) estime le coût de gestion entre 6,33 et 11,06 €/m³, contre au moins 37,07 €/m³ pour une infrastructure grise équivalente.



À la Courrouze, les ouvrages de gestion intégrée des eaux pluviales ont été conçus en s'appuyant sur les milieux naturels de l'ancienne friche. © Gilles Lecuir



Le parc des Chênevreux, labellisé EcoJardin, combine gestion et dépollution des eaux pluviales avec le maintien d'usages récréatifs. © Arp Astrance



La reconfiguration du parc de Kertatupage a permis de renforcer l'infiltration et le stockage des eaux pluviales à l'échelle du quartier. © Gilles Lecuir



Le projet paysager du quartier Victor Hugo à Bagneux privilégie une gestion à ciel ouvert des eaux pluviales par un réseau de noues. © Boegly Grazia

Les ouvrages de gestion des eaux pluviales pour limiter le ruissellement

Les ouvrages de gestion alternative des eaux pluviales sont des dispositifs végétalisés permettant de limiter le ruissellement et, par extension, de réduire les risques d'inondation. Fortement soutenues par les Agences de l'eau, ces solutions se déclinent sous forme de toitures végétalisées, noues, mares ou jardins de pluie. Lorsqu'ils sont à ciel ouvert et végétalisés, ces aménagements relèvent des SfN, à la différence des ouvrages entièrement artificialisés ou enterrés (infrastructure grise).

Les jardins de pluie sont de petites dépressions végétalisées conçues pour recevoir temporairement les eaux de ruissellement et les stocker avant leur infiltration. De taille plus modeste que les parcs inondables, ils participent principalement à la gestion du ruissellement à l'échelle locale. Les noues végétalisées assurent quant à elles la collecte, le ralentissement et l'infiltration des eaux, tout en pouvant les rediriger vers d'autres ouvrages. Faciles à intégrer en milieu urbain, elles trouvent leur place le long des voiries, des cheminements ou dans les espaces de nature.

À Bagneux (92), lors du renouvellement du quartier Victor Hugo, de nombreuses noues ont été aménagées, parfois en remplacement d'espaces minéralisés, renforçant la présence du végétal tout en limitant le ruissellement. Une démarche d'information auprès des habitants a également permis

d'en faciliter l'acceptation, notamment face aux inquiétudes liées aux moustiques (cf. encart p. 91). À Courbevoie (92), une rue transformée en impasse piétonne le long du collège Georges Pompidou a été réaménagée avec des pavés non jointés et une noue végétalisée, conciliant infiltration et accessibilité.

Les mares constituent également des micro-milieus particulièrement utiles pour la gestion des eaux pluviales. Permanentes ou temporaires, elles contribuent au stockage, à la régulation des écoulements et parfois à l'amélioration de la qualité des eaux de ruissellement. Elles présentent aussi un fort intérêt



À Courbevoie (92), la noue de l'avenue du Château du Loire limite le ruissellement. © Gilles Lecuir



La mare aménagée dans le parc de Saint-Hilaire (91) contribue à la gestion des eaux pluviales et à la biodiversité locale. © SIARJA

écologique en offrant des habitats à de nombreuses espèces, notamment les amphibiens, les insectes et les oiseaux. Leur développement tend aujourd'hui à se généraliser, aussi bien en milieu urbain dense qu'en contexte plus rural. Elles sont fréquemment intégrées dans des parcs existants, comme à Saint-Hilaire (91), où une mare a été aménagée avec l'appui du SIARJA afin de garantir des conditions favorables à la biodiversité. À Antony (92), le Parc du Bois de l'Aurore a fait l'objet d'études hydrologiques et pédologiques pour déterminer le cheminement du ruissellement et identifier les espaces les plus pertinents pour accueillir les noues et les mares. Les nouveaux aménagements, permettent désormais au parc de réguler des épisodes de pluies torrentielles.



LES TECHNIQUES ALTERNATIVES DE GESTION DES EAUX PLUVIALES FAVORISENT-ELLES LE DÉVELOPPEMENT DES POPULATIONS DE MOUSTIQUES ?

Dans leur grande majorité, les techniques alternatives de gestion des eaux pluviales ne créent pas de conditions propices au développement des larves de moustiques, celles-ci nécessitant une présence continue d'eau libre en surface pendant plusieurs jours consécutifs (Bacot *et al.*, 2022).

Lorsqu'une solution repose sur l'infiltration, la principale vigilance consiste donc à vérifier qu'aucune zone ne reste en eau au-delà de ce délai. Pour les plans d'eau permanents, la prévention repose avant tout sur le maintien d'un écosystème équilibré, favorisant la présence de prédateurs naturels des larves (amphibiens, larves de libellules ou de coléoptères) et des adultes (oiseaux, chauves-souris, araignées...). Par ailleurs, ces milieux ne sont généralement pas favorables au moustique tigre, qui privilégie des gîtes de petite taille, temporaires et artificialisés (bouche d'égout bouchée, bassins bétonnés, gouttières, eaux stagnantes des bacs à fleurs...).

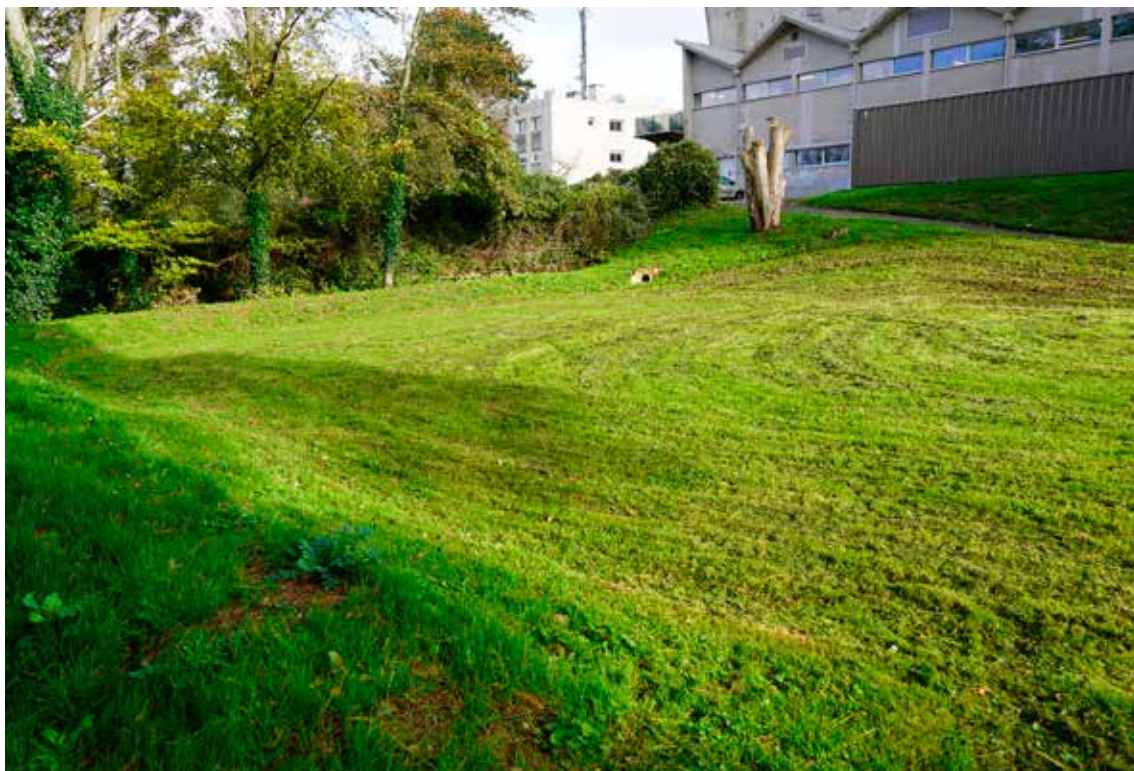
Ainsi, le risque d'augmentation des populations de moustiques lié aux techniques alternatives est souvent surévalué et peut être efficacement maîtrisé par des principes simples de conception, de gestion et d'entretien.



Exemple de mare creusée au Bois de l'Aurore à Antony (92) pour réguler les eaux de pluies. © Gabrielle Huart

À l'échelle du bâti, les toitures peuvent contribuer à la gestion des eaux pluviales lorsqu'elles sont végétalisées, sans toutefois remplacer aussi efficacement les espaces de pleine terre. Une épaisseur de substrat de 8 à 10 cm est généralement recommandée pour retenir les pluies courantes (environ 8 mm sur 24 h, cf. page 100). Lorsque la végétalisation des toits n'est pas envisageable, les eaux de toiture peuvent être déconnectées du réseau et redirigées vers des

espaces de nature proches. Cette approche est mise en œuvre par la Métropole de Brest, qui encourage la déconnexion des descentes de gouttières en redirigeant les eaux pluviales vers des espaces végétalisés existants. Le centre sportif Foch en offre un exemple : l'eau des toitures a été redirigée vers les espaces de nature qui ont été réaménagés afin de favoriser l'infiltration directe des eaux de pluie.



Les descentes de gouttières sont détournées et orientées vers les espaces de nature à proximité du centre sportif Foch à Brest. © Gilles Lecuir



DES BÉNÉFICES ÉCOLOGIQUES CONDITIONNÉS PAR LA CONCEPTION ET LA GESTION

Les ouvrages de gestion alternative des eaux pluviales peuvent contribuer au maintien de la biodiversité en ville, mais ces bénéfices ne sont pas automatiques. Ils dépendent étroitement de leur conception, de leur mise en œuvre et de leur entretien, qui conditionnent aussi leurs performances hydrologiques. Ainsi, une étude de Plante & Cité (Dagois *et al.*, 2025) met en évidence des niveaux de qualité écologique très variables pour les noues urbaines, tandis que Monberg *et al.*, (2019) montrent que leur potentiel n'est pleinement atteint que lorsque des objectifs écologiques sont intégrés dès l'amont du projet. Cela suppose de concevoir des aménagements diversifiés et végétalisés toute l'année,

en privilégiant plusieurs strates de végétation (herbacées, arbustes, voire arbres). Ces structures améliorent l'interception des pluies, ralentissent les écoulements et favorisent l'infiltration. À l'inverse, des dispositifs simplifiés ou trop entretenus, comme des noues tondues à ras, réduisent fortement ces fonctions. Enfin, plusieurs études montrent que la diversité végétale et l'activité biologique des sols, notamment celle des vers de terre, renforcent significativement la capacité d'infiltration (Fischer *et al.*, 2014). À ce titre, l'ARB Île-de-France a publié une synthèse bibliographique et des préconisations pour mieux intégrer la biodiversité dans la conception et la gestion des eaux pluviales (Barra, 2020).

La désimperméabilisation des sols

Dans une logique de gestion durable des eaux pluviales, la désimperméabilisation des sols vise à restaurer le petit cycle de l'eau en redonnant aux surfaces urbaines leur capacité à infiltrer les eaux de pluie. Elle peut se traduire soit par le remplacement d'un revêtement imperméable par un revêtement drainant, soit par le déscellement des sols conduisant à la restauration d'un espace de nature. La désimperméabilisation constitue ainsi un terme générique. Il regroupe différents types d'interventions poursuivant des objectifs communs mais présentant des ambitions écologiques variables. À l'inverse, la renaturation des surfaces minéralisées implique systématiquement le retrait de la couche imperméable et la restauration d'un écosystème fonctionnel, avec des effets plus complets sur le cycle de l'eau, la biodiversité et les sols (cf. page 118). Ces dernières années, l'usage des revêtements perméables s'est fortement développé, parfois au détriment du maintien d'espaces en pleine terre, notamment dans les cours d'école ou au pied des arbres. Leur utilisation donc être ciblée et prioritairement réservée aux zones soumises à des contraintes d'usage, telles que les cheminements piétons et cyclables, les voies de circulation ou les aires de stationnement. Dès lors que les usages et l'espace le permettent, il est préférable d'engager des opérations de renaturation des surfaces minéralisées. Ces deux approches peuvent néanmoins être combi-



Parking perméable à La Motte-Servolex où les eaux de ruissellement excédentaires sont redirigées vers des noues. © Jonathan Flandin

nées de manière complémentaire à l'échelle d'un site. C'est par exemple le cas à Tours, dans le cadre d'un projet de désimperméabilisation de la cour de l'école Jules Verne : les cheminements ont été aménagés à l'aide de pavés non jointés afin de permettre l'infiltration des eaux pluviales, tandis que des espaces en pleine terre ont été créés en complément pour renforcer les fonctions écologiques du site. À La Motte-Servolex (73), un parking a été rendu perméable et complété par une zone tampon permettant de rediriger les eaux de ruissellement excédentaires vers des noues.



Désimperméabilisation d'une cour d'école à Tours, avec création d'espaces en pleine terre. © Gilles Lecuir



LA RENATURATION : UN CONCEPT ÉTROITEMENT LIÉ AU SOL

La renaturation suppose un retour à la pleine terre, c'est-à-dire à des sols vivants et fonctionnels, dont la continuité physique avec la roche mère est maximale, dans la mesure du possible, même si elle peut être ponctuellement interrompue par des infrastructures souterraines (métro, réseau électrique, etc.). À ce titre, certains aménagements ne relèvent pas de la renaturation : toitures végétalisées, potagers urbains en bacs, espaces sur dalle ou murs végétalisés modulaires. Bien qu'ils contribuent à l'augmentation des surfaces végétalisées, ces dispositifs ne permettent pas de restaurer les fonctions écologiques des sols.



Le Débitumeur est une œuvre d'art imaginée par Jean Jullien et installée dans une première opération renaturation d'un parking près du château des ducs de Bretagne à Nantes. © Gabrielle Huart

La renaturation des espaces minéralisés

La renaturation désigne les actions visant à restaurer un écosystème dégradé par les activités humaines (Deboeuf de Los Ríos *et al.*, 2022). Proche de la restauration écologique, elle constitue un type de SfN déployable en milieu urbain.

La renaturation des espaces bétonnés est particulièrement intéressante pour atténuer les effets du changement climatique. Les surfaces minéralisées renforcent en effet des phénomènes comme les ICU ou le ruissellement. En remplaçant progressivement ces sols par des espaces de pleine terre, la renaturation favorise l'infiltration des eaux de pluie, limite les risques d'inondation et réduit les températures en ville. Elle contribue également au retour de la biodiversité et à l'amélioration du cadre de vie. Son efficacité est renforcée lorsqu'elle cible des secteurs fortement exposés aux aléas climatiques. C'est pourquoi de plus en plus de collectivités élaborent des stratégies de renaturation pour identifier les espaces minéralisés à transformer en priorité. À titre d'exemple, le plan « Pleine terre » de Nantes vise à renaturer des espaces bitumés pour rafraîchir la ville, favoriser la biodiversité et améliorer la gestion des eaux pluviales. Les équipes de la direction Nature et Jardins ont ainsi identifié près de 35 ha de sites minéralisés à renaturer en priorité pour répondre à ces enjeux.

Si les actions de renaturation se sont principalement concentrées ces dernières années sur les cours d'école, malgré des surfaces parfois limitées, les villes recèlent encore de nombreux espaces minéralisés susceptibles d'être renaturés. Il peut s'agir de parkings, de cours d'immeubles, de berges de cours d'eau, d'espaces publics inutilement asphaltés ou sous-utilisés, de zones d'activités commerciales, ainsi que de trottoirs ou de ronds-points surdimensionnés. Paris a ainsi renaturé plusieurs espaces



DES OUTILS POUR IDENTIFIER LES SECTEURS DE RENATURATION PRIORITAIRES

Plusieurs méthodes permettent de repérer les zones urbaines les plus exposées au changement climatique et d'identifier les secteurs prioritaires pour mener des actions de renaturation. C'est le cas de l'outil « Où renaturer en Île-de-France ? » (REGREEN), développé par l'ARB Île-de-France. Il permet de cartographier les secteurs urbains les plus touchés par les îlots de chaleur urbains, le ruissellement et les inondations. En plus du volet adaptation, il identifie des secteurs pour améliorer la biodiversité ainsi que la santé et le cadre de vie. D'autres outils similaires se développent en France, comme la méthode du CEREMA appliquée à l'agglomération de Carcassonne.



minéralisés, comme l'esplanade Saint-Louis située à proximité du Bois de Vincennes, la place minérale est devenue une prairie de 17 000 m² favorisant la biodiversité et une meilleure gestion des eaux pluviales. Les parkings représentent également un fort potentiel de renaturation. Dès 2014, Avignon a engagé la transformation des 700 places de stationnement situées au pied des remparts, sur 4,6 km linéaires. Ce projet visait à réduire la place de la voiture avec l'arrivée du tramway, à améliorer le confort thermique et à valoriser les remparts. Après des premières plantations horticoles, la ville privilégie désormais le développement spontané de plantes sauvages, jugées plus résistantes aux épisodes de sécheresse. Les friches bâties ou minéralisées constituent également des espaces favorables à la renaturation. Intégrées aux stratégies de requalification urbaine, elles permettent de répondre au manque d'espaces verts et aux enjeux d'adaptation climatique. La Communauté d'agglomération Maubeuge-Val de Sambre a ainsi cartographié ses friches industrielles afin de renforcer la trame verte et bleue et de limiter les risques d'inondation. À Besançon, l'ancienne usine Rhodiacéta (5 ha) a été transformée en parc post-industriel mêlant usages récréatifs, culturels et espaces écologiques, tout en recréant des zones d'expansion des crues.

Enfin, la renaturation des cours d'eau et des zones d'expansion des crues constitue une approche développée depuis plusieurs décennies pour limiter les risques d'inondation (cf. page 120). Si ces opérations de réouverture et de restauration de rivières urbaines restent souvent ponctuelles, certaines atteignent des échelles importantes. La communauté d'agglomération de Blois (Agglopolys) porte ainsi un projet de renaturation du secteur de La Bouillie (52 ha), fondé sur sa désartificialisation progressive afin de recréer une zone d'expansion des crues.

Plusieurs guides pratiques ont été élaborés afin d'accompagner la mise en œuvre de ce type de projets, en proposant des repères opérationnels : diagnostics préalables, inventaires écologiques, restauration des sols ou encore reconstitution de végétations adaptées. Le guide « Renaturer les villes » de l'ARB Île-de-France rassemble ainsi de nombreux retours d'expérience et recommandations à destination des collectivités et des aménageurs. De son côté, l'ouvrage de Plante & Cité, « Désimperméabiliser les villes : guide opérationnel pour (re) découvrir les sols urbains », fournit des conseils pratiques et des illustrations concrètes pour la conduite de projets de renaturation de sols minéralisés.



Esplanade Saint-Louis à proximité du Château et du bois de Vincennes transformée en prairie. © Gilles Lecuir



La renaturation des abords des remparts d'Avignon mise désormais sur des plantes sauvages adaptées aux sécheresses. © Ville d'Avignon



Ancienne friche industrielle des Prés de Vaux devenue le parc de la Rhodiacéta à Besançon. © STUDIO PAR ICI



Le site de Bouillie est progressivement renaturé : les bâtiments sont démolis et les espaces artificialisés sont réaménagés afin de restaurer une zone d'expansion des crues. © AGGLOPOLYS

La protection des espaces de nature spontanée

Les espaces de nature spontanée (friches, délaisés végétalisés, milieux en libre évolution) font l'objet d'une perception ambivalente, souvent associée à des représentations négatives : espaces « vides », « sales » ou supposés sans valeur. Ils sont ainsi plus fréquemment menacés d'urbanisation que des espaces de nature aménagés. À titre d'exemple, en Île-de-France, 37 % des surfaces de friches non bâties ont disparu entre 1982 et 2021, jusqu'à 69 % en petite couronne, dans un contexte de forte pression foncière (Grandin, 2026).

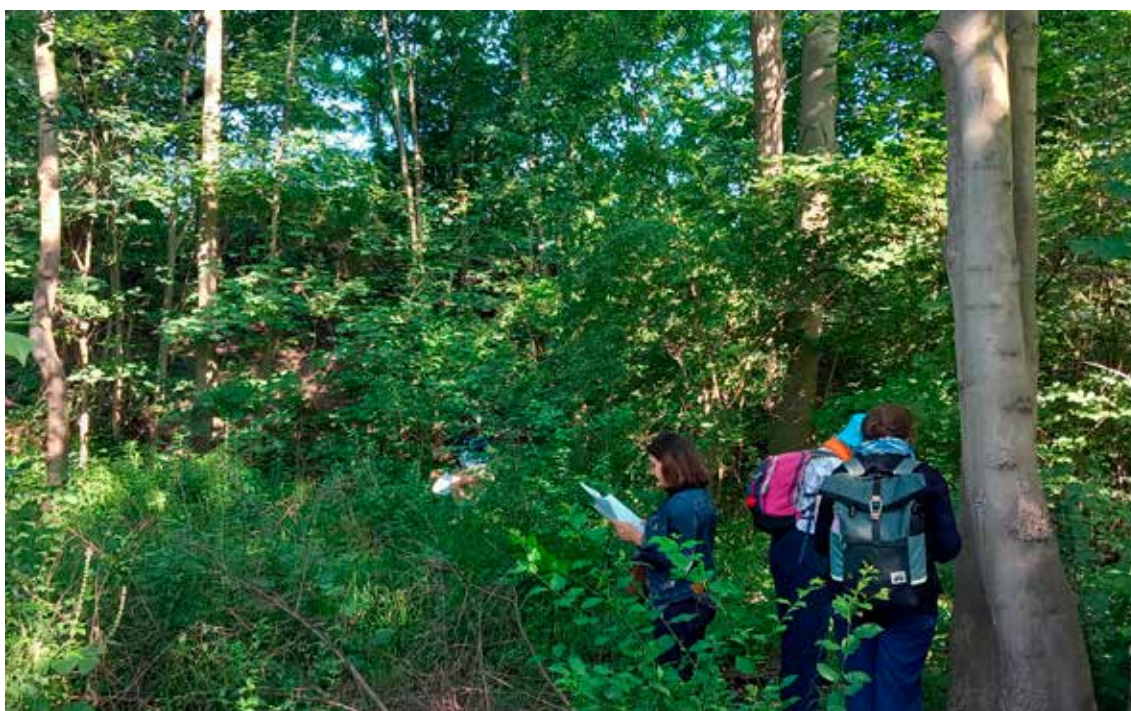
Pourtant, ces milieux jouent un rôle écologique important. Ils constituent des habitats pour de nombreuses espèces et fournissent plusieurs services écosystémiques, notamment la régulation des eaux, le stockage du carbone ou encore l'atténuation des îlots de chaleur urbains (Muratet *et al.*, 2019). Leur intérêt est également majeur dans une perspective d'adaptation au changement climatique. En effet, l'absence de gestion permet le développement de dynamiques écologiques spontanées, favorisant des systèmes plus résilients et adaptatifs face aux évolutions climatiques. Ces espaces ne nécessitent ni entretien régulier, ni arrosage, ce qui constitue un atout important dans un contexte de tension croissante sur la ressource en eau et de réduction des moyens (humains et financiers) des collectivités. Par ailleurs, leur évolution libre favorise

une sélection naturelle des espèces les plus adaptées aux conditions locales (sol et climat), renforçant leur résilience.

Ces enjeux sont aujourd'hui explorés dans des programmes de recherche. Par exemple, le projet SUNLOOP étudie les effets des politiques de densification sur les espaces de nature spontanée ainsi que leur rôle en tant que SfN. Par ailleurs, l'UICN à travers son groupe de travail Wilderness et Nature Férale souligne d'ores et déjà que la libre évolution constitue une SfN pour aider les territoires à s'adapter aux changements globaux (Cherel *et al.*, 2023). Dans ce cadre, la protection ou le développement des espaces de nature spontanée en ville apparaît comme une nouvelle stratégie pour renforcer les SfN en milieu urbain.

La restauration des rivières urbaines

En ville, la plupart des cours d'eau ont été profondément modifiés par l'action humaine : rectification, endiguement, fragmentation, canalisation, enfouissement, etc. Ces transformations avaient pour but de faciliter l'aménagement urbain, d'« assainir » des secteurs alors jugés insalubres (certaines rivières servant d'exutoires aux eaux usées ou aux effluents industriels) et de limiter les nuisances liées aux crues ordinaires. Les rivières ont également été privées de leurs annexes naturelles (prairies humides, boisements alluviaux, mares ou bras secondaires), qui jouaient un rôle essentiel de stockage temporaire



Le projet de recherche SUNLOOP cherche à mettre en évidence le rôle des espaces de nature urbaine spontanée (SUN) en tant que SfN. © Cécile Mattoug

et d'expansion des crues. Si ces solutions techniques ont répondu à des enjeux immédiats, elles ont souvent contribué, à plus long terme, à accroître le risque d'inondation en accélérant les écoulements et en réduisant les capacités naturelles de débordement. La restauration des cours d'eau et des milieux humides associés constitue une SfN à part entière, permettant de limiter les inondations, le ruissellement ou encore les ICU. En redonnant plus d'espace aux milieux aquatiques, ces démarches contribuent également à améliorer le cadre de vie, à renforcer la biodiversité urbaine et à améliorer la qualité écologique des cours d'eau. Ces actions ne se cantonnent pas aux espaces naturels ou périurbains : elles peuvent être mises en œuvre en ville, depuis les communes les plus rurales jusqu'aux tissus urbains les plus denses.

Parmi les travaux de restauration réalisables, la réouverture de cours d'eau enterrés constitue l'une des interventions les plus visibles et les plus transformatrices. Elle consiste à supprimer tout ou partie des tronçons busés ou couverts afin de recréer un lit à ciel ouvert, restaurer les continuités écologiques et redonner des capacités naturelles d'écoulement, voire de débordement. Aujourd'hui, de nombreuses collectivités s'engagent dans ces démarches. En Île-de-France, plusieurs projets sont en cours ou déjà réalisés, notamment sur la Vieille Mer (Seine-Saint-Denis), l'Orge (Essonnes), la Bièvre (Val-de-Marne, Hauts-de-Seine, Paris), l'Yerres (Seine-et-Marne, Essonne, Val-de-Marne) ou encore le ru du Bicheret (Seine-et-Marne).

La réouverture du Petit Rosne à Sarcelles (95) est souvent citée comme un projet démonstrateur en contexte urbain dense. En 1992, à la suite d'épisodes orageux intenses, le centre historique de la ville s'est retrouvé submergé sous 1,50 m d'eau pendant près de trois semaines. Après plusieurs années d'études, le Syndicat mixte pour l'aménagement hydraulique des vallées du Croult et du Petit Rosne (SIAH), en collaboration avec la ville de Sarcelles, a engagé un projet de réouverture du cours d'eau sur 165 m linéaires. La voirie et l'ouvrage busé qui contraignaient la rivière ont été démantelés. Un nouveau lit à ciel ouvert a été recréé, accompagné de berges en pente douce et de l'aménagement d'une mare. L'ensemble vise à améliorer la rétention des eaux pluviales, à ralentir les écoulements et à diversifier les habitats favorables à la biodiversité.

Une autre forme de restauration écologique visant à réduire les risques d'inondation consiste à redonner un tracé sinueux à des cours d'eau anciennement rectifiés. En allongeant le linéaire des rivières, les méandres ralentissent les vitesses d'écoulement, augmentent le temps de transfert des crues



Réouverture du Petit Rosne à Sarcelles : avant/après.
© SIAH Croult et Petit Rosne

et contribuent ainsi à atténuer les risques et les impacts des inondations en aval (cf. page 118).

La suppression des obstacles transversaux (tels que les seuils ou barrages) permet également de rétablir un fonctionnement hydraulique plus naturel et de limiter les risques liés aux dysfonctionnements ou à la rupture de ces ouvrages lors des épisodes de crue. Ces opérations concourent également au rétablissement des continuités écologiques.

Du point de vue de la gestion des inondations, la restauration de la continuité latérale constitue aussi un levier important. Elle peut se traduire par la transformation des berges artificialisées par des berges plus naturelles et à redonner aux cours d'eau des espaces de débordement fonctionnels lors des crues. Ces interventions peuvent être mises en œuvre y compris dans des contextes urbains denses, comme l'illustre la création d'une zone d'expansion des crues à Gonesse (cf. page 26 et 121).



Action de désimperméabilisation et végétalisation pour démultiplier les espaces relais pour l'avifaune à Ivry-sur-Seine. © Bardou-Lapaix

Le renforcement des continuités écologiques

Comme vu dans le chapitre 2, les effets des SfN sont renforcés lorsqu'elles s'inscrivent dans une logique de continuité et de cohérence spatiale. En retour, elles contribuent elles-mêmes à structurer et densifier le maillage écologique urbain, à travers la renaturation d'espaces minéralisés, la végétalisation du bâti ou encore la création de mares. Les SfN et les trames fonctionnent ainsi en interaction : leur développement mutuel améliore à la fois la connectivité des milieux et l'efficacité des solutions mises en œuvre.

Les trames vertes, bleues, brunes ou turquoise peuvent elles-mêmes être considérées comme des SfN, dans la mesure où elles visent à restaurer ou préserver des écosystèmes fonctionnels (corridors et réservoirs de biodiversité) tout en apportant des co-bénéfices d'adaptation. Ces continuités forment en effet des espaces multifonctionnels : elles peuvent atténuer les îlots de chaleur urbains, favoriser une gestion alternative des eaux pluviales, réduire les phénomènes de ruissellement, ou encore limiter le risque d'inondation.

À Ivry-sur-Seine (94), la mise en œuvre du plan d'actions de la TVB illustre ces synergies. Elle a notamment conduit à la désimperméabilisation et à la



Renaturation de l'espace Jean-Baptiste Renoult à Ivry-sur-Seine. © Bardou-Lapaix



Chemin des Pissotes à Chelles pouvant intégrer le Projet du parc naturel urbain du Grand Parc des Trois Plateaux de l'est parisien. © Ophélie Ricci

végétalisation de l'espace Jean-Baptiste Renoult, qui joue désormais un rôle de relais écologique à proximité d'un réservoir de biodiversité communal, tout en améliorant la gestion des eaux pluviales. Une autre action de déploiement de la TVB a été menée le long des emprises ferroviaires, continuité végétalisée vers Paris : environ 840 m² ont été désimperméabilisés puis plantés d'arbres et d'arbustes. Autrefois dépourvu de végétation arborée, le site constitue aujourd'hui un espace relais pour l'avifaune et contribue à l'amélioration du confort thermique urbain.

Face au changement climatique, la restauration des continuités écologiques devient essentielle afin de limiter la fragmentation des milieux urbains et de faciliter les déplacements des espèces. Pour être fonctionnelles, ces continuités doivent dépasser la simple logique d'aménagement paysager et offrir de véritables habitats, capables d'assurer l'alimentation, le refuge, la reproduction et les déplacements des espèces.

La VégéTale (ex-Tégéval), portée par Île-de-France Nature, est un exemple de projet de grande ampleur de maintien et de restauration des continuités écologiques. Cette continuité terrestre de 20 km reliera à terme le lac de Créteil au plateau Briard de Santeny, en connectant les grands parcs du Val-de-Marne à l'Arc boisé de la Ceinture verte francilienne. Si les milieux rencontrés sont variés et leur intérêt biologique très inégal, des travaux sont en cours pour améliorer la qualité écologique des secteurs les plus denses et artificialisés. Cette dynamique a inspiré les « Projets pilotes pour une métropole nature », portés par L'Institut Paris Region avec la Région Île-de-France, la Métropole du Grand Paris et Île-de-France Nature. Cinq projets, intégrés au SDRIF-E 2040, proposent de grandes continuités écologiques à l'échelle métropolitaine, articulant biodiversité, climat, paysage et mobilités. Parmi eux, le Grand Parc des Trois Plateaux vise à relier les plateaux de Romainville, d'Avron et de l'Aulnoye, de Paris jusqu'aux franges de la Seine-et-Marne.

La végétalisation des toitures

La végétalisation des toitures peut être considérée comme une SfN dans la mesure où elle contribue à augmenter les surfaces végétalisées en milieu urbain dense, à créer de nouveaux habitats pour certaines espèces et à fournir plusieurs services écosystémiques, notamment la gestion des eaux pluviales.

Si ces dispositifs se sont largement développés ces dernières années, la majorité des toitures végétalisées en Europe repose encore sur des systèmes extensifs à substrat minéral peu épais (3 à 5 cm), souvent dominés par des plantes grasses du genre *Sedum*. Ce choix s'explique par leur faible coût, leur légèreté et leur entretien limité. Toutefois, l'étude GROOVES (Barra et Johan, 2021), menée sur les toitures végétalisées en Île-de-France, souligne que les bénéfices écologiques et les services écosystémiques associés ne sont pas systématiquement garantis et varient fortement selon la conception des toitures.

Cette variabilité est particulièrement marquée en ce qui concerne la gestion des eaux pluviales. La capacité de rétention dépend en effet de l'épaisseur et de la nature du substrat : environ 8 cm permettent de gérer les pluies courantes (jusqu'à 8 mm en 24 h), seuil retenu par l'Agence de l'eau Seine-Normandie pour ses dispositifs de soutien financier. Des épaisseurs comprises entre 10 et 30 cm offrent une capacité intermédiaire, tandis que les substrats proches de 30 cm, composés de matériaux plus organiques proches de la terre agricole, permettent de gérer des événements pluvieux plus intenses, jusqu'à des pluies décennales.

SI LES TOITURES VÉGÉTALISÉES
CONTRIBUENT LOCALEMENT À RÉDUIRE
LES TEMPÉRATURES DE SURFACE
ET À AMÉLIORER LE CONFORT THERMIQUE
DES BÂTIMENTS, LEUR IMPACT SUR LE MICROCLIMAT
URBAIN RESTE LIMITÉ EN COMPARAISON
DES ESPACES VERTS AU SOL, TELS QUE LES PARCS
OU LES ALIGNEMENTS D'ARBRES.

Sur le plan écologique, les toitures végétalisées peuvent accueillir une diversité intéressante de plantes spontanées et d'invertébrés (coléoptères, hémiptères, orthoptères, ainsi que cloportes, mille-pattes et collemboles). Cette biodiversité varie fortement selon les caractéristiques de la toiture (épaisseur et composition du substrat, hauteur du bâtiment, exposition) ainsi que ses modalités de

gestion. Dans cette perspective, plusieurs principes d'aménagement sont recommandés afin de renforcer leur intérêt écologique. Il est notamment conseillé de diversifier les épaisseurs de substrat au sein d'une même toiture afin de créer une mosaïque de conditions favorables à différentes espèces faunistiques et floristiques. Lorsqu'elle n'est pas destinée à la culture, la toiture ne nécessite généralement pas de système d'arrosage, même si son aspect évolue naturellement au fil des saisons. En matière de végétalisation, il est recommandé de limiter le recours aux systèmes pré-cultivés standardisés (caissettes ou tapis), souvent homogènes et peu favorables à la diversité biologique. Il est préférable de privilégier des espèces locales, par exemple issues du label Végétal local®, et adaptées aux fortes contraintes thermiques urbaines. La collecte de graines dans des milieux naturels proches peut également constituer un complément intéressant pour diversifier les plantations. Enfin, les toitures dites *wildroof*, constituées à l'origine de substrats minéraux (type gravillons) puis colonisées spontanément par la végétation, présentent un intérêt particulier : elles accueillent des communautés originales, mêlant espèces de pelouses sèches sableuses et espèces à affinité plus méditerranéenne.

Plusieurs réalisations illustrent ces principes. La toiture de l'École des Sciences et de la Biodiversité de Boulogne-Billancourt (92) présente une épaisseur de substrat comprise entre 30 cm et 1 m, créant un gradient d'habitats allant de la prairie à des formations arbustives proches du boisement. La prairie y a été enrichie grâce à une technique de transfert de foin : une prairie « donneuse », sélectionnée pour sa richesse floristique, a été identifiée au Domaine national de Marly-le-Roi (78). Entre juin et juillet, les graines des espèces les plus précoces (saugue des prés, brome érigé, amourette) ont été récoltées avant la fauche complète du site, puis le foin et les semences ont été épandus sur la toiture afin de reconstituer un cortège végétal diversifié.

La toiture de l'Arche des Petites Bêtes, au Zoo de Thoiry (78), s'inscrit dans une démarche similaire de végétalisation, enrichie par la création de micro-habitats. Des mares et des tas de bois mort y ont notamment été intégrés, contribuant à renforcer la diversité écologique et les potentialités d'accueil pour la faune.



Transfert de foin sur la toiture de l'École des Sciences et de la Biodiversité afin d'enrichir la diversité des espèces prairiales et de favoriser l'implantation d'espèces locales. © Aurélien Huguet



L'Onagre bisannuelle (*Oenothera biennis*) pousse généralement sur des sols plutôt sablonneux et bien ensoleillés. Elle a spontanément colonisé une toiture de type « wildroof ». © Audrey Muratet



La toiture de l'Arche des Petites Bêtes est composée de nombreux micro-habitats dont une mare. © Karine Peiger, « Nature en toit »



L'opération Verdissons nos murs à Lille permet de créer des fosses aux pieds des façades pour planter des végétaux grimpants. © Gilles Lecuir



La ville d'Angoulême laisse la flore s'installer le long des murs et au pied des façades. © Gwendoline Grandin



Flore interstitielle spontanée sur un vieux mur à Rochefort-en-Yvelines. © Gwendoline Grandin

La végétalisation des murs

La végétalisation des murs présente plusieurs bénéfices écologiques, climatiques et énergétiques. Elle contribue d'abord à la création d'habitats, en offrant des refuges et des ressources alimentaires à de nombreux pollinisateurs, oiseaux et autres organismes. Elle participe également à l'atténuation des îlots de chaleur urbains en limitant l'échauffement des façades et à l'interception du rayonnement solaire. Sur le plan énergétique, ces dispositifs jouent un rôle d'isolation thermique passive et peuvent réduire les besoins de climatisation : des expérimentations menées en Espagne ont ainsi mis en évidence des économies d'énergie pouvant atteindre 34 % en période estivale avec la vigne vierge (Perez, 2017). Cependant, toutes les formes de végétalisation ne présentent pas les mêmes gains écologiques. Les solutions les plus simples, fondées sur des plantes grimpantes, sont généralement les plus favorables à la biodiversité et les moins coûteuses. À l'inverse, les systèmes modulaires (bardages végétalisés, structures artificielles, dispositifs d'irrigation intégrés) mobilisent davantage de ressources en phase de mise en œuvre comme d'entretien, en raison notamment des besoins en matériaux, en eau, en intrants et en renouvellement des végétaux.

De nombreuses collectivités ont par ailleurs élaboré des guides techniques dédiés à la végétalisation des façades (Delfanne *et al.*, 2017 ; Eurométropole de Strasbourg, 2022 ; Ville de Paris, 2021). Ces documents proposent des palettes végétales adaptées aux contextes locaux, des retours d'expérience et des recommandations pratiques, notamment sur le choix des supports ou les techniques de plantation. La mise en œuvre des plantes grimpantes repose sur quelques principes simples : garantir la présence de pleine terre au pied des façades (ou, à défaut, de bacs adaptés), sélectionner des espèces adaptées au climat local et peu exigeantes en eau, utiliser le support existant du bâtiment ou installer des dispositifs légers (câbles, treillis) pour guider la croissance. Dans certains cas, la continuité entre le sol et la toiture peut également être recherchée afin de renforcer les continuités écologiques à l'échelle du bâti.

Plusieurs villes illustrent ces démarches à travers des dispositifs opérationnels. À Lille, l'opération *Verdissons nos murs*, adossée au permis de végétaliser, permet aux habitants de solliciter la création d'une fosse au pied de leur façade afin d'y planter des végétaux grimpants et florifères, lorsque les conditions de voirie le permettent. La ville peut également fournir des graines ou des plants, et étend progressivement le dispositif aux devantures commerciales. Initiée en 1993 par l'association Chantier Nature puis reprise

par la municipalité en 2003, l'opération a permis la réalisation de plus de 2 000 fosses, avec une dynamique toujours croissante.

À Angoulême, l'approche est complémentaire et repose sur la valorisation de la végétation spontanée des murs anciens. Le patrimoine bâti en pierre et le contexte calcaire favorisent le développement d'une flore interstitielle. Un travail de diagnostic mené dans le cadre d'un plan-guide du centre-ville, avec l'appui d'un botaniste phytosociologue, a mis en évidence la richesse de ces communautés de plantes chasmophytes ou opportunistes (plantes des milieux rocaillieux secs qui peuvent coloniser des fissures de la roche ou des murs). La commune encourage le développement de cette flore interstitielle plantée ou spontanée des murs, et des pieds de façades.



Plantes grimpant le long de câbles fixés au mur (Choisy-le-Roi). © Gilles Lecuir



Façade réalisée en treillis métallique pour permettre sa colonisation par des plantes grimpantes (Bordeaux). © Gwendoline Grandin

OUTILS DE PLANIFICATION ET FINANCEMENTS

Le SDRIF-E et les SfN en milieu urbain

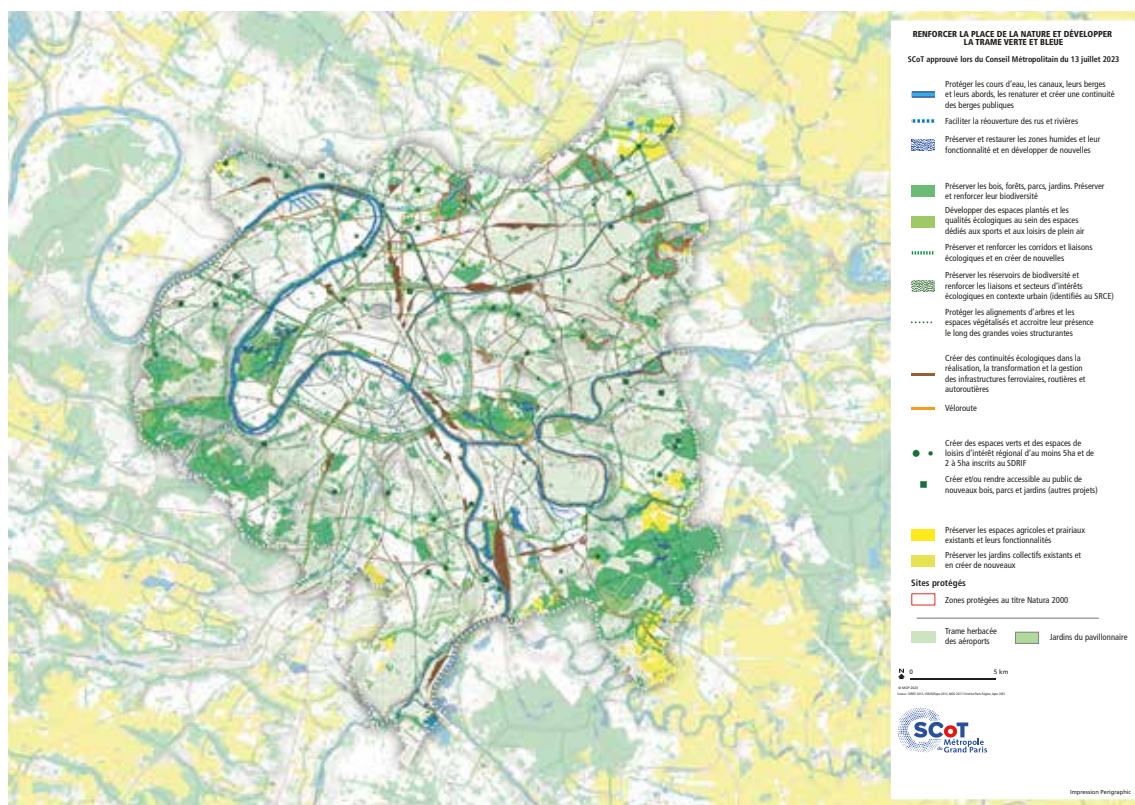
Le Schéma directeur de la région Île-de-France (SDRIF-E) constitue un levier réglementaire important pour le déploiement des SfN. Il fixe un cadre prescriptif qui s'impose aux documents d'urbanisme locaux (SCoT, PLU) dans un rapport de compatibilité. Il inscrit l'aménagement régional dans une trajectoire de zéro artificialisation nette à l'horizon 2050 et affirme une ambition forte de réintroduction de la nature en ville. À ce titre, il encourage le déploiement des SfN à travers des orientations réglementaires (OR) visant à renforcer la biodiversité, améliorer les cadres de vie, adapter les espaces urbains au changement climatique et limiter les risques environnementaux, tels que les inondations, le ruissellement ou les îlots de chaleur urbains.

Le SDRIF-E fait de la préservation des espaces de nature existants une priorité. Dans le cadre des opérations de renouvellement urbain, en particulier dans les secteurs les plus denses, les espaces verts tels que les parcs, jardins publics, les jardins familiaux ou partagés, et les espaces naturels doivent ainsi être maintenus. Le développement urbain doit également s'accompagner d'un renforcement du réseau d'espaces verts et de nature accessibles

aux habitants (OR27). Afin d'accroître le potentiel de rafraîchissement de la nature en ville, le SDRIF-E encourage notamment l'extension des surfaces végétalisées (en privilégiant les espaces de pleine terre) ainsi que la création de milieux humides tels que les mares, noues, plans d'eau ou la renaturation de berges (OR35). Dans une logique complémentaire, les documents d'urbanisme locaux sont invités à limiter l'imperméabilisation des sols, à favoriser leur désimperméabilisation et à renforcer la végétalisation des espaces urbains (OR39).

La renaturation est identifiée comme un levier d'action prioritaire pour redonner une place à la nature en milieu urbain et renforcer l'adaptation au changement climatique. Cette reconquête de la nature en ville passe par des actions de renaturation visant à renforcer la biodiversité, réduire les îlots de chaleur urbains, restaurer les zones d'expansion des crues ou encore renaturer les berges (OR29). Le SDRIF-E fixe également un objectif de préservation et de restauration des espaces de pleine terre dans les espaces urbanisés, avec une cible de 30 % dans les communes déficitaires (OR28).

En matière de gestion des eaux pluviales et de prévention des risques d'inondation, le SDRIF-E prévoit que l'urbanisation ne doit pas compromettre la réouverture des rivières urbaines busées. Il encourage également leur déconnexion des réseaux d'as-



SCoT de la Métropole du Grand Paris : carte « Renforcer la place de la nature et développer la trame verte et bleue ». @ MGP

sainissement et impose de réserver des emprises suffisantes pour permettre la renaturation des cours d'eau canalisés (OR22). Le schéma préconise par ailleurs de limiter la construction dans les secteurs exposés à des crues fréquentes, de protéger les zones d'expansion des crues et restaurer ces espaces, y compris dans les territoires urbains denses (OR30 et OR32). La gestion des eaux pluviales doit être assurée prioritairement à la source, en mobilisant des SfN favorisant l'infiltration, la rétention et l'évapotranspiration des eaux (OR33, OR37 et OR41).

Intégration dans les SCOT et PLUi

Le Schéma de Cohérence Territoriale (SCoT) intervient à une échelle particulièrement pertinente pour intégrer les SfN, puisque les fonctions écologiques dépassent les limites administratives. Le diagnostic territorial et l'état initial de l'environnement, qui figurent dans les annexes du schéma, permettent d'identifier les aléas du territoire ainsi que les effets attendus du changement climatique à court, moyen et long terme. Sur cette base, le SCoT peut repérer les secteurs les plus vulnérables et définir des objectifs et orientations adaptés. Le Projet d'aménagement stratégique (PAS) fixe les objectifs du territoire à horizon 20 ans, notamment en matière de préservation des espaces naturels, agricoles et forestiers (ENAF), de protection des continuités écologiques, de développement de la nature en ville ou encore de limitation de l'urbanisation dans les secteurs exposés aux risques naturels. Le Document d'orientation et d'objectifs (DOO) traduit ensuite ces ambitions en un cadre prescriptif, notamment à travers la définition d'enveloppes maximales d'urbanisation et de mesures visant à restaurer ou à renforcer les milieux favorables à la biodiversité. Depuis la loi Climat et résilience, le DOO peut également identifier des zones préférentielles pour la renaturation.

Le SCoT de la Métropole du Grand Paris illustre concrètement cette intégration des SfN dans la planification. Il érige la préservation de la pleine terre, la désimperméabilisation des sols et la végétalisation au rang d'objectifs majeurs pour lutter contre les îlots de chaleur urbains et favoriser l'infiltration des eaux pluviales. Le document vise notamment le maintien global de la pleine terre à l'échelle métropolitaine ainsi que son renforcement dans les secteurs les plus imperméabilisés, avec un objectif minimal de 30 % dans les espaces urbanisés (P86¹⁵). Il prévoit également la protection et le développement des alignements d'arbres et des espaces végétalisés afin de renforcer l'ombrage et la fraîcheur urbaine (P87). Le SCoT préconise par ailleurs la réouverture de plusieurs cours d'eau – Bièvre, Morée, Croult,

Vieille Mer, Sausset, Ru de Rungis, Morbras, Orge ou Ru de Marivel – dans une logique de renaturation et de gestion intégrée de l'eau (P95). Enfin, il place la gestion des eaux pluviales au cœur des politiques d'aménagement en privilégiant les SfN (P105 et 107), avec un objectif de compensation des surfaces nouvellement imperméabilisées à hauteur de 150 % à l'échelle du bassin versant (P106), faisant sienne une orientation du SDAGE Seine-Normandie en ce sens. Ces orientations sont accompagnées de documents cartographiques identifiant les espaces à protéger et les secteurs d'intervention prioritaires pour la biodiversité et l'adaptation climatique.

Par leurs composantes réglementaires et opérationnelles, les PLU(i) permettent de planifier la mise en œuvre des SfN à une échelle plus fine, en les adaptant aux caractéristiques et aux besoins propres à chaque territoire.

Plusieurs types de zonages peuvent être mobilisés selon les objectifs recherchés. Les zones naturelles (N) permettent de protéger les espaces boisés, les forêts, les parcs ou encore les zones humides, en maintenant leurs fonctions écologiques. Certains PLU(i) mobilisent également des zones urbaines végétalisées (souvent dénommées zones UV) afin de préserver ou renforcer les espaces verts ouverts au public dans les tissus urbains denses. Ces outils contribuent ainsi à protéger de nombreux espaces de nature en ville et les services écosystémiques qu'ils peuvent fournir. Les PLU(i) disposent également de dispositifs de protection plus ciblés. Le classement en espaces boisés classés permet de protéger forêts, haies, arbres isolés ou alignements d'arbres (C. urb., L.113-1). Le règlement peut aussi identifier des éléments de paysage ou des secteurs à préserver pour leur intérêt écologique, tels que des zones humides, des friches favorables à la biodiversité.



Coulée verte classé en zone N au PLU de Saint-Arnoult en Yvelines (78). © Gwendoline Grandin

15. P : pour prescription, suivi de son numéro.



Le réaménagement du centre-ville de La Ferté-Alais (91) a permis d'améliorer la gestion des eaux de pluie en redonnant plus de place aux espaces de pleine terre et végétalisés. © Klaire Houeix



Maintien de surface de pleine terre dans l'écoquartier des Docks de Ris à Ris-Orangis (91). © Jonathan Flandin

sité ou des corridors écologiques (C. urb., L.151-23). Dans une logique plus opérationnelle, les emplacements réservés (C. urb., L.151-41) permettent de mobiliser du foncier pour de futurs projets de nature en ville : création de parcs, jardins, bois urbains ou d'espaces nécessaires aux continuités écologiques. Les PLU(i) jouent également un rôle important dans la gestion de l'eau et peuvent favoriser les SfN destinées à limiter le ruissellement et à restaurer le cycle naturel de l'eau. Le règlement peut ainsi imposer des dispositifs de gestion des eaux pluviales à la parcelle, tels que des noues végétalisées, des jardins de pluie, des dispositifs d'infiltration ou des zones de stockage temporaire (C. urb., R.151-43, 7°). Il peut aussi limiter l'imperméabilisation des sols afin de favoriser l'infiltration des eaux pluviales (C. urb., R.151-49). Dans cette même logique, les PLU(i) peuvent imposer une part minimale de surfaces non imperméabilisées ou éco-aménageables afin de renforcer la nature en ville (C. urb., L.151-22). Ces exigences prennent la forme de coefficients de pleine terre ou de coefficients de biotope. Le premier garantit une proportion minimale de sols naturels ou végétalisés, tandis que le second valorise plus largement différentes formes de végétalisation, comme les toitures végétalisées, les façades végétales ou les sols perméables. Ces outils permettent d'adapter les niveaux d'exigence selon les contextes urbains et les enjeux écologiques locaux. Depuis la loi Climat et résilience, certaines communes¹⁶ doivent fixer une part minimale de surfaces non imperméabilisées ou végétalisées dans des secteurs délimités par le document d'urbanisme. Cette disposition renforce progressivement l'intégration des SfN dans les documents d'urbanisme, notamment en Île-de-France où 528 communes sont concernées (DRIEAT, 2025). Enfin, les Orientations d'aménagement et de programmation (OAP) constituent un levier particulièrement pertinent pour territorialiser les SfN et préciser leurs modalités de mise en œuvre. Plus souples que le règlement tout en conservant une portée prescriptive, elles permettent d'adapter les objectifs aux spécificités locales et d'encadrer les projets à différentes échelles. Les OAP peuvent être thématiques – dédiées par exemple au cycle de l'eau, à la renaturation ou aux trames vertes et/ou bleues – ou sectorielles afin d'accompagner des opérations ciblées. Depuis la loi Climat et résilience, elles peuvent servir de support à des zones préférentielles de renaturation. Les OAP peuvent intégrer des schémas, illustrations ou exemples facilitant leur appropriation par les acteurs locaux. Elles apparaissent ainsi comme un outil particulièrement adapté pour articuler prescriptions réglementaires, qualité urbaine et adaptation climatique.

16. Les communes situées en zone tendue (zones d'urbanisation continue de plus de 50 000 habitants où il existe un déséquilibre marqué entre l'offre et la demande de logements) et celles de plus de 15 000 habitants en forte croissance démographique.

Quels leviers financiers ?

La Région Île-de-France propose de nombreux appels à projets soutenant le déploiement de solutions fondées sur la nature (SfN), à travers des dispositifs tels que « Îlots de fraîcheur », « Reconquête de la biodiversité » ou encore « 1 000 mares ».

Le 12^e programme « Eau, climat & biodiversité » de l'Agence de l'eau Seine-Normandie accompagne les projets de gestion durable des eaux pluviales reposant sur les SfN. Il finance les études et travaux visant à réduire le ruissellement à la source, favoriser l'infiltration des eaux de pluie, préserver ou augmenter les surfaces végétalisées en pleine terre et désimperméabiliser les sols (noues, toitures végétalisées, parkings perméables, trottoirs enherbés, chaussées drainantes, etc.). L'agence soutient également les opérations de restauration des milieux humides et de réouverture de cours d'eau.

Le Fonds vert, porté par l'État, accompagne financièrement les collectivités, associations et entreprises pour l'adaptation au changement climatique, notamment via le fonds de renaturation destiné à renforcer la présence des espaces de nature dans les milieux urbanisés.

D'autres établissements publics ou associatifs, en raison de leurs compétences et de leur capacité d'acquisition foncière, participent également au financement des SfN. C'est notamment le cas du

Conservatoire d'espaces naturels d'Île-de-France, des départements à travers leurs politiques d'Espaces naturels sensibles (ENS), ou encore d'Île-de-France Nature. Cette dernière propose notamment des aides financières via son Plan Vert et son appel à manifestation d'intérêt « Retour de la nature en ville ».

L'ADEME peut également contribuer au financement des SfN, en soutenant les études ou les investissements liés à la renaturation des sols ou à la végétalisation des bâtiments. De son côté, l'ANRU peut financer des actions de renaturation dans le cadre de projets d'aménagement. Les établissements publics fonciers d'État constituent également des acteurs clés, capables de mettre en œuvre des SfN dans leurs stratégies de maîtrise foncière, notamment pour la gestion des risques ou la préservation de la biodiversité.

Enfin, la plateforme Aides-Territoires centralise une grande partie des appels à projets et dispositifs de financement disponibles. Avec le soutien du programme LIFE ARTISAN, un espace dédié aux projets de SfN permet aux maîtres d'ouvrage d'identifier plus facilement les subventions mobilisables. En Île-de-France, l'ARB îdF et Aides-Territoires ont également développé un portail recensant les aides financières liées à la biodiversité, accessibles à l'échelle régionale.



Réouverture du Petit Rosne à Ezanville (95) en partie financé par l'Agence de l'eau Seine-Normandie, la Région Île-de-France et le Département du Val-d'Oise. © Gabrielle Huart

RETOURS D'EXPÉRIENCE

De l'eau à la canopée : la Seine-Saint-Denis face aux défis climatiques (93)

Le Département de la Seine-Saint-Denis développe depuis plusieurs années une stratégie de gestion des eaux pluviales et de prévention des inondations qui accorde une place croissante aux SfN. Historiquement, le territoire s'est principalement appuyé sur des infrastructures hydrauliques classiques, telles que les bassins de retenue. Le Département indique ainsi avoir créé 33 bassins depuis les années 1970 afin de stocker temporairement les eaux pluviales lors des épisodes orageux. Progressivement, cette stratégie a toutefois évolué vers une gestion plus intégrée de l'eau, visant à ralentir le ruissellement à la source tout en restaurant les fonctions écologiques des milieux urbains.

Cette approche repose notamment sur plusieurs types d'actions : la désimperméabilisation des sols et la restauration d'espaces de pleine terre ; la création de noues, de jardins de pluie, de fossés végétalisés et de bassins paysagers ; la gestion des eaux pluviales à ciel ouvert ; la réouverture de cours d'eau urbains ; ainsi que le développement d'espaces végétalisés multifonctionnels capables à la fois de stocker l'eau, de limiter les îlots de chaleur et de favoriser la biodiversité. En 2026, la publication du manifeste « La Seine-Saint-Denis, territoire d'eau » marque une étape structurante dans la définition d'une politique de l'eau transversale, irriguant les champs de la transition écologique, de la justice sociale, de l'aménagement et du cadre de vie. Ce manifeste vise à faire évoluer le regard porté sur l'eau, en mobilisant à la fois les acteurs du territoire et les habitants autour de sa place, de ses usages et de ses enjeux. Il s'accompagne d'un plan d'actions constituant un cadre technique et opérationnel, destiné à traduire concrètement les ambitions du manifeste.

Dans le même temps, le Département a engagé des travaux visant à renforcer la qualité écologique de ses anciens bassins d'orage. Les bassins de Pont-Yblon, qui s'étendent sur près de 6 ha, en constituent une illustration. Longtemps fermés au public, ils seront prochainement ouverts dans un territoire déficitaire en espaces verts, après des aménagements visant à répondre aux attentes des futurs usagers : activités sportives, détente, îlot de fraîcheur, contact avec la nature... Le diagnostic écologique a permis d'orienter les aménagements pour favoriser la biodiversité : désimperméabilisation de certains secteurs, renaturation des berges, extension de la roselière, création d'une zone de quiétude dédiée à la faune, ainsi que l'installation de radeaux végétalisés.

Parallèlement, la Seine-Saint-Denis est particulièrement exposée aux îlots de chaleur urbains. La forte densité urbaine, l'importante artificialisation des sols, le déficit historique en espaces de nature ainsi que les vulnérabilités socio-économiques accentuent l'exposition des habitants aux vagues de chaleur. Face à ces enjeux, le Département développe depuis plusieurs années une stratégie visant à réduire les ICU en renforçant la présence de la nature en ville. Le plan Canopée vise à protéger le patrimoine arboré et à planter 30 000 arbres de façon diffuse sur le territoire, le long des routes départementales, dans les cours de collèges et jardins des crèches, ou encore dans des délaissés urbains transformés en « forêts » urbaines.

Afin de mieux territorialiser ses actions, le Département mobilise des outils d'observation et de diagnostic. Un outil SIG développé en interne, appelé Portail Canopée, a permis de définir des secteurs prioritaires de plantation selon des critères urbains, paysagers et environnementaux. Le Département s'appuie également sur des outils commandés à des partenaires, comme le projet POC&GO – « Végétalisons la Seine-Saint-Denis » – qui a mobilisé des données de télédétection et des indicateurs spatialisés permettant de cartographier la couverture végétale, les vulnérabilités climatiques et les carences en espaces verts. Cette démarche est complétée par la déclinaison territoriale de la méthode Sésame développée par le Cerema. Cette méthode vise à accompagner les collectivités dans le choix des essences végétales les plus adaptées aux conditions urbaines actuelles et futures, en tenant compte à la fois des effets du changement climatique, des contraintes du milieu urbain et des services écosystémiques attendus.

Pour en savoir plus

- Manifeste « La Seine-Saint-Denis territoire d'eau » :
<https://inseinesaintdenis.fr/wp-content/uploads/2024/12/audace-dea-205x270-manifeste-def.pdf>
- Gaële Rouillé-Kielo, Julien Paupardin, Ronan Quillien, Gaëlle Olsen, Jean-Baptiste Narcy, et al.. Une stratégie départementale en Seine-Saint-Denis pour valoriser la place de l'eau dans la ville. Du diagnostic à l'action politique. Novatech 2023, Jul 2023, Lyon, France.
- « Passer du gris au vert » :
<https://seinesaintdenis.fr/actualite/ecologie/Passer-du-gris-au-vert/>



Les deux bassins de Pont-Yblon ont fait l'objet d'aménagements visant à renforcer l'accueil de la faune et de la flore. Le site sera prochainement ouvert au public, offrant un nouvel espace de nature et de fraîcheur dans un secteur urbain dense. © Gabrielle Huart

Le projet Sylvia : transformation d'un ancien parking en agroforêt urbaine (75)

Le projet d'agroforêt urbaine et comestible du campus Jourdan (Paris 14^e) constitue un retour d'expérience de renaturation d'une friche artificialisée. Implanté sur un ancien parking de 2 400 m² ayant accueilli divers usages urbains successifs (dépôt de remonte, centre d'hébergement, hôpital), le site fait l'objet depuis 2021 d'une transformation profonde portée par Cultures en Ville, en partenariat avec AgroParisTech. L'opération, soutenue notamment par l'Agence de l'eau Seine-Normandie dans le cadre de la déconnexion des eaux pluviales et par Île-de-France Nature, poursuit plusieurs objectifs convergents : désimperméabilisation et restauration des sols, amélioration de la gestion des eaux pluviales, atténuation des îlots de chaleur urbains et renforcement des continuités écologiques à proximité du parc Montsouris et du réservoir de Montsouris.

Le projet s'appuie sur une approche de renaturation low-tech des sols urbains visant à démontrer la capacité de résilience de milieux initialement imperméabilisés. Après un diagnostic de pollution, la dalle a été fracturée. Une partie des matériaux a été réutilisée *in situ* pour des aménagements secon-

dares (gabions, murets, hibernaculum), tandis que les fractions fines des débris ont été valorisées dans des opérations de végétalisation de toitures de la Ville de Paris. La démarche repose ensuite sur l'activation des processus écologiques de régénération des sols, à travers des apports organiques (bois broyés et compost de déchets verts), semis d'engrais verts, puis une phase de repos d'un an afin d'engager la restauration progressive des fonctions biologiques du sol. Les plantations réalisées en 2023 (noisetiers, framboisiers, groseillers, cassissiers et mûriers) s'inscrivent dans une logique de microforêt comestible adaptée aux conditions d'ombrage du site, liées à la présence des arbres conservés et au bâti environnant.

Au-delà de sa fonction opérationnelle, le site constitue également un laboratoire vivant de recherche, intégré au projet REDESSINE d'AgroParisTech. Celui-ci vise à évaluer finement la requalification progressive d'un sol de friche urbaine en fonction des pratiques de renaturation. La construction d'un panel d'indicateurs variés (fertilité, contamination et compatibilité sanitaire, biodiversité du sol et diversité végétale, croissance de la microforêt, fonctionnement hydrique) permettra d'évaluer la qualité de ces sols (ici comprise comme leur aptitude à rendre des services écosystémiques).



▲ Un avant et pendant les travaux de retrait de la dalle bitumée et des apports organiques. © @CulturesEnVille

◀ 3 ans après les travaux de plantation, le développement marqué des strates herbacées et arbustives témoigne des dynamiques de renaturation en cours sur le site. © @CulturesEnVille

Pour en savoir plus

- La page dédiée sur le site de Cultures en ville : <https://www.culturesenville.fr/blog/sylvia-agroforet-urbaine-et-comestible/>

Gestion intégrée des eaux pluviales et lutte contre les ICU aux Mureaux (78)

Dans le cadre du Projet de Rénovation Urbaine (PRU) de l'écoquartier Molière, engagé sur près de 70 ha, la ville des Mureaux a développé dès le début des années 2000 une stratégie de gestion intégrée des eaux pluviales fondée sur le principe du « zéro réseau d'eau pluviale ». Initiée dans le contexte de la révision du Plan de Prévention des Risques d'Inondation (PPRI), cette démarche constitue aujourd'hui un exemple précurseur d'intégration des SfN dans un projet de rénovation urbaine. L'objectif était de limiter les risques d'inondation et de réduire les effets d'îlots de chaleur urbains grâce à la désimperméabilisation et à la végétalisation des espaces urbains. Plutôt que de recourir à des infrastructures enterrées classiques, la commune a privilégié l'infiltration à la source et le ralentissement des écoulements à travers des dispositifs végétalisés. Cette orientation a été renforcée par une étude « loi sur l'eau » menée à l'échelle du PRU, la première de cette ampleur dans les Yvelines. L'arrêté obtenu en 2009 a permis de sécuriser juridiquement les choix techniques de la ville et d'imposer ces principes d'aménagement aux bailleurs et aménageurs du territoire, malgré des contraintes importantes liées aux fortes pentes et à la présence de sols argileux.



Comblé dans les années 1960, le ru d'Orgeval a été remis à ciel ouvert sur 400 ml. © Gabrielle Huart



Renaturation d'une réserve foncière : plantations d'essences locales et création d'une prairie sur une ancienne emprise artificialisée dans le cadre du programme LIFE ARTISAN. © Gabrielle Huart



Désimperméabilisation et végétalisation de la cour d'école Paul Raoult dans le cadre de LIFE ARTISAN.
© Gabrielle Huart

La mise en œuvre du projet a conduit à une transformation profonde du quartier avec la suppression d'environ 11 km de réseaux d'eaux pluviales, le développement de toitures végétalisées, l'augmentation des surfaces de pleine terre ainsi que la création de noues paysagères. Parmi les opérations emblématiques figure la remise à ciel ouvert du ru d'Orgeval sur près de 400 m dans le Parc Molière.

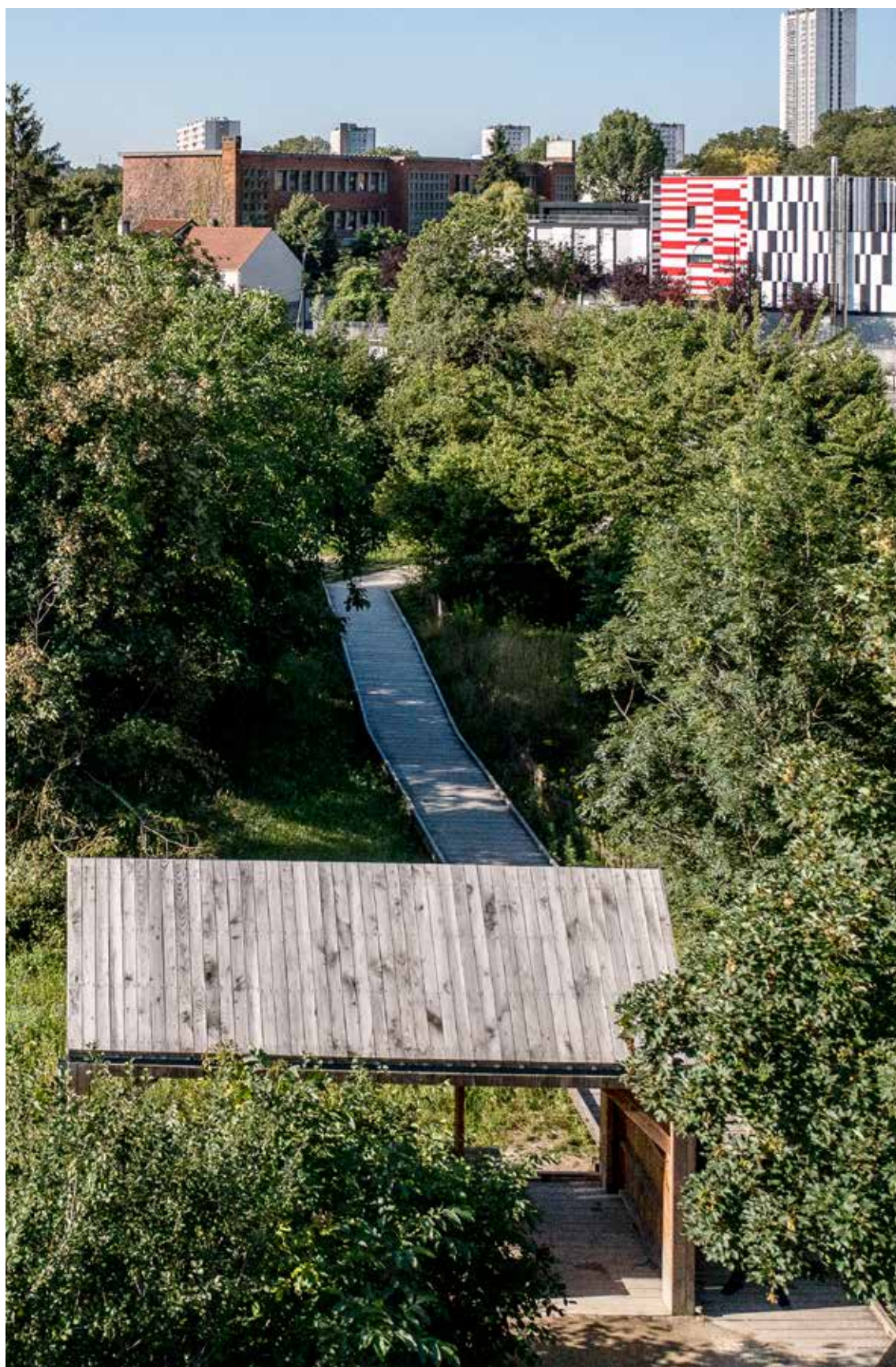
Fort de cette première expérience, la ville a poursuivi ses actions d'adaptation au changement climatique dans le cadre du programme LIFE ARTISAN en tant que site démonstrateur (2020-2027). Les Mureaux ont ainsi mené une première action sur la renaturation d'une réserve foncière de 1,2 ha issue du PRU. Les travaux réalisés en 2023 ont permis le décompactage des sols, l'apport de compost local et la plantation de près de 180 arbres et 1 100 arbustes, d'espèces majoritairement locales et favorables à la faune identifiée dans le cadre de l'Atlas de la Biodiversité Communale (ABC). Une prairie a également été créée sur l'emprise d'un ancien parking. Le site sert aujourd'hui de support d'animations et de visites pédagogiques.

Le second site démonstrateur concerne la réhabilitation et la désimperméabilisation de la cour de l'école Paul Raoult afin d'améliorer le confort thermique et renforcer la gestion des eaux pluviales. Située au cœur du parc de Bécheville, vaste parc boisé de 15 ha, cette cour de 6 200 m² constituait jusqu'alors une rupture très minérale dans le paysage. Le projet a fait l'objet d'une large concertation en 2022 avec les élèves, enseignants et services municipaux. Les travaux ont porté sur le décroûtage des surfaces imperméables, la création de cheminements et la modification de la topographie afin de favoriser l'infiltration des eaux pluviales. Les noues

paysagères ont été dimensionnées pour infiltrer les pluies courantes tout en assurant un stockage temporaire lors d'épisodes exceptionnels. À l'issue des travaux, la cour comprend désormais des espaces engazonnés, des prairies, des massifs plantés, des zones en copeaux de bois dédiées aux jeux ainsi que des surfaces résiduelles en enrobé. Le projet permet aujourd'hui la gestion sur site de 100 % des eaux pluviales de la cour et la déconnexion de 40 % des eaux de toiture du réseau. Une station météorologique installée en 2022 permet également de suivre différents paramètres climatiques. Les données collectées sont exploitées par le Cerema afin d'évaluer les effets des aménagements sur le microclimat et l'adaptation au changement climatique.

Pour en savoir plus

- Le site du projet Life Artisan : <https://ofb.gouv.fr/life-artisan>
- V. Moncond'Huy, C. Limousin, M. Benard, M. Carrière. Les Mureaux : une gestion intégrée des eaux pluviales au service d'une rénovation urbaine d'envergure et de qualité. Novatech 2016 - 9^e Conférence internationale sur les techniques et stratégies pour la gestion durable de l'Eau dans la Ville / 9th International Conference on planning and technologies for sustainable management of Water in the City, Jun 2016, Lyon, France
- Journée Nature & Climat du 16 octobre 2025 à L'Institut Paris Region, présentation de la Ville des Mureaux : <https://www.arb-idf.fr/article/projet-europeen-life-artisan/>

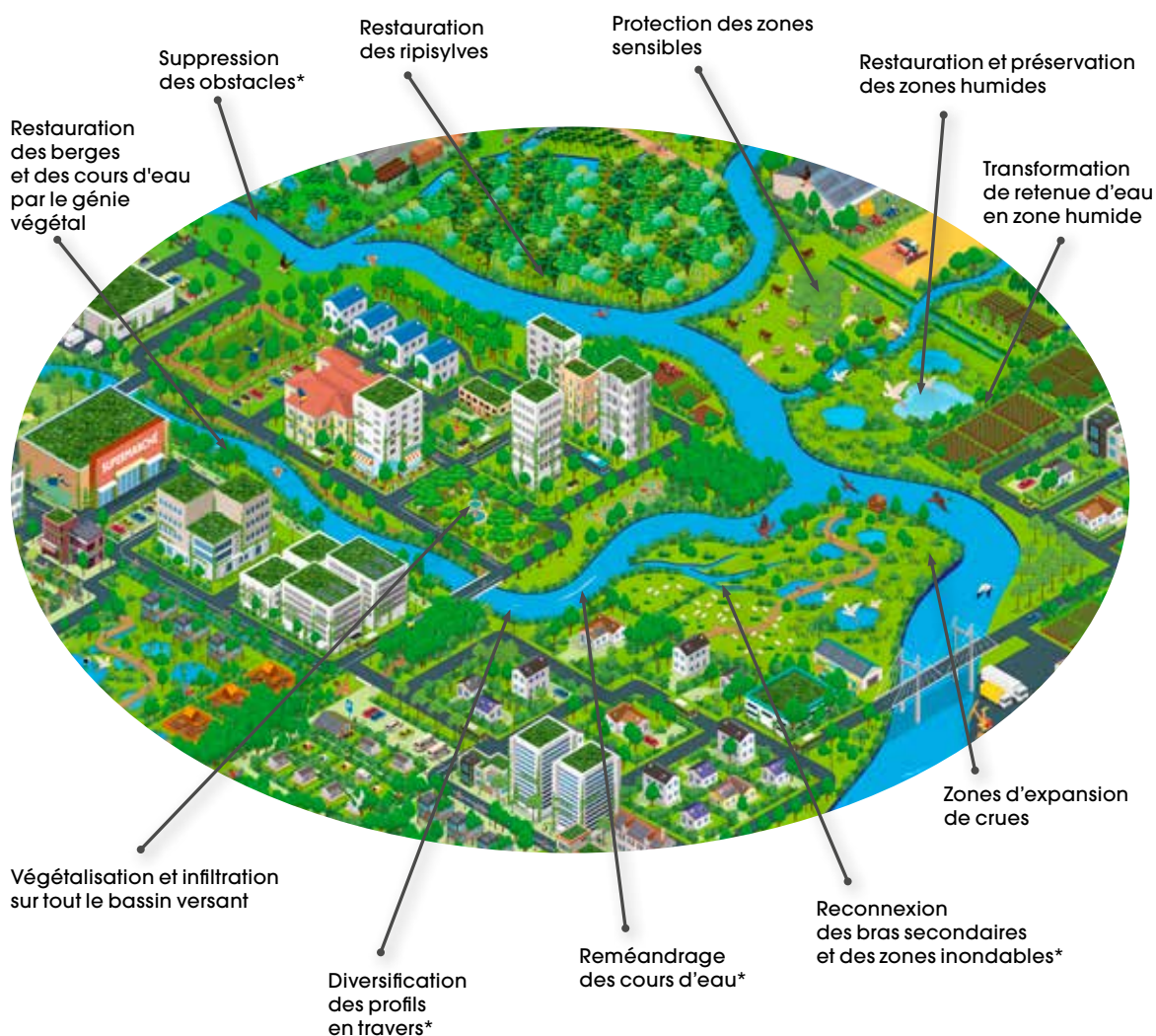


La réserve écologique d'Épinay-sur-Seine. © Éric Garault/L'Institut Paris Region



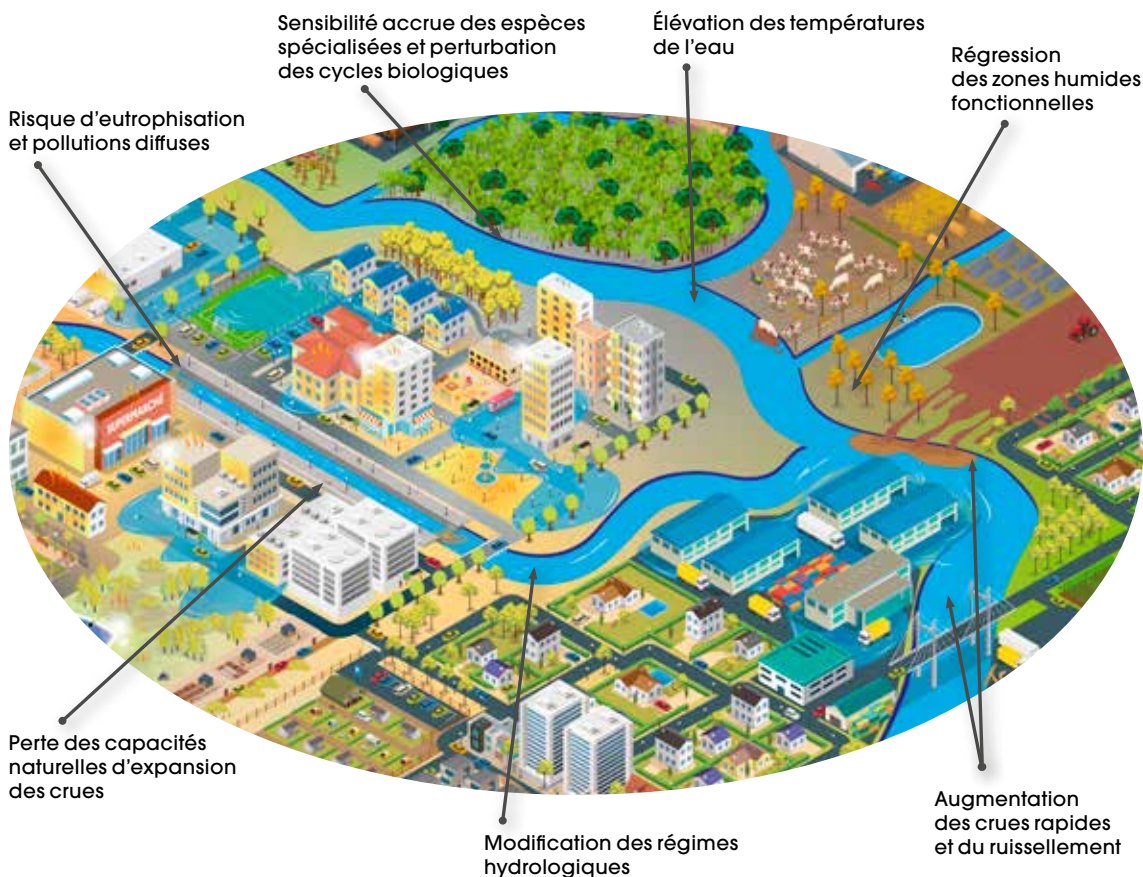
Boucles de la Seine aval. © Gabrielle Huart

6 • LES MILIEUX AQUATIQUES ET HUMIDES

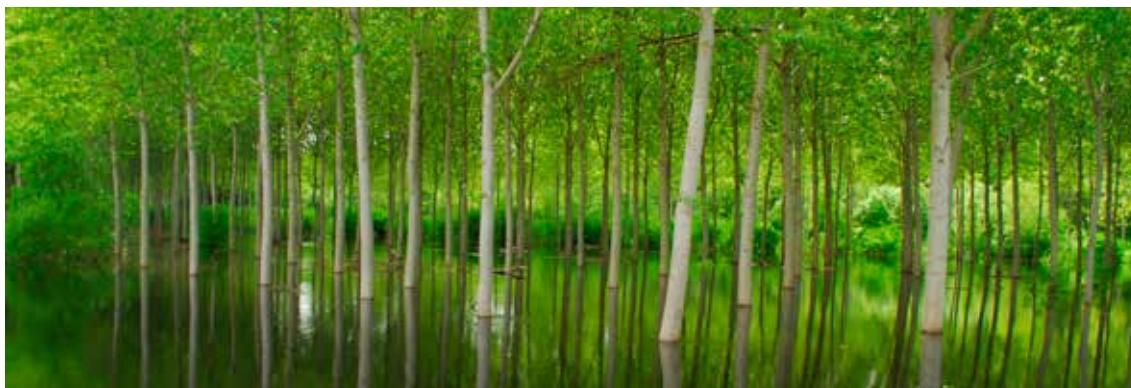


* Restauration du fonctionnement hydromorphologique du cours d'eau
© Illustration - edeo-design.com

LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES MILIEUX AQUATIQUES ET HUMIDES



En France, la plupart des cours d'eau ont fait l'objet de nombreuses interventions humaines (rectification, endiguement, canalisation, enterrement, construction d'ouvrages) qui ont altéré leurs fonctionnalités, entraînant une augmentation des risques d'inondation lors d'événements pluvieux extrêmes. En parallèle, la plupart des zones humides et marais assurant des fonctions de stockage à proximité ou dans les villes ont été drainés ou imperméabilisés. Les rivières sont souvent privées de leurs annexes (prairies et boisements inondables, zones d'expansion de crues) qui assuraient une fonction de débordement de cours d'eau en cas de fortes pluies. En Île-de-France, ces milieux ne couvrent plus qu'environ 4 % du territoire, plus de la moitié des zones humides ont disparu au ^{xx} siècle, les mares ont régressé de 90 % et les cours d'eau sont fragmentés par plus de 2 300 obstacles, soit un ouvrage tous les 2,4 km (ARB idF, 2026). Cela a conduit à la destruction d'habitats naturels, la rupture des continuités écologiques, et à augmenter les risques d'inondations et d'érosion des berges ainsi qu'à dégrader la qualité de l'eau. Dans ce contexte, le changement climatique accentue la vulnérabilité des cours d'eau et des zones humides aux perturbations d'origines naturelle comme anthropique. © Illustration - edeo-design.com



Peupleraie inondée. © Maxime Zucca

Élévation des températures de l'eau

La hausse des températures de l'air se traduit par une augmentation progressive de la température des eaux, en particulier dans les rivières peu profondes et les plans d'eau stagnants. Pour la Seine et pour la Marne, le nombre de jours où la température de l'eau dépasse 25 °C à l'horizon 2100 pourrait être multiplié par 10 (Comité de bassin Seine-Normandie, 2023). Ce réchauffement réduit la solubilité de l'oxygène dans l'eau et accroît le stress physiologique des organismes aquatiques, en particulier pour les espèces adaptées aux eaux fraîches (truite fario, anguille européenne...). Cela affecterait particulièrement les peuplements piscicoles et entraînerait un déplacement progressif des aires de répartition vers l'amont des bassins-versants. Les espèces inféodées aux têtes de bassin voient ainsi leur habitat se restreindre à des zones refuges, avec un risque accru d'extinction locale dans les bassins de faible altitude. À l'inverse, les espèces des zones intermédiaires et aval (carpes, gardons, perches...) sont favorisées (Johan *et al.*, 2026).

Modification des régimes hydrologiques

La baisse des précipitations, combinée à l'augmentation de l'évapotranspiration, entraîne une intensification des sécheresses estivales (hydrologiques, agronomiques et hydrogéologiques) dont la durée pourrait augmenter jusqu'à 30 % en Île-de-France par rapport à aujourd'hui (Boé *et al.*, 2018), accompagnée d'une diminution de débits de 10 à 30 % et par conséquent, une réduction probable de la recharge des nappes alluviales. Ces sécheresses hydrologiques deviennent plus fréquentes, accentuant les risques d'assecs temporaires, en particulier sur les petits cours d'eau et les zones humides périphériques, et allongeant la période d'étiage. Ces ruptures hydrologiques limitent les déplacements de la faune aquatique, perturbent les cycles de reproduction et peuvent augmenter la mortalité des espèces les plus sensibles, notamment les poissons, amphibiens et macro-invertébrés. Cela peut également entraîner une tension sur la ressource en eau entre différents usages dépendants, tels que l'agriculture, les activités industrielles et la production d'eau potable.

Risque d'eutrophisation et pollutions diffuses

En période de faibles débits, la combinaison de températures élevées et de concentrations accrues en polluants et en nutriments favorise les proliférations d'algues et de cyanobactéries. Ces phénomènes entraînent une diminution de l'oxygène dissous, des mortalités piscicoles et une dégradation de la qualité de l'eau, affectant à la fois la biodiversité et certains

usages, tels que l'alimentation en eau potable et les loisirs.

Perte des capacités naturelles d'expansion des crues

La majorité des cours d'eau franciliens a été rectifiée, endiguée ou déconnectée de ses plaines alluviales. En petite couronne parisienne, les lits majeurs sont aujourd'hui quasiment entièrement urbanisés, contre environ 30 % en grande couronne, réduisant fortement les capacités naturelles de stockage temporaire de l'eau lors des crues et amplifiant les risques d'inondation.

Sensibilité accrue des espèces spécialisées et perturbation des cycles biologiques

Les États de santé de la biodiversité en Île-de-France (Johan *et al.*, 2026) montrent que les espèces inféodées aux milieux aquatiques et humides figurent parmi les plus vulnérables au changement climatique. Les poissons, les amphibiens, odonates et plantes hygrophiles sont particulièrement sensibles à la combinaison des assecs estivaux, du réchauffement de l'eau et de la dégradation des habitats.

Augmentation des crues rapides et du ruissellement

L'intensification des précipitations extrêmes génère des crues plus soudaines ou plus importantes, notamment dans les bassins versants urbanisés. La probabilité qu'un événement de crue de la Seine comme celui de 2016 survienne est aujourd'hui environ deux fois plus probable qu'au début du xx^e siècle. Un million de Franciliens vivent aujourd'hui en zones inondables, dont les trois quarts sont situés à Paris et en petite couronne (Faytre, 2026). Ces pluies extrêmes peuvent également entraîner des ruissellements et des coulées de boue qui accroissent l'érosion des berges, la concentration des sédiments dans l'eau et la dégradation des habitats aquatiques.

Régression des zones humides fonctionnelles

Les zones humides, essentielles pour la régulation hydrologique et la biodiversité, voient leur fonctionnalité diminuer sous l'effet combiné du changement climatique et de l'artificialisation. La réduction de la durée d'inondation, l'assèchement des sols tourbeux et la fragmentation des habitats limitent leur capacité à jouer leur rôle de tampon face aux sécheresses et aux crues. En cas d'assèchement prolongé, ces milieux peuvent même devenir émetteurs de gaz à effet de serre du fait de la minéralisation de la matière organique.

LES SfN EN MILIEUX AQUATIQUES ET HUMIDES

Face aux effets combinés du changement climatique et des pressions anthropiques, la restauration du fonctionnement hydrologique des milieux aquatiques et humides constitue une SfN pour améliorer la résilience de ces milieux, tout en réduisant la vulnérabilité des territoires aux sécheresses, aux crues et à la dégradation de la qualité de l'eau. Renaturer les cours d'eau existants, les reméandrer, les rouvrir dans certains cas, participe à un écoulement plus naturel de l'eau et limite les inondations (Acreman et Holden, 2013 ; Palmer *et al.*, 2014). Les écosystèmes associés aux rivières comme les ripisylves (ou forêts riveraines) jouent également un rôle de maintien des berges, de ralentissement du débit et d'amélioration de la qualité de l'eau.

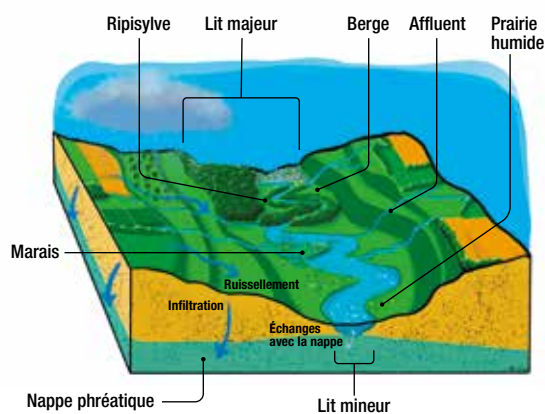
En Île-de-France, ces solutions s'inscrivent dans une logique de gestion intégrée à l'échelle des bassins versants, en cohérence avec les objectifs du schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) Seine-Normandie, du Plan régional d'adaptation au changement climatique (PRACC) d'Île-de-France et des politiques de prévention des inondations. En effet, contrairement à d'autres types de SfN, l'échelle d'action est ici primordiale : l'eau circule entre les sols, les nappes, les cours d'eau et l'atmosphère, et les actions menées en amont influencent directement les dynamiques hydrologiques et la qualité de l'eau en aval. Il est donc essentiel, avant toute mise en œuvre de SfN pour la gestion de l'eau, d'intégrer une réflexion à l'échelle du bassin versant et de respecter le principe de solidarité amont-aval. Par exemple, pour limiter les ruissellements et les inondations, il s'agit d'infiltrer les eaux de pluie partout où cela est possible, en amont grâce aux techniques d'hydraulique douce, jusqu'en aval dans les villes par les techniques de gestion alternative des eaux pluviales.



Les milieux aquatiques et humides sont présents à la fois dans les milieux forestiers, agricoles et urbains. Il a été choisi de les traiter dans une partie spécifique afin d'explorer les SfN adaptées à ces milieux particulièrement sensibles aux pressions anthropiques et climatiques, mais aussi essentiels pour l'adaptation au changement climatique, et le maintien de la biodiversité en Île-de-France. Les SfN qui y sont abordées sont toutefois étroitement liées à celles présentées dans les autres milieux, voire répétées mais traitées sous un autre angle.

La restauration du fonctionnement hydromorphologique des cours d'eau

La rectification, l'endiguement et la canalisation des cours d'eau par les humains ont profondément altéré la dynamique naturelle des cours d'eau franciliens, réduisant leur capacité à ralentir les écoulements et à dissiper l'énergie des crues (European Environment Agency, 2018). La restauration de leurs fonctionnalités hydrauliques est alors essentielle. Plusieurs types d'opérations existent : le reméandrage, qui consiste à redonner aux cours d'eau un tracé sinueux lorsque celui-ci a été rectifié. En allongeant le linéaire de la rivière, les méandres ralentissent les vitesses d'écoulement, augmentent le temps de transfert des crues et contribuent ainsi à limiter les risques et les impacts des inondations en aval. Cette opération permet également de diversifier les habitats et de restaurer une dynamique fluviale plus proche du fonctionnement naturel.



Bassin versant. © Olivier Renault

La restauration du fonctionnement hydromorphologique des cours d'eau passe également par le rétablissement des continuités longitudinales et latérales, notamment via la suppression d'ouvrages faisant obstacle aux écoulements, comme les seuils, les buses et les digues. Ces infrastructures constituent en effet un frein majeur au fonctionnement écologique des milieux aquatiques (Belletti *et al.*, 2020 ; Grill *et al.*, 2019). En fragmentant le cours d'eau, elles ont des effets négatifs sur les déplacements des espèces piscicoles – pouvant provoquer des effondrements des populations de poissons migrateurs (Johan *et al.*, 2026) –, sur la dispersion des amphibiens et des espèces semi-aquatiques, ainsi que sur le transport naturel des sédiments et la diversification des habitats. La suppression ou l'aménagement de ces ouvrages permet de rétablir la continuité écologique, indispensable à la circulation des espèces et à la dynamique naturelle des rivières. Par exemple, d'importants travaux de restauration de l'Orge ont été réalisés par le Syndicat de

l'Orge en 2023-2024 sur la commune de Saint-Germain-Lès-Arpajon (91). Ces interventions visaient principalement à restaurer la continuité écologique sur un linéaire d'environ 3 km de cours d'eau. Les travaux ont notamment consisté en l'effacement d'un ouvrage hydraulique (clapet) remplacé par une rampe en enrochements, la suppression d'anciennes protections de berges pour restaurer une connexion entre les milieux terrestre et aquatique, le reprofilage des berges en pente douce afin d'augmenter les capacités d'expansion des crues dans le lit majeur, ainsi que la végétalisation des banquettes du bief (ces dernières se sont créées naturellement grâce aux variations des débits de l'Orge suite à l'abaissement du clapet). Parallèlement, ils permettent de rétablir un fonctionnement hydromorphologique plus naturel et d'améliorer la qualité physico-chimique de l'eau en facilitant l'écoulement naturel des sédiments et la circulation de la faune et de la flore.

Un autre exemple significatif est porté par le SyAGE¹⁷, qui engage depuis plusieurs années des projets de restauration de la continuité écologique de l'Yerres, fondés notamment sur la suppression, totale ou partielle, des obstacles présents dans le lit de la rivière. C'est le cas de l'abaissement complet du barrage de Rochopt en 2018, situé sur l'Yerres entre Boussy-Saint-Antoine et Épinay-sous-Sénart (91). À la suite des travaux, l'Yerres a connu des transformations notables : diversification des écoulements, recolonisation par des cortèges végétaux caractéristiques des zones humides, ainsi que le retour de plusieurs espèces de poissons. Dans cette dynamique, le SyAGE poursuit et étend ses actions dans ce secteur avec la réouverture des rus de Rochopt et du Gord, afin de renforcer à l'échelle du bassin la fonctionnalité écologique de l'Yerres et de limiter les risques d'inondation.

Une autre intervention consiste en la diversification de la morphologie du lit des cours d'eau avec une



L'Yerres, 2021, suite aux travaux de suppression du barrage pour rétablir sa continuité écologique.

© Gwendoline Grandin

alternance de différents habitats (radiers, mouilles, plats lents) et la restauration du lit mineur, qui contribuent à améliorer la qualité écologique des rivières. Elle vise à redonner au cours d'eau principal des caractéristiques plus naturelles : granulométrie adaptée, diversité des faciès d'écoulement, lit réhaussé, meilleure connexion avec les berges et la plaine alluviale. Cela passe par des recharges granulométriques, la remise en mouvement des sédiments, la suppression d'enrochements inutiles, la restauration de banquettes alluviales ou l'implantation de bois morts. Ces aménagements favorisent les échanges entre la végétation, les sédiments et l'eau, améliorant ainsi l'oxygénation et l'auto-épuration de l'eau. Des habitats favorables à la reproduction des espèces et des zones refuges en période d'étiage ou de crue sont ainsi créés (Palmer *et al.*, 2010 ; Wohl *et al.*, 2015). Ils permettent également de limiter les phénomènes d'incision de rivières¹⁸ et de renforcer la résilience hydromorphologique des cours d'eau face aux variations climatiques en limitant les effets de l'échauffement ou des étiages sévères.

La reconnexion des bras secondaires, zones annexes et petits chenaux, contribue à ralentir les vitesses d'écoulement, à augmenter les capacités de stockage temporaire de l'eau et à limiter l'érosion des berges tout en jouant un rôle essentiel dans la diversité des habitats aquatiques (CEPRI, 2025, 2021). Elle participe également à la restauration de zones refuges en période d'étiage, d'espaces de reproduction pour de nombreuses espèces et de zones de dissipation de l'énergie des crues (Comité de bassin Seine-Normandie, 2023). Cette reconnexion doit également s'accompagner d'une reconnexion aux zones inondables adjacentes.



L'Orge reprend son cours naturel à Saint-Germain-lès-Arpajon. © Syndicat de l'Orge

17. Syndicat mixte pour l'Assainissement et la Gestion des Eaux du bassin versant de l'Yerres.

18. Désigne un enfoncement généralisé du fond d'un cours d'eau provoqué par l'érosion. Une des conséquences est l'accélération des écoulements et l'aggravation des crues à l'aval.

Les zones naturelles d'expansion des crues

La forte urbanisation de l'Île-de-France a considérablement réduit les espaces d'expansion des crues qui permettent aux cours d'eau de déborder en cas de pluies intenses, en particulier en petite couronne où les lits majeurs sont majoritairement urbanisés. Redonner de l'espace aux cours d'eau, par la reconquête de prairies inondables, de boisements alluviaux ou de zones agricoles extensives, permet de stocker temporairement l'eau lors des événements extrêmes et réduit significativement les débits en aval et les dommages aux infrastructures liés aux inondations (Dadson *et al.*, 2017). Ces zones constituent également des habitats à forte valeur écologique, essentiels pour de nombreuses espèces inféodées aux milieux humides. Leur fonctionnement repose sur une double condition : une connectivité effective avec le cours d'eau et un régime de débits suffisamment variable, intégrant une diversité d'événements hydrologiques (Opperman *et al.*, 2010). Le fonctionnement de ces milieux dépend de processus complexes, incluant non seulement les crues mais aussi leurs fréquences et leurs interactions avec les nappes souterraines, déterminantes pour la dynamique des habitats et de la végétation riveraine. La restauration des zones d'expansion des crues nécessite une approche intégrée à une large échelle territoriale et une coordination entre acteurs. Cette SfN est fortement plébiscitée dans les stratégies de prévention des inondations sur le bassin Seine-Normandie et les démarches de gestion des milieux aquatiques et de prévention des inondations (GEMAPI), qui encouragent le ralentissement naturel

des crues et le fait de « vivre avec » l'eau plutôt que de chercher uniquement à la contraindre.

Un exemple emblématique francilien est celui de la renaturation de l'Yvette par le Parc naturel régional (PNR) de la Haute Vallée de Chevreuse. Le tracé de ce cours d'eau a anciennement été modifié pour alimenter des moulins, puis progressivement recalibré et rectifié au ^{xx}e siècle afin d'accélérer l'évacuation des eaux. Ces aménagements ont conduit à un enfoncement du lit, à une déconnexion des zones humides et à une perte de diversité écologique, tout en aggravant les risques d'inondation en aval, notamment à Saint-Rémy-lès-Chevreuse (78). Face à ce constat, le PNR a engagé un projet de restauration ambitieux visant à redonner à la rivière un fonctionnement plus naturel. L'objectif était double : restaurer la continuité écologique et améliorer la gestion des crues. Ce projet, finalisé en 2020, a nécessité plus de 10 ans d'études, de concertation et d'acquisitions foncières. Les travaux ont concerné un linéaire d'environ 1,5 km, avec la création d'un nouveau lit sinueux en fond de vallée, allongeant le tracé de 30 % pour ralentir les écoulements. L'ancien chenal rectiligne a été en partie comblé, favorisant la reconnexion avec près de 10 ha de zones humides et prairies inondables. Les zones reconnectées jouent désormais un rôle de tampon, contribuant à atténuer les pics de crue en aval. En parallèle, une attention particulière a été portée à la diversification des habitats aquatiques (radiers, mouilles, bois morts), ainsi qu'à la conduite écologique du chantier : 100 % des matériaux excavés ont été réutilisés sur site, limitant les impacts liés aux transports et aux apports extérieurs.



La renaturation de l'Yvette et de sa zone humide permet de stocker 8 000 m³ d'eau et de diminuer de 30 cm la hauteur d'eau dans le centre de Saint-Rémy-lès-Chevreuse lors des inondations. © Ophélie Ricci



La zone d'expansion des crues du Vignois à Gonesse.
© SIAH

Un autre exemple illustre ce type d'opération en milieu urbain à Gonesse (95), où le SIAH¹⁹ a créé une zone d'expansion des crues afin de protéger les habitations riveraines des inondations liées au Croult. Le cours d'eau, initialement rectifié et endigué, a été reméandré et replacé dans son tracé historique. La rivière est désormais connectée à une succession de bassins naturels, permettant le stockage temporaire des crues, avec une capacité de 55 000 m³, tout en favorisant le développement de la biodiversité locale. Le site a depuis été classé Espace Naturel Sensible (ENS) par le Département du Val-d'Oise en 2024. Depuis 2020, il fait également l'objet d'un suivi écologique régulier et approfondi, qui met en évidence une évolution progressive des milieux. Cette surveillance permet au SIAH d'adapter la gestion du site afin de maintenir un équilibre entre dynamique naturelle et maîtrise des fonctions hydrauliques et écologiques.

Dans une logique similaire, le parc André Bouniol à Châlo-Saint-Mars (91) a fait l'objet d'actions de restauration menées par le SIARJA²⁰, visant à redonner au site ses fonctionnalités hydrauliques et écologiques, notamment en matière de gestion des inondations. Les travaux ont porté sur la restauration de prairies humides, la création de mares, l'abattage partiel d'une peupleraie vieillissante (culture favorisant l'assèchement des sols), ainsi que la remise à ciel ouvert d'un ruisseau auparavant busé.

19. Syndicat Mixte pour l'Aménagement Hydraulique des vallées du Croult et du Petit Rosne.

20. Syndicat de la rivière La Juine et de ses affluents.



Un parcours pédagogique avec platelages en bois a été aménagé afin de concilier accueil du public et préservation des zones humides restaurées au Parc André Bouniol à Châlo-Saint-Mars. © Gwendoline Grandin

La restauration des ripisylves

Les ripisylves, formations végétales se développant sur les berges d'un cours d'eau jouent un rôle essentiel de stabilisation des berges en plus de limiter l'érosion et de ralentir le ruissellement ou les crues (Maddyness *et al.*, 2024). Elles peuvent, par ailleurs, contribuer à l'amélioration de la qualité de l'eau en réduisant significativement les concentrations en nitrates, en pesticides et autres polluants provenant des zones agricoles et des milieux urbains adjacents. Selon une revue bibliographique, des zones tampons de nature variable de plus de 30 m de large sont nécessaires pour préserver l'intégrité physique, chimique et biologique des petits cours d'eau (Mayer *et al.*, 2007 ; Sweeney et Newbold, 2014). Enfin, elles offrent un habitat naturel pour les espèces faunistiques des cours d'eau et apportent un ombrage qui limite l'élévation de la température de l'eau (Broadmeadow et Nisbet, 2004 ; Naiman et Décamps, 1997). Elles constituent ainsi des corridors écologiques majeurs, favorisant les déplacements des espèces le long des trames bleues et turquoise. Leur restauration renforce à la fois la continuité écologique et la résilience des milieux aquatiques tout en diminuant les risques liés aux sécheresses et aux inondations, à condition que ce milieu soit géré de manière écologique ou en libre-évolution et constitué d'essences locales adaptées. Les plantations peuvent être organisées selon la hauteur de la berge : des espèces ligneuses (arbres et arbustes) telles que le saule, l'aulne, l'orme ou le noisetier sont implantées en sommet de berge, puis des espèces arbustives et buissonnantes en milieu de pente et enfin des végétaux héliophytes²¹ (roseaux, joncs, cresson...) en pied de berge, espèces qui jouent de surcroît un rôle important dans la phytoépuration.

Depuis le début des années 2010, la ville de Lille mène un programme de renaturation des berges de la Deûle et du réseau hydrographique de la citadelle Vauban, afin d'en restaurer les fonctions écologiques altérées par l'urbanisation, les activités humaines et la navigation fluviale à grand gabarit. Les services municipaux, aidés de nombreux bénévoles lors de chantiers participatifs réguliers, ont modifié les enrochements pour former des risbermes²², puis les ont végétalisées par transplantation de mottes prélevées dans un fossé adjacent. Ils ont aussi créé une zone de quiétude limitant le batillage²³ via une barrière végétale implantée dans le fond vaseux, construite avec bois et branchages issus de taille locale. Cette zone accueille aujourd'hui des frayères à poissons et de nombreuses espèces, avec l'espoir de voir revenir un jour le Castor d'Europe. La ville plante aujourd'hui près de 800 plançons de saules par an sur les berges de la Deûle dans la continuité de cette action de restauration. Ces plançons sont issus de la taille des têtards de plusieurs espèces locales de saules, replantés le long du canal sur un linéaire total de 5 km. Les interventions qui ont portées sur les anciens fossés défensifs de la Citadelle et de la rivière Tortue visaient à limiter l'érosion des berges par la création de haies sèches défensives et à recréer une ripisylve favorable à la biodiversité, tout en encadrant les usages existants à l'origine de l'érosion des berges, notamment la baignade des chiens, à l'origine de phénomènes d'érosion.

21. Plante semi-aquatique fixée dont l'appareil végétatif et reproducteur est totalement aérien, poussant généralement sur les rives ou dans les zones peu profondes.

22. Banc alluvial artificiel.

23. Remous provoqué soit par la marche d'un bateau, soit par le vent et qui cause la dégradation des berges.



Berges de la rivière Tortue restaurées dans le parc de la Citadelle. © Gwendoline Grandin



Banquettes végétalisées sur les berges de la Deûle à Lille. © Gilles Lecuir

La restauration des berges et des cours d'eau par le génie végétal

Le génie végétal constitue une technique de restauration écologique reposant sur la plantation de végétaux pour stabiliser les berges, restaurer les habitats et améliorer les fonctions hydrologiques des cours d'eau.

Ces aménagements permettent de stabiliser les berges tout en conservant leur caractère naturel et perméable. Les racines des végétaux stabilisent les sols, réduisent l'érosion et améliorent l'infiltration et l'épuration de l'eau.

La communauté d'agglomération de Marne-et-Gondoire mène depuis plus de quinze ans une stratégie de renaturation des berges de Marne fondée sur les techniques de génie végétal et la restauration des milieux humides. Un projet emblématique a été conduit à Pomponne (77), avec la réhabilitation de 3 km de berges achevée en 2009, combinant protections végétalisées (fascines de saules, hélrophytes, plantations d'arbres et d'arbustes locaux) et interventions ponctuelles de génie civil dans les secteurs les plus contraints.

Depuis, la collectivité a poursuivi cette dynamique avec plus de 3 km de berges renaturées à Thorigny-sur-Marne et Dampmart, près de 1,5 km à Lagny-sur-Marne, ainsi que de nouvelles opérations engagées à Montévrain. À Lagny-sur-Marne, le projet engagé depuis 2019 associe renaturation des berges, réouverture du ru du Bras Saint-Père et reconnexion

à des prairies humides, tout en développant des cheminements doux et des espaces de découverte du milieu aquatique. Ces opérations répondent à des enjeux multiples : écologiques (restauration de la ripisylve, habitats aquatiques), hydrauliques (expansion des crues), paysagers et sociaux (promenade, pêche, appropriation des berges). Le génie végétal présente également un intérêt face au réchauffement des masses d'eau, les formations végétales riveraines contribuent à l'ombrage des cours d'eau et limitent leur réchauffement, ce qui est particulièrement important pour les espèces sensibles aux températures élevées (Frossard et Evette, 2009 ; Gurnell et Grabowski, 2016). Il est à privilégier par rapport aux ouvrages de génie civil traditionnels comme les enrochements et les ouvrages hydrauliques. Le génie végétal est souvent plus économique à long terme et peut être mis en œuvre à petite échelle par des gestionnaires locaux ou des particuliers.

LE GÉNIE VÉGÉTAL NE DOIT PAS ÊTRE SYSTÉMATISÉ.
LA PROTECTION DES BERGES N'EST PERTINENTE
QUE DANS LES CAS OÙ DES ENJEUX HUMAINS
OU MATÉRIELS SIGNIFICATIFS SONT AVÉRÉS.
L'ÉROSION EST UN PHÉNOMÈNE NATUREL,
ESSENTIEL AU BON FONCTIONNEMENT ÉCOLOGIQUE
ET GÉOMORPHOLOGIQUE DES COURS D'EAU.
SUR DES SITES SANS ENJEUX MAJEURS,
ELLE DOIT ÊTRE ACCEPTÉE COMME PARTIE INTÉGRANTE
DE LA DYNAMIQUE FLUVIALE. (Didier *et al.*, 2025).



Réfection des berges par techniques mixtes, végétalisation du talus et pied de berges en enrochement. © BKM

LITS DE PLANTS ET PLANÇONS



Cette technique est utilisée pour stabiliser des talus à forte pente, particulièrement sensibles à l'érosion. Elle repose sur l'alternance de plançons (boutures ligneuses) et de boudins de terre disposés en strates successives. Ce dispositif permet de créer des « ceintures végétales » dont les systèmes racinaires assurent progressivement la cohésion du sol et la stabilisation durable de la berge. © Association Espaces

PEIGNE VÉGÉTAL ET TREILLIS DE BRANCHES



Le peigne végétal est une technique utilisée pour stabiliser ou reconstituer des portions de berges érodées. Elle consiste à implanter des pieux en bois solidement ancrés dans la berge et reliés entre eux, formant une structure ouverte ensuite comblée par des branches et des végétaux, idéalement prélevés localement. Les treillis quant à eux organisent ces éléments de manière longitudinale ou transversale. Ces aménagements agissent comme un filtre naturel en retenant les matières en suspension et les sédiments transportés par le cours d'eau, favorisant leur dépôt et la reconstitution progressive de la berge. Il est particulièrement adapté aux cours d'eau soumis à des crues fréquentes ou transportant des charges solides importantes. En cas de déficit en matériaux alluviaux, un apport initial de matériaux graveleux peut être nécessaire. © Syage

TRESSAGE



Le tressage est une technique de protection des berges consistant à entrelacer des branches entre des pieux en bois. Cette structure forme une barrière souple continue qui protège le pied de berge tout en laissant circuler l'eau. Elle est adaptée aux berges basses (de l'ordre de 40 cm) de petits cours d'eau à faible dynamique. Son principal avantage réside dans son efficacité immédiate après installation, tout en permettant une intégration progressive du végétal dans le milieu. © ARB idF

PLANTATIONS



Les plantations consistent à implanter des arbres (saules, aulnes, noisetiers, ormes...), arbustes et hélophytes adaptés aux milieux humides directement sur les berges. Elles permettent de les stabiliser grâce au système racinaire et contribuent à la régulation thermique du cours d'eau grâce à l'ombrage, à la phytoépuration tout en créant des habitats pour la faune. © Syage

COUCHES DE BRANCHES ET GARNISSAGE



Les couches de branches consistent à disposer des branches vivantes dans le sol, parallèlement à la berge, maintenues à l'aide de pieux et de treillages en fer et associées à un géotextile biodégradable. Elles permettent une stabilisation rapide des talus grâce à l'enracinement des végétaux et favorisent la reprise végétative. Le garnissage complète ce dispositif en densifiant la végétation, renforçant ainsi la protection contre l'érosion. © Marc Barra

BOUTURAGE



Le bouturage constitue la technique de base du génie végétal. Il consiste à implanter dans le sol des fragments de végétaux ligneux vivants (branches ou tiges) capables de reprendre racine. Il permet une production rapide de biomasse et la mise en place d'un réseau racinaire dense qui stabilise durablement les sols. Utilisé seul ou combiné à d'autres techniques, il initie les processus de restauration écologique et favorise la création d'habitats. © Gabrielle Huart

FASCINES DE LIGNEUX



Le fascinage est une technique de protection des pieds de berge reposant sur la mise en place de fagots de branches de saules, mortes ou vivantes, maintenus entre deux rangées de pieux en bois. Des matériaux graveleux peuvent être ajoutés pour renforcer la structure. Cette technique assure une protection immédiate contre l'érosion en dissipant l'énergie du courant. Avec le temps, les saules développent un système racinaire dense qui consolide durablement les sols. Les saules sont particulièrement adaptés à ces usages en raison de leur capacité de bouturage, de leur croissance rapide et de leur fort pouvoir de stabilisation. © Syage

Les techniques d'aménagement de berges des cours d'eau à base de plantes ligneuses.

Source : <https://genibiodiv.inrae.fr/> et Syage

La protection et la restauration des zones humides

La conservation et la restauration des zones humides constituent un enjeu majeur pour l'adaptation au changement climatique. Ces milieux, en plus d'accueillir une biodiversité riche et spécifique, jouent un rôle déterminant dans la régulation hydrologique. En effet, les zones humides fonctionnent comme des zones naturelles d'expansion des crues. Lors d'épisodes de fortes précipitations ou de débordement des cours d'eau, elles peuvent stocker temporairement d'importants volumes d'eau grâce à la porosité de leurs sols et à la présence d'une végétation dense. Ce stockage ralentit la propagation des crues et réduit l'intensité des pics de débit, limitant ainsi les risques d'inondation pour les territoires situés en aval du bassin versant. Les plaines alluviales, les marais et les prairies humides jouent notamment ce rôle d'« éponges naturelles » en dissipant l'énergie des crues (Acreman et Holden, 2013).

En période d'étiage, les zones humides participent au maintien des débits des cours d'eau. En effet, selon la profondeur, un hectare de tourbière peut stocker jusqu'à plusieurs milliers de mètres cubes d'eau (CEPRI, 2025). L'eau stockée dans les sols tourbeux, les sédiments ou les nappes superficielles est progressivement restituée aux rivières par drainage naturel ou par écoulements souterrains. Ce phénomène contribue à stabiliser les régimes hydrologiques et à maintenir des conditions favorables à la vie aquatique durant les périodes sèches. Cette fonction de régulation est particulièrement importante dans un contexte de changement climatique marqué par des sécheresses plus longues et plus fréquentes. Les zones humides agissent aussi comme de véri-

tables filtres naturels. Les processus biologiques, chimiques et physiques qui s'y déroulent permettent de retenir ou de transformer de nombreux polluants. Les sédiments et les matières en suspension se déposent dans ces milieux à faible courant, tandis que les végétaux et les micro-organismes absorbent ou transforment les nutriments tels que l'azote et le phosphore. Les bactéries présentes dans les sols saturés peuvent également dégrader certains polluants organiques ou favoriser des processus de dénitrification qui réduisent ensuite les concentrations en nitrates dans les eaux de surface et souterraines. Ces mécanismes contribuent à améliorer la qualité de l'eau et à réduire les coûts de traitement pour l'eau potable. À l'échelle nationale, 2 milliards d'euros sont économisés chaque année sur le traitement de l'eau potable grâce la rétention de l'azote par les zones humides, évitant ainsi la pollution des rivières (Morard and Joassard, 2019).

Enfin, les zones humides, et en particulier les tourbières, constituent d'importants réservoirs de carbone. Les conditions saturées en eau y limitent la décomposition de la matière organique, favorisant l'accumulation de carbone dans les sols sur de longues périodes. À l'échelle mondiale, les tourbières stockent à elles seules environ un tiers du carbone, alors qu'elles ne couvrent qu'environ 3 % des surfaces terrestres (IPCC, 2019). Lorsque ces milieux sont drainés ou asséchés, la matière organique se décompose plus rapidement et libère du dioxyde de carbone et du protoxyde d'azote dans l'atmosphère. La préservation et la restauration des zones humides contribuent donc à limiter les émissions de ces gaz à effet de serre et à renforcer le rôle des écosystèmes comme puits de carbone.



Le rôle d'épuration des eaux a été démontré par plus de 10 ans d'expérimentation sur la zone tampon artificielle de Rampillon par l'INRAE (cf. chapitre 2). © Erwan Cordeau



Tourbière en forêt de Saint-Arnoult-en-Yvelines. © Gwendoline Grandin



LES TOURBIÈRES ET LE CYCLE DU CARBONE

Les tourbières en bon état écologique jouent un rôle majeur dans le cycle du carbone. Grâce à leur saturation en eau, elles créent des conditions anaérobies (pauvres en oxygène) qui ralentissent fortement la décomposition de la matière organique, permettant ainsi l'accumulation de carbone sur le long terme. Cependant, le changement climatique, en particulier la multiplication des sécheresses et l'augmentation des températures, entraîne une baisse du niveau des nappes phréatiques. L'eau se retire, l'air pénètre plus profondément, et l'oxygène atteint des couches de tourbe plus profondes. Grâce à l'oxygène, les bactéries peuvent accélérer la dégradation de la matière organique accumulée, ce qui libère de grandes quantités de gaz à effet de serre. Le rôle des tourbières dans le cycle du carbone s'inverse puisqu'elles passent alors de

puits de carbone à sources nettes de CO_2 (Evans *et al.*, 2021; Thiele, 2011). Dans les cas les plus extrêmes, les émissions peuvent atteindre jusqu'à 43 tonnes $\text{CO}_{2\text{eq}}$ par hectare et par an (Tiemeyer *et al.*, 2020), soit l'équivalent des émissions générées par un trajet de 155 000 km en voiture. Une étude a montré que 25 % des tourbières mondiales actuelles seront dégradées d'ici 2050 sous l'influence des activités humaines et du climat, et qu'elles seront responsables d'environ 8 % des émissions mondiales de CO_2 d'origine anthropique (Urák *et al.*, 2017). En Île-de-France, ces milieux sont considérés comme relictuels avec 124 ha (incluant les roselières, fourrés et forêts tourbeux, d'après VegIDF) et menacés de disparition avec les nouvelles conditions climatiques.



Restauration de la prairie et de la mare du Vivier dans le Parc naturel régional de la Haute Vallée de Chevreuse.
© Gabrielle Huart

La stratégie de gestion des zones humides repose sur une logique graduée en trois niveaux complémentaires : préserver les zones humides existantes, restaurer celles dont le fonctionnement est dégradé, puis recréer des zones humides disparues afin de renforcer la résilience face aux risques d'inondation. En premier lieu, il est impératif de préserver les zones humides existantes de toute forme d'artificialisation. La protection des têtes de bassins versants, qui abritent de nombreuses zones humides temporaires, doit être priorisée. Cette préservation nécessite une intégration fine de ces milieux dans les documents d'urbanisme, par des cartographies détaillées, des zonages adaptés et par la mise en place de servitudes de protection. En second lieu, lorsque des dégradations sont avérées, la restauration hydrologique permet de rétablir progressivement leurs fonctions écologiques. Celle-ci peut consister en la remise en eau de zones humides asséchées, la suppression de drains, la reconnexion aux nappes et aux cours d'eau et la préservation des prairies humides associées. Enfin, la création de nouveaux milieux humides peut être pensée à plusieurs échelles, de manière à connecter les différentes zones humides restaurées entre elles pour faciliter le déplacement des espèces et renforcer la trame bleue. Toutefois ces restaurations nécessitent des temps longs. Une méta-analyse mondiale portant sur plus de 600 zones humides montre que les zones humides restaurées ne retrouvent en moyenne qu'environ 74 % de leur état de référence après 50 à 100 ans

(Moreno-Mateos *et al.*, 2012 ; cf. encart p. 129), soulignant l'importance de préserver les zones humides existantes et de sécuriser durablement le foncier des projets de restauration.

La restauration de la prairie humide et de la mare du Vivier, située dans le Parc naturel régional de la Haute Vallée de Chevreuse, constitue un exemple emblématique de renaturation de zone humide en contexte rural. Le site a fait l'objet d'interventions visant à rétablir ses fonctionnalités hydrologiques et écologiques : curage complet de la mare, suppression d'une digue bétonnée, et ouverture de la prairie humide par l'abattage de peupliers et de saules. Ces actions ont permis de redonner au site sa capacité de stockage des eaux de ruissellement lors des épisodes pluvieux intenses, contribuant ainsi à la réduction des risques d'inondation en aval. Afin d'assurer la pérennité des milieux réouverts, un pâturage tardif a été mis en place. Cette gestion permet à la fois d'entretenir la prairie humide et de maintenir une diversité floristique.

La stratégie foncière portée par l'établissement public d'aménagement et de gestion de l'eau (EPAGE) du bassin du Loing illustre de manière concrète le rôle central de l'acquisition et de la maîtrise du foncier dans la restauration des zones humides et des zones d'expansion des crues. Créé à la suite des inondations de 2016, cet établissement couvre un territoire de près de 4 000 km² et assure la compétence GEMAPI sur environ 3 000 km de cours d'eau. Initiée dans la vallée de l'Ouanne, l'EPAGE

mène une stratégie ambitieuse visant à préserver et restaurer les zones d'expansion des crues sur des secteurs à enjeux, inscrite au Programmes d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI) du Loing. Cette démarche repose sur un travail de recensement des zones naturelles, la mise en place de mesures de protection et une politique d'acquisition foncière ciblée. Les actions d'animation foncière ont ainsi permis d'entrer en contact avec un grand nombre de propriétaires et ont abouti à l'acquisition de plusieurs hectares de terrains stratégiques sur la vallée de l'Ouanne, permettant de préserver des espaces naturels essentiels pour la biodiversité et la gestion des crues. Ainsi, 175 ha ont été acquis

dans les lits mineurs et majeurs, à l'amiable, sans recours à l'expropriation. Cette maîtrise foncière permet de garantir sur le long terme la fonctionnalité hydraulique de ces espaces, tout en maintenant des usages agricoles compatibles grâce à des dispositifs comme les Obligations Réelles Environnementales (ORE) ou des conventions d'exploitation temporaires. La stratégie repose également sur une gouvernance territoriale élargie, associant la Chambre d'agriculture, la SAFER, le Conservatoire d'espaces naturels et les élus locaux, ces derniers jouant un rôle clé dans la médiation foncière. L'EPAGE du Loing envisage désormais d'étendre cette stratégie à d'autres secteurs du bassin versant du Loing (CEPRI, 2025).



Vallée du Loing. © Lucile Dewulf



ALERTE SUR L'EFFICACITÉ DES OPÉRATIONS DE RESTAURATION

Dans de nombreux cas, les techniques de restauration mises en œuvre, bien que basées sur des connaissances scientifiques, n'aboutissent pas à des résultats à la hauteur des objectifs visés. Une étude fondée sur l'analyse d'un grand nombre de papiers scientifiques concernant la restauration de zones humides montre que :

- sur plus de 600 de projets de restauration réalisés dans le monde, les assemblages d'animaux et de plantes ainsi que les fonctions biogéochimiques ne se sont rétablis qu'à 74 % du niveau de référence et ce au bout de 50 à 100 ans ;
- sur 89 projets de restauration d'écosystèmes lacustres et côtiers, une récupération de seulement 24 % de la biodiversité et 34 % des fonctions biogéochimiques est observée après 12 et 16 ans ;
- sur 166 études forestières, bien que l'abondance des plantes et des animaux se soit rétablie

en l'espace de quelques décennies, la diversité et les fonctions biogéochimiques n'ont pas été clairement augmentées par des méthodes de restauration active (plantations et amendements). (Moreno-Mateos *et al.*, 2020).

Ces résultats ne remettent pas en cause l'intérêt des opérations de restauration pour faire face au changement climatique, mais rappellent qu'elles ne peuvent compenser rapidement la disparition des milieux naturels. Les écosystèmes se reconstruisent sur des temps longs et nécessitent des conditions favorables, notamment une maîtrise foncière durable, un espace de fonctionnement suffisant et un suivi dans le temps. Préserver les zones humides existantes reste une solution bien plus efficace et moins coûteuse que de tenter de les reconstruire après leur dégradation.

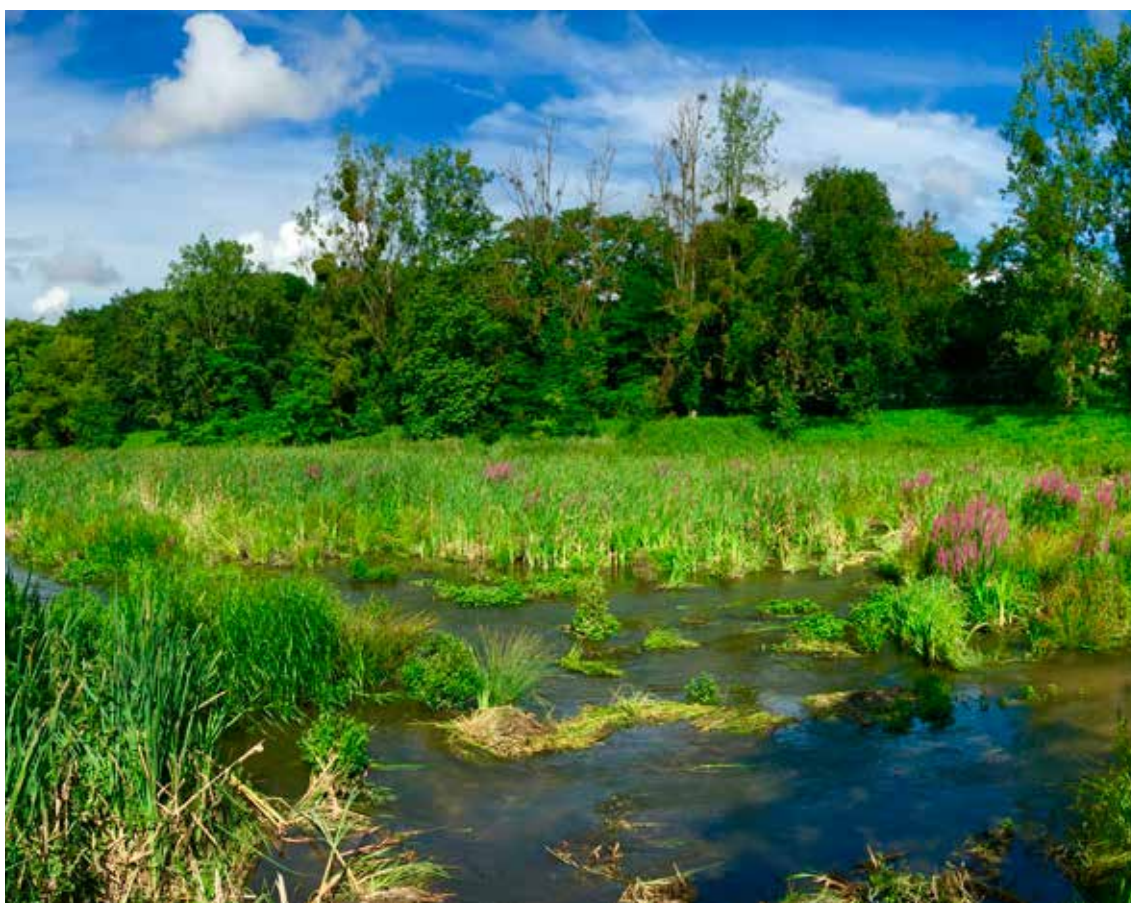
La végétalisation et l'infiltration sur tout le bassin versant

La mise en place d'infrastructures d'hydraulique douce comme la restauration de haies bocagères, l'implantation de haies brise-crue, la mise en place de bandes enherbées et de couverts végétaux permanents ou encore la création de fossés et talus, offre des obstacles naturels au ruissellement et favorise l'infiltration de l'eau là où elle tombe. Ces pratiques permettent de freiner le ruissellement et l'érosion des sols tout au long des versants du bassin. L'hydraulique douce limite ainsi les risques d'inondation par ruissellement et améliore la qualité du cours d'eau en aval en limitant sa pollution par des sédiments et des polluants (Rosier *et al.*, 2023 ; Viaud *et al.*, 2009). Que ce soit par le changement des pratiques agricoles vers de l'agriculture de conservation des sols, le maintien des prairies permanentes dans les plaines alluviales ou par la gestion intégrée des eaux pluviales en milieu urbain à travers la désimperméabilisation des sols, leur renaturation, l'aménagement de noues végétalisées..., toutes ces SfN participent à infiltrer l'eau et limiter le volume ruisselé en aval du bassin versant. Pour plus de détails, consulter les chapitres 3 et 5.

La transformation des retenues d'eau en zones humides

Réduire les risques d'inondation peut aussi passer par la transformation de certains plans d'eau permanents (étangs, bassins, retenues) en zones humides écologiquement fonctionnelles. Contrairement à ces plans d'eau, les zones humides jouent un rôle de stockage temporaire : elles se remplissent lors des épisodes de fortes pluies, puis se vident lentement et progressivement. Elles peuvent ainsi absorber des volumes d'eau bien plus importants qu'un plan d'eau permanent, déjà saturé en eau, dont la capacité de régulation reste limitée.

Sur son territoire, le Syndicat Intercommunal pour l'Assainissement de la Vallée de la Bièvre (SIAVB) a augmenté la capacité de rétention des eaux de 180 000 m³ (+30 %) grâce à la suppression d'une dizaine d'étangs, réduisant considérablement le risque inondation. Cette transformation s'est également traduite par une réduction importante des coûts d'entretien. Là où la gestion des décanteurs et le curage des étangs représentaient en moyenne environ 37 000 € par retenue et par an, ces charges sont aujourd'hui devenues quasi nulles sur les sites restaurés.



Suppression du plan d'eau permanent Vilgénis Aval sur la Bièvre, juin 2016. © Hervé Cardinal

Ces travaux ont également nécessité une phase de sensibilisation et d'accompagnement des usages, notamment pour les étangs de pêche, afin d'assurer l'adhésion des usagers et la bonne appropriation des nouveaux aménagements (OFB, 2024).

D'autres opérations similaires ont été menées sur le territoire du SIARJA. En 2019, la Communauté de communes Entre Juine et Renarde (91) envisageait le curage du bassin de Gravelle, afin d'augmenter sa capacité de stockage des eaux pluviales sur la commune d'Étréchy. Le coût de cette intervention était

estimé à environ 170 000 €. Après concertation avec les équipes du SIARJA, une alternative plus sobre et plus fonctionnelle a été retenue pour un montant d'environ 15 000 €. Il a été décidé de restaurer une zone humide en lieu et place du bassin, permettant d'assurer des fonctions de régulation hydraulique équivalentes (stockage temporaire, effet tampon et ralentissement des écoulements) tout en améliorant la qualité écologique et paysagère du site grâce à la création d'habitats humides.



Avant et après les travaux de renaturation du bassin de Gravelle. © SIARJA

OUTILS DE PLANIFICATION ET FINANCEMENTS

Les SfN en milieux aquatiques et humides sont le trait d'union entre les milieux urbains et ruraux. Pour que leur mise en place soit cohérente et efficace, une gouvernance partagée et une vision de long terme doivent être adoptées. Elles doivent s'inscrire dans une stratégie d'adaptation à l'échelle du bassin versant, qui prend en compte les interactions entre les usages de l'eau, les dynamiques écologiques et les effets du changement climatique. Celle-ci doit s'appuyer sur une démarche de suivi et d'expérimentation, incluant par exemple le suivi des habitats humides par télédétection ou inventaires de terrain, ou encore le suivi des bioindicateurs sensibles au climat (amphibiens, odonates, poissons, bryophytes) qui permet d'évaluer les évolutions en cours. En parallèle, des modélisations hydrologiques locales (débits d'étiage, fréquence des crues, évolution des nappes) sont nécessaires pour anticiper les trajectoires futures et orienter les décisions d'aménagement. C'est le Schéma Directeur d'aménagement et de gestion de l'eau (SDAGE) Seine-Normandie qui fixe les grandes orientations de gestion de l'eau à l'échelle du bassin afin d'atteindre le bon état des masses d'eau et d'adapter les territoires au changement climatique. Il encourage notamment les SfN comme les restaurations des cours d'eau, la préservation des zones humides, la réduction de l'imperméabilisation et la gestion des eaux pluviales à la source. La mise en œuvre de ces solutions repose sur une mobilisation élargie des acteurs du territoire : collectivités, syndicats de rivières, gestionnaires d'espaces naturels, agriculteurs, propriétaires fonciers, associations et citoyens. Cette concertation est indispensable pour concilier les usages, lever les freins fonciers et garantir la pérennité des actions engagées. En effet, ces SfN ne seront fiables qu'aux conditions foncières et réglementaires qui permettent aux écosystèmes d'atteindre leur maturité et équilibre. Ainsi, ces SfN peuvent être intégrés aux SAGE, aux contrats de territoire, aux PAPI, en complément des mesures de réduction des prélèvements en période d'étiage et d'une priorisation des usages. Des dispositifs d'accompagnement, tels que les paiements pour services environnementaux ou l'appui technique aux propriétaires, permettent de soutenir la restauration et la gestion durable des milieux humides, tout en valorisant les services écosystémiques qu'ils rendent (régulation hydrologique, épuration de l'eau, biodiversité, stockage de carbone). Les politiques publiques offrent plusieurs cadres structurants pour intégrer les SfN dans la gestion de l'eau. La Directive Cadre sur l'Eau (2000) constitue le cadre réglementaire européen de gestion de

l'eau. Elle fixe comme objectif l'atteinte du bon état écologique et chimique des eaux de surface et des nappes souterraines. Elle encourage la restauration de la continuité écologique, la réduction des pollutions diffuses et la préservation des zones humides à l'échelle des bassins versants. La Loi sur l'eau et les milieux aquatiques (LEMA) (2006), quant à elle, renforce les outils de gestion intégrée de l'eau et la responsabilité des collectivités dans la préservation des milieux aquatiques et la prévention des inondations. Elle consolide notamment les principes de continuité écologique des cours d'eau et a préparé le déploiement de la compétence GEMAPI (Gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations). Cette compétence, confiée aux intercommunalités, constitue un levier central. Elle couvre notamment l'aménagement des bassins versants, l'entretien des cours d'eau, la prévention des inondations et la restauration des écosystèmes aquatiques, des zones humides et des ripisylves. Sa mise en œuvre opérationnelle est souvent assurée par des syndicats de rivières ou des établissements publics territoriaux de bassin.

Les Plans de Prévention des Risques d'Inondation (PPRI) sont des outils réglementaires qui encadrent l'urbanisation dans les zones exposées aux inondations. Élaborés par l'État, ils délimitent des zones à risque dans lesquelles les constructions sont interdites ou strictement encadrées. Au-delà de la protection des personnes et des biens, les PPRI peuvent être mobilisés comme un levier indirect de préservation et restauration des lits majeurs des cours d'eau, ou contribuer au maintien ou à la restauration des zones naturelles d'expansion des crues et à la mise en place de SfN.

Les Programmes d'actions de prévention des inondations (PAPI) sont un engagement contractuel de l'État et des collectivités sur un programme global d'actions multithématiques qui permettent de mobiliser des fonds publics pour financer les programmes d'actions ou de travaux. Cela peut concerner des actions combinant solutions techniques et solutions fondées sur la nature. Ils intègrent notamment le suivi des débits d'étiage, la prescription dans les documents de planification, la mise en place d'actions visant à réduire les vulnérabilités en zone agricole ou des actions de ralentissement naturel des crues.

À l'échelle locale, les Schémas d'aménagement et de gestion de l'eau (SAGE) constituent des outils de planification essentiels pour concilier les usages de l'eau et la préservation des milieux aquatiques et humides sur un bassin versant ou une nappe. Reposant sur une démarche volontaire de concertation entre les acteurs du territoire, ils fixent des

objectifs et des règles pour une gestion équilibrée de la ressource en eau. Ils peuvent être complétés par des contrats de territoire ou de bassin versant, qui permettent de financer et coordonner des actions opérationnelles. Lors de sa révision en 2021, le SAGE de l'Yerres a fait de l'adaptation au changement climatique un axe central de sa stratégie. Il affirme la nécessité de préserver et restaurer les milieux aquatiques afin de maintenir les services écosystémiques rendus par ces derniers (autoépuration de l'eau, recharge des nappes, prévention des inondations, biodiversité, cadre de vie). Le document revendique explicitement une approche inspirée des SfN, avec pour ambition de renforcer la résilience du bassin versant en maximisant les fonctions écologiques des milieux aquatiques.

En particulier, la protection des zones sensibles constitue un levier essentiel pour préserver durablement la qualité et la disponibilité de la ressource en eau. Elle repose sur la mise en place de périmètres de protection autour des captages d'eau potable, des têtes de bassins versants et des zones humides, afin de limiter les pressions diffuses d'origine agricole, urbaine ou industrielle. Leur dégradation entraîne des coûts élevés de traitement de l'eau et une perte de services écosystémiques difficilement réversible. Dans ce cadre, plusieurs types de mesures peuvent être mobilisés. L'interdiction de cultiver certaines parcelles situées dans les zones les plus sensibles permet de réduire directement les apports de polluants. À défaut, la mise en place de « zones agricoles à faible pression chimique » vise à limiter fortement l'usage d'intrants (pesticides, engrais azotés), réduisant ainsi les transferts vers les nappes et les cours d'eau. L'interdiction de certains rejets polluants,

notamment industriels ou domestiques, constitue également un levier réglementaire indispensable pour prévenir la dégradation de la qualité de l'eau à la source.

Par ailleurs, des travaux récents montrent que la protection des aires d'alimentation de captages combinée à des changements de pratiques agricoles, constitue une stratégie particulièrement performante à long terme et s'avérant souvent plus efficace et moins coûteuse que des solutions curatives reposant uniquement sur le traitement de l'eau (Rey *et al.*, 2026). La conversion vers des pratiques agricoles extensives ou vers l'agriculture biologique permet de diminuer les flux de nitrates et de produits phytosanitaires tout en favorisant la biodiversité et la structure des sols. Eau de Paris a, par exemple, adopté une stratégie préventive autour de ses aires d'alimentation de captages pour agir en amont des prélèvements, sur plusieurs milliers d'hectares, afin de limiter les pollutions diffuses et garantir une eau potable de qualité sans recourir à des traitements coûteux. Cette stratégie repose notamment sur l'acquisition foncière de terres agricoles autour des captages, permettant d'y maîtriser les usages, ainsi que sur la contractualisation avec les agriculteurs locaux, notamment via des PSE. Eau de Paris accompagne ainsi la transition vers des pratiques agricoles durables, en particulier l'agriculture biologique, en proposant des aides financières, un appui technique et des débouchés sécurisés. Par ailleurs, l'opérateur met en place des périmètres de protection renforcés où l'usage d'intrants chimiques est fortement limité, voire interdit. Cette politique s'accompagne d'actions de sensibilisation et de gouvernance locale avec les acteurs du territoire.



L'aire d'alimentation de l'aqueduc de la Voulzie (77). © Maxime Zucca

Puis, les documents d'urbanisme constituent des leviers déterminants pour intégrer les enjeux liés à l'eau et au climat dans l'aménagement du territoire. Les PLU(i) peuvent mobiliser différents outils réglementaires pour limiter l'imperméabilisation des sols, préserver les continuités écologiques ou protéger les zones humides : classement en zone naturelle, identification d'espaces ou de servitudes à préserver, prescriptions sur la gestion des eaux pluviales, ou encore mise en place d'orientations d'aménagement (OAP) spécifiques pour la trame verte et bleue (cf. partie Leviers financiers et réglementaires du milieu urbain).

Enfin, de nombreuses actions sont accompagnées par la Région dont les SfN à travers sa politique « Eau » et par les Conseils départementaux comme le

Plan Départemental de l'Eau 2025-2030 de la Seine-et-Marne qui vise à la préservation et la restauration des milieux aquatiques et humides de son territoire pour faire face, entre autres, aux inondations. L'Agence de l'eau Seine-Normandie, quant à elle, a adopté en 2024 son programme d'intervention « Eau, climat et biodiversité » qui soutient notamment des opérations de restauration écologique, de réduction des pollutions diffuses ou de gestion durables eaux pluviales (Comité de bassin Seine-Normandie, 2023). Elle porte également les contrats territoriaux Eau, Biodiversité et Climat qui permettent de financer des actions de préservation des zones humides ou de restauration de cours d'eau par exemple, à l'échelle des bassins versants.



FOCUS : MOBILISER LE CODE DE L'URBANISME POUR PROTÉGER OU RESTAURER LES MILIEUX AQUATIQUES ET HUMIDES

- **Zones naturelles ou forestières (article L151-9)**

Le classement en zone N permet de limiter fortement l'urbanisation dans les secteurs à enjeux écologiques. Il est particulièrement adapté pour protéger les zones humides, les lits majeurs des cours d'eau et les espaces de bon fonctionnement des milieux aquatiques.

- **Zonages indicés pour la trame verte et bleue (article R151-43 4°)**

Ils permettent d'appliquer des règles spécifiques à certains secteurs identifiés comme stratégiques pour les continuités écologiques, notamment les vallées, zones humides ou corridors aquatiques.

- **Espaces boisés classés et continuités écologiques (articles L113-1 et L113-29)**

Ces dispositions permettent de classer des boisements, haies, ripisylves ou corridors écologiques associés aux milieux aquatiques. Ce classement interdit leur défrichement ou leur suppression, garantissant ainsi la préservation des berges, des zones humides boisées et des continuités écologiques indispensables aux déplacements des espèces.

- **Surfaces non imperméabilisées ou éco-aménageables (article L151-22)**

Cet article permet d'imposer un pourcentage minimal de surfaces perméables dans les projets et contribue ainsi à favoriser l'infiltration des eaux de pluie.

- **Éléments de paysage et continuités écologiques (article L151-23)**

Il est possible d'identifier et de protéger des éléments structurants pour les continuités comme les mares, fossés, haies, zones humides ou petits cours d'eau. Leur suppression ou leur altération peut être réglementée, ce qui contribue directement à la préservation de la trame bleue

et des habitats associés.

- **Limitation de l'imperméabilisation et gestion des eaux pluviales (article L151-24)**

Cet article autorise les collectivités à encadrer la gestion des eaux pluviales à la parcelle : infiltration, stockage temporaire, limitation des débits de rejet. Il favorise le développement de solutions fondées sur la nature pour réduire les risques d'inondation et préserver les milieux aquatiques.

- **Emplacements réservés pour espaces verts et continuités écologiques (article R151-43 3°)**

Les collectivités peuvent réserver des terrains pour des projets futurs : création de zones humides, renaturation de cours d'eau, corridors écologiques ou zones d'expansion des crues. Cet outil est stratégique pour anticiper la restauration écologique à long terme.

- **Traitement environnemental et paysager des espaces non bâtis (article R151-43)**

Cet article permet d'imposer des prescriptions sur les aménagements comme le maintien de sols perméables, la végétalisation des berges et des espaces libres ou encore l'intégration paysagère des ouvrages hydrauliques.

- **Orientations d'aménagement et de programmation – OAP (article L151-6)**

Les OAP permettent d'intégrer concrètement les enjeux liés à l'eau dans les projets d'aménagement : préservation ou restauration de zones humides, maintien de zones d'expansion des crues, intégration de techniques de gestion alternative des eaux pluviales (noues, bassins végétalisés, désimperméabilisation). Elles constituent un outil clé pour traduire les SfN à l'échelle opérationnelle des projets urbains.

RETOURS D'EXPÉRIENCE

Réhabilitation des berges de Seine par l'association Espaces (92)

Dans un contexte de forte artificialisation des berges franciliennes, l'association Espaces mène depuis 1999 un programme de restauration écologique de la Seine sur le secteur de l'Île Saint-Germain (92), entre Issy-les-Moulineaux et Boulogne-Billancourt. Les berges du fleuve, longtemps aménagées par des ouvrages minéraux (enrochements, perrés, palplanches ou digues bétonnées), avaient progressivement perdu une partie de leurs fonctionnalités écologiques, notamment les habitats rivulaires et les zones de reproduction pour les poissons.

Sur près de 12 km de berges gérées, l'association a engagé des travaux de génie végétal visant à restaurer les continuités écologiques, renforcer les capacités biologiques des berges et améliorer leur qualité paysagère, tout en maintenant les usages urbains. Entre 1999 et 2019, 575 m de berges et 300 m de talus ont été restaurés, principalement grâce à des techniques de fascinage de saules, de lits de plants et plançons, de restauration de ripisylves et de création de roselières.

Les premiers aménagements ont consisté à installer des fascines de saules vivants sur 100 m de berge dès 1999, complétées ensuite par des banquettes d'hélophytes (roseaux et végétation rivulaire) afin de limiter l'érosion liée au batillage, particulièrement fort sur la Seine du fait du trafic fluvial. Une roselière expérimentale créée entre 2001 et 2003, sur un linéaire de 90 m face à l'île Seguin, constitue aujourd'hui un modèle de référence toujours fonctionnel, ayant inspiré de nouveaux aménagements antibatillage. D'autres interventions ont permis la création d'un îlot végétalisé, la restauration

de talus par lits de plants et plançons ainsi que la suppression d'espèces exotiques envahissantes au profit d'essences locales adaptées aux milieux alluviaux, notamment cinq espèces de saules indigènes. Au-delà de la stabilisation physique des berges, ces aménagements contribuent à restaurer des habitats favorables à la faune aquatique et rivulaire dans un contexte urbain dense. Si aucun suivi écologique standardisé n'a été mis en place, cette action s'inscrit dans une amélioration plus large de la qualité écologique de la Seine, où la diversité piscicole est passée de quatre espèces dans les années 1970 à une trentaine aujourd'hui. Certaines espèces patrimoniales, comme le Martin-pêcheur d'Europe, profitent également des berges renaturées pour leur reproduction. Porté par une association d'insertion par les métiers de l'environnement, ce projet illustre également le potentiel des SfN pour concilier adaptation au changement climatique, restauration écologique, insertion sociale et amélioration du cadre de vie en milieu fortement urbanisé. Entre 1999 et 2019, près de 670 000 € de travaux ont été engagés avec le soutien de l'Agence de l'eau Seine Normandie et de la Région Île-de-France. Le projet souligne toutefois la nécessité d'une gouvernance coordonnée : certains ouvrages ont ponctuellement été détruits lors d'opérations d'aménagement sans concertation, rappelant la fragilité de ces continuités écologiques en ville.

Pour en savoir plus

- <https://www.genieecologique.fr/rehabilitation-des-berges-de-seine-dans-le-secteur-de-lile-saint-germain-92>



Ouvrage réalisé par l'Association Espaces en 2010 au pied du pont de Billancourt sur l'île Saint-Germain à Issy-les-Moulineaux (92). Différentes techniques issues du génie végétal ont été associées pour redynamiser la végétation et protéger durablement le talus et la berge : fascines, boutures de saules et couches de branches à rejets sous géotextile.
© Association Espaces

La restauration de la Mérantaise par le Parc naturel de la Haute Vallée de Chevreuse (78)

Affluent de l'Yvette, la Mérantaise, qui traverse la vallée de Chevreuse, a subi d'importantes transformations entre le ^{xviii}e et le ^{xix}e siècle, notamment par l'aménagement d'infrastructures hydrauliques, dont des moulins. Du milieu du ^{xx}e siècle à nos jours, l'urbanisation croissante du bassin versant, combinée à une intensification de l'agriculture sur les plateaux, a progressivement altéré le fonctionnement naturel du cours d'eau : simplification du tracé, incision du lit, déconnexion des zones humides et rupture de la continuité écologique. La tête de bassin a été artificialisée lors de la création de la ville nouvelle de Saint-Quentin-en-Yvelines. Ces transformations successives ont engendré une dégradation des habitats aquatiques et des crues significatives ainsi que des inondations récurrentes dans les communes en aval. Face à ces enjeux, le Parc naturel régional de la Haute Vallée de Chevreuse, en partenariat avec les collectivités et les gestionnaires locaux, a engagé un programme de restauration visant à retrouver un fonctionnement plus naturel du cours d'eau, tout en conciliant les enjeux écologiques, hydrauliques et patrimoniaux.

Les travaux de restauration ont porté sur un linéaire d'environ 2 km de rivière, avec une intervention structurante autour du secteur du Moulin d'Ors. Ils ont consisté à supprimer plusieurs ouvrages hydrauliques (seuils et vannages) pour rétablir la continuité écologique par rehaussement du fond du lit, à reméandrer le cours d'eau pour retrouver un tracé plus naturel et la pente de la vallée et au rétablissement de la continuité lit mineur/lit majeur. Après le reméandrage, le PNR n'a effectué ni semis ni plantations sur les nouveaux méandres, laissant la banque de graines s'exprimer naturellement à l'exception de quelques plantations d'arbres pour stabiliser les berges proches des zones de prome-

nade. Certains méandres ont été renforcés par des enrochements pour diversifier les habitats, améliorer l'oxygénation de l'eau, créer des régimes d'écoulement variés et réduire localement la profondeur. Le parc limite aujourd'hui ses interventions de gestion, à l'exception d'une zone maintenue ouverte. Cette restauration a permis de reconnecter plusieurs hectares de zones humides et de prairies inondables, renforçant ainsi la capacité naturelle du site à stocker l'eau en période de crue. En redonnant de l'espace à la rivière, le projet contribue à ralentir les écoulements et à limiter les risques d'inondation en aval, tout en améliorant la qualité des habitats.

Une attention particulière a été portée à la diversification écologique du cours d'eau, avec la création de faciès d'écoulement variés (zones calmes, radiers, mouilles) favorables à la faune aquatique. Comme pour l'Yvette, le choix a été fait de limiter les plantations, en laissant la dynamique naturelle de recolonisation s'exprimer. Cette approche a permis un retour rapide de la végétation rivulaire et des communautés biologiques associées.

Le coût global des travaux s'élève à 1,3 million d'euros, financé par plusieurs partenaires publics, dont l'Agence de l'eau Seine-Normandie, la Région Île-de-France et les collectivités locales.

Les suivis réalisés après travaux montrent une amélioration progressive de l'état écologique du cours d'eau, avec une recolonisation des habitats par les invertébrés et les poissons, ainsi qu'une meilleure fonctionnalité hydromorphologique.

Pour en savoir plus

- La restauration écologique de la continuité de la rivière Mérantaise - Lauréat VIL Biodiversité 2024 :

<https://www.youtube.com/watch?v=aTSSMMp32Z>



Restauration de la Mérantaise. © Gwendoline Grandin

Zone humide pédagogique de la Mauperchette à La Chapelle-Gauthier (77)

Située dans la vallée de l'Ancoeur, au sein d'un site naturel et patrimonial remarquable, la zone humide de la Mauperchette constitue un exemple emblématique de restauration de la continuité écologique à l'échelle locale. Le site était auparavant occupé par un étang aménagé à des fins de loisirs, dont le fonctionnement artificiel limitait les dynamiques naturelles du ru d'Ancoeur et la richesse écologique associée.

Le projet a consisté à reconnecter deux cours d'eau en supprimant des ouvrages hydrauliques de retenue existants, permettant ainsi au ru de retrouver un écoulement plus naturel et de recréer une zone humide fonctionnelle. Le reméandrage a été volontairement guidé de manière légère, laissant ensuite le cours d'eau redéfinir progressivement son tracé selon les dynamiques naturelles.

Au-delà de la restauration écologique et des enjeux associés à la biodiversité, le projet visait à améliorer le fonctionnement hydrologique du cours d'eau en gérant les masses d'eau et en limitant les inondations en amont et en aval du ru avec cette zone d'expansion de crue.

En complément d'autres aménagements et d'un entretien régulier du ru, la problématique inondation a été réduite sur ce secteur de l'Ancoeur, particulièrement sur les biens bâtis.

La restauration du ru a également permis de lever les problématiques liées à l'entretien de l'étang (envasement et comblement) complétée par la mise en place d'une gestion différenciée des espaces verts et naturels à l'échelle de la commune.

La transformation du site a soulevé des enjeux d'acceptabilité locale, liés à la disparition d'un espace de loisirs apprécié au profit d'un milieu plus naturel et moins aménagé, souvent rencontré dans la mise en place de SfN.

Ainsi, l'ensemble de cette démarche a été faite en concertation avec la commune de La-Chapelle-Gauthier, les riverains et acteurs financeurs du secteur Eau (Département 77, Aqu'Brice, AESN...).

Ce retour d'expérience souligne ainsi l'importance de l'accompagnement des habitants dans ces projets et de la valorisation pédagogique. Les zones humides, dont le site sert aussi maintenant de vitrine de communication sur les fonctions écologiques et les services rendus, restent encore insuffisamment connues auprès du public.

La gestion de la zone classée « cours d'eau » a été confiée au syndicat mixte des 4 vallées de la Brie dans le cadre de la compétence GEMAPI, garantissant une approche intégrée et pérenne de l'entretien

et du suivi du site homogène avec le reste du bassin versant.

Par ailleurs, la zone humide contribue indirectement à améliorer la qualité de l'eau par ses fonctions d'épuration naturelle.



Crue et étiage du ru d'Ancoeur. © SM4VB

Pour en savoir plus

- <http://www.lachapellegauthier77.fr/fr/actualite/185123/zone-humide-mauperchette>



Inondations aux prairies Saint-Martin à Rennes. © Laurent Riera

CONCLUSION

Les SfN constituent un levier particulièrement pertinent pour répondre simultanément à certains enjeux de la crise climatique et écologique. Mobilisables dans les milieux agricoles, forestiers, aquatiques comme urbains, elles invitent à mieux prendre en compte les liens étroits entre climat, biodiversité et sociétés humaines. Le rapport Nexus publié en 2024 par l'IPBES, consacré aux interactions entre biodiversité, eau, alimentation, santé et changement climatique, montre que les actions et politiques sectorielles cloisonnées limitent la capacité à répondre efficacement à ces enjeux. À l'inverse, les stratégies fondées sur les synergies entre ces différentes dimensions apparaissent comme les plus efficaces. Ces solutions sont d'autant plus performantes lorsqu'elles sont co-construites avec une diversité d'acteurs : scientifiques, agriculteurs, forestiers, collectivités territoriales, acteurs publics, professionnels de la santé, associations, citoyens, etc. La coopération entre ces parties prenantes favorise l'acceptabilité des projets, renforce leur légitimité et encourage le co-apprentissage, en particulier lorsque les intérêts, les valeurs ou les objectifs divergent. À l'inverse, les démarches élaborées sans les acteurs concernés peinent souvent à susciter l'adhésion et peuvent se traduire par de faibles taux d'adoption. Favoriser cette co-construction nécessitera de renforcer les espaces de dialogue, d'information, de formation sur les SfN et les enjeux qui leur sont associés.

Pour autant, les tentatives de transformation des SfN en normes standardisées appellent à la prudence. Bien que ce concept ait été développé et largement diffusé par de grandes organisations internationales et institutions publiques, son efficacité repose avant tout sur sa capacité à s'adapter à la diversité des contextes locaux. Au-delà des dimensions écologiques, cette adaptation implique de prendre en compte les réalités sociales, mais aussi les connaissances et savoir-faire développés par les acteurs de terrain. Les SfN gagneraient ainsi à être envisagées non seulement comme un cadre

d'action diffusé de manière descendante, mais aussi comme une démarche capable de s'enrichir de manière ascendante grâce aux expériences locales. Cette articulation entre expertise scientifique et connaissances de terrain apparaît essentielle pour éviter une standardisation excessive des pratiques et mieux répondre à la diversité des situations rencontrées.

Enfin, si les SfN constituent un levier important pour faire face aux crises environnementales, leur déploiement ne peut être dissocié d'une transformation plus large des modes d'aménagement, de production et de consommation à l'origine des déséquilibres actuels. Leur généralisation nécessitera des moyens humains, techniques et financiers adaptés, mais également des évolutions plus structurelles permettant de mieux aligner les dynamiques économiques avec les objectifs environnementaux. Les SfN ne sauraient ainsi se substituer aux changements profonds qu'impose la transition écologique ; elles constituent au contraire l'un des outils permettant de l'accompagner et de l'accélérer.

**« SEULE LA RÉUSSITE
DE L'ATTÉNUATION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE
REND L'ADAPTATION POSSIBLE »**

**Magali Reghezza-Zitt, géographe,
maître de conférences à l'École normale supérieure
(PSL), et membre du Haut Conseil pour le climat**

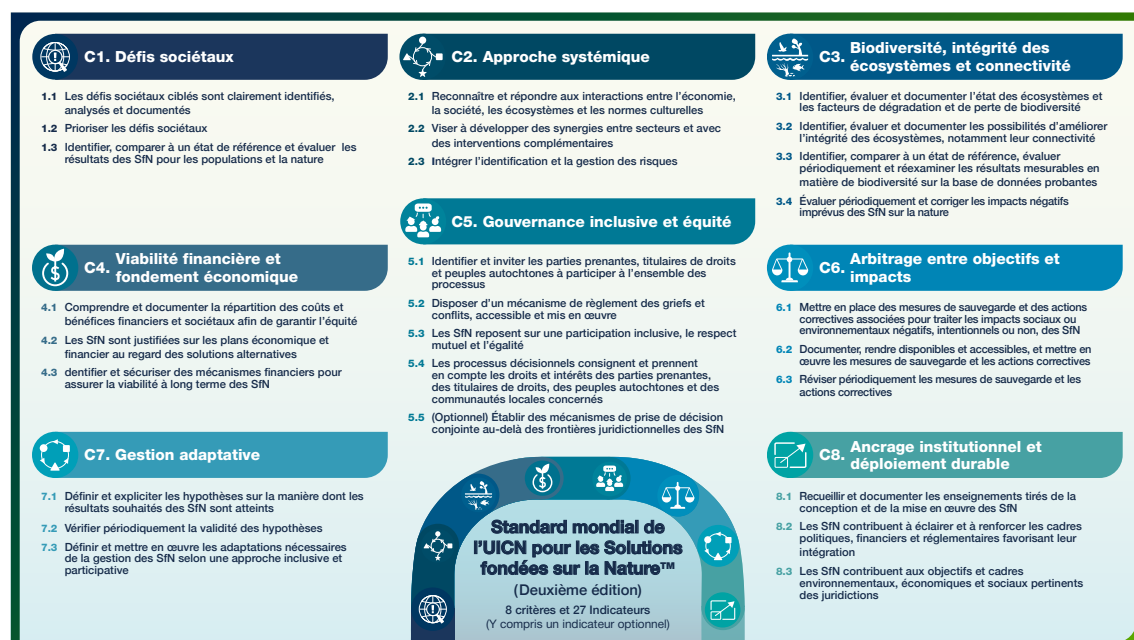
ANNEXES

MÉTHODOLOGIQUES

ANNEXE 1 : STANDARD MONDIAL DE L'UICN

En 2026, l'UICN publie la seconde édition du Standard mondial de l'UICN pour les Solutions fondées sur la Nature (*IUCN Global Standard for Nature-*

based Solutions, 2020). Il constitue aujourd'hui la référence internationale pour définir, concevoir, mettre en œuvre et évaluer une Solution fondée sur la Nature à travers 8 critères et 27 indicateurs.



ANNEXE 2 : GRILLE D'AUTO-ÉVALUATION POUR UN PROJET DE SFN

PROPOSITION D'UNE GRILLE D'ANALYSE AVANT TOUT PROJET AYANT POUR AMBITION D'ÊTRE UNE SFN

1	DÉFI TERRITORIAL	Le projet répond-il à un enjeu clairement identifié (inondation, îlot de chaleur, érosion de la biodiversité, sécheresse, qualité de l'eau... voire plusieurs de ces enjeux à la fois) ?
2	DIAGNOSTIC ÉCOLOGIQUE ET CLIMATIQUE	L'état initial du site et des milieux a-t-il été caractérisé ? Les risques et vulnérabilités associés au climat futur sont-ils identifiés ?
3	GAIN NET POUR LA BIODIVERSITÉ	Le projet améliore-t-il l'état des habitats, des continuités écologiques ou l'état de conservation d'une ou plusieurs espèces ?
4	CONTRIBUTION À L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE	Le projet réduit-il une vulnérabilité climatique actuelle ou future ?
5	CONTRIBUTION À L'ATTÉNUATION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE	Le projet favorise-t-il le stockage de carbone ou la réduction des émissions ?
6	CO-BÉNÉFICES	Le projet apporte-t-il plusieurs bénéfices simultanés (eau, climat, biodiversité, paysage, santé, cadre de vie...) ?
7	ÉCHELLE D'ACTION	Le projet a-t-il été réfléchi à différentes échelles en termes d'impacts, du local au régional (site, quartier, commune, exploitation, bassin versant...) ?
8	GOUVERNANCE ET CONCERTATION	Les parties prenantes ont-elles été associées à la conception du projet ? (acteurs institutionnels, usagers, habitants, associations, gestionnaires, scientifiques...)
9	ACCEPTABILITÉ SOCIALE	Les usages et besoins locaux ont-ils été pris en compte ?
10	FAISABILITÉ ÉCONOMIQUE	Les coûts, outils de financements et budget d'entretien futur ont-ils été pris en compte ?
11	GESTION DES RISQUES ET AMÉNITÉS NÉGATIVES	Les éventuels impacts négatifs ont-ils été identifiés et limités ?
12	SUIVI ET ÉVALUATION	Des indicateurs de suivi sont-ils prévus ?
13	PÉRENNITÉ DU PROJET	Les modalités de gestion à long terme sont-elles définies ?

Pour aller plus loin, découvrez la boîte à outils de l'outil en ligne de l'OFB :

<https://fr.zone-secure.net/170194/2089162/#page=1>



© Gilles Lecuir

BIBLIOGRAPHIE

- A**
- Abbadie, L., Bastien-Ventura, C., Frascaria-Lacoste, N., 2015. Bilan et enjeux du programme interdisciplinaire Ingeco du CNRS (2007-2011) : un tournant pour l'ingénierie écologique en France ? *Nat. Sci. Soc.* 23, 389–396. <https://doi.org/10.1051/nss/2015064>
 - Acreman, M., Holden, J., 2013. How Wetlands Affect Floods. *Wetlands* 33, 773–786. <https://doi.org/10.1007/s13157-013-0473-2>
 - ADEME (Ed.), 2021. Forêts et usages du bois dans l'atténuation du changement climatique.
 - ADEME, OFB, 2024. S'adapter au changement climatique dans la filière sylvicole avec les Solutions d'adaptation fondées sur la Nature (SafN).
 - Aghaloo, K., Sharifi, A., Habibzadeh, N., Ali, T., Chiu, Y.-R., 2024. How nature-based solutions can enhance urban resilience to flooding and climate change and provide other co-benefits: A systematic review and taxonomy. *Urban Forestry & Urban Greening* 95, 128320. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128320>
 - Amossé, J., Lerey, S., Salmon, D., Carat, D., 2024. Déclinaison de l'outil Sesame (Services ÉcoSystémiques rendus par les Arbres, Modulés selon l'Essence) sur le territoire Séquano-Dionysien.
 - Apfelbeck, B., Snep, R.P.H., Hauck, T.E., Ferguson, J., Holy, M., Jakoby, C., Scott MacIvor, J., Schär, L., Taylor, M., Weisser, W.W., 2020. Designing wildlife-inclusive cities that support human-animal co-existence. *Landscape and Urban Planning* 200, 103817. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103817>
 - APUR, 2012. Les Îlots de Chaleur à Paris, cahier #1.
 - Arnaudis, J., 2018. Du plancton près de chez vous pour une ville intelligente (et respirable).
 - Askafor, n.d. Référentiel SMCC - Objectifs et principes de la sylviculture mélangée à couvert continu.
 - Auvert, S., Filoche, S., Rambaud, M., Beylot, A., Hendoux, F., 2011. Liste rouge régionale de la flore vasculaire d'Île-de-France. Conservatoire botanique national du Bassin parisien/Natureparif, Paris.
 - forestières. INRAE & ECOFOR.
 - Barot, S., Lata, J.-C., Lacroix, G., 2012. Meeting the relational challenge of ecological engineering within ecological sciences. *Ecological Engineering* 45, 13–23. <https://doi.org/10.1016/j.eco-leng.2011.04.006>
 - Barra, M., 2020. Gestion des eaux pluviales et biodiversité. Agence Régionale de la Biodiversité en Île-de-France / Institut Paris Region, Paris.
 - Barra, M., Johan, H., 2021. Écologie des toitures végétalisées : synthèse de l'étude GROOVES, green roofs verified ecosystem services, 2017-2019. l'Institut Paris Region, Paris.
 - Barraud, S., Bertrand-Krajewski, J.-L., 2022. Quels polluants trouve-t-on dans les eaux pluviales en milieu urbain ? Gestion des eaux pluviales en ville – 20 ans de recherche au service de l'action. GRAIE.
 - Beillouin, D., Ben-Ari, T., Malézieux, E., Seufert, V., Makowski, D., 2021. Positive but variable effects of crop diversification on biodiversity and ecosystem services. *Global Change Biology* 27, 4697–4710. <https://doi.org/10.1111/gcb.15747>
 - Belletti, B., Garcia De Leaniz, C., Jones, J., Bizzi, S., Börger, L., Segura, G., Castelletti, A., Van De Bund, W., Aarestrup, K., Barry, J., Belka, K., Berkhuyzen, A., Birnie-Gauvin, K., Bussettini, M., Carolli, M., Consuegra, S., Dopico, E., Feierfeil, T., Fernández, S., Fernandez Garrido, P., Garcia-Vazquez, E., Garrido, S., Giannico, G., Gough, P., Jepsen, N., Jones, P.E., Kemp, P., Kerr, J., King, J., Łapińska, M., Lázaro, G., Lucas, M.C., Marcello, L., Martin, P., McGinnity, P., O'Hanley, J., Olivo Del Amo, R., Parasiewicz, P., Pusch, M., Rincon, G., Rodriguez, C., Royte, J., Schneider, C.T., Tummers, J.S., Vallesi, S., Vowles, A., Verspoor, E., Wanningen, H., Wantzen, K.M., Wildman, L., Zalewski, M., 2020. More than one million barriers fragment Europe's rivers. *Nature* 588, 436–441. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-3005-2>
 - BERNARD Marianne, DALOZ Aurélien, JUNG Delphine, OMNES François, 2023. L'essentiel sur la haie.
 - Bertrand, R., Morin, X., 2026. Biodiversity Insurance of Forest Productivity Has Strengthened Under Recent Climate Change. *Global Change Biology* 32, e70760. <https://doi.org/10.1111/gcb.70760>
 - Best, L., Schwarz, N., Obergh, D., Teuling, A.J., Van Kanten, R., Willemen, L., 2023. Urban green spaces and variation in cooling in the humid tropics: The case of Paramaribo. *Urban Forestry & Urban*
- B**
- Bacot, L., Barraud, S., Lipeme Kouyi, G., 2022. Gestion des eaux pluviales en ville - 20 de recherche au service de l'action.
 - Badeau, V.V., Dupouey, J.-L., Cluzeau, C., Drapier, J., Bas, C.L., 2004. Modélisation et cartographie de l'aire climatique potentielle des grandes essences

- Greening 89, 128111. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.128111>
- Beugnon, R., Le Guyader, N., Milcu, A., Lenoir, J., Puissant, J., Morin, X., Hättenschwiler, S., 2024. Microclimate modulation: An overlooked mechanism influencing the impact of plant diversity on ecosystem functioning. *Global Change Biology* 30, e17214. <https://doi.org/10.1111/gcb.17214>
 - Blaix, C., Dumont, B., Bloor, J.M.G., Zagaria, C., Fleurance, G., Joly, F., Huguenin-Elie, O., 2026. Agroecological interventions increase biodiversity and the potential for climate change mitigation in Europe. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 395, 109938. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2025.109938>
 - Boé, J., Radojevic, M., Bonnet, R., Dayon, G., 2018. Scénarios sécheresses sur le bassin Seine-Normandie. DRIEAT.
 - Bouget, C., Gosselin, M., Laroche, F., 2020. Changement climatique : la biodiversité forestière à la croisée des enjeux de conservation et d'atténuation : Sciences Eaux & Territoires Numéro 33, 84–89. <https://doi.org/10.3917/set.033.0084>
 - Bourdin, L., Stroffek, S., Bouni, C., Narcy, J.-B., 2011. Restauration hydromorphologique et territoires : concevoir pour négocier.
 - Bourne, A., Muller, H., De Villiers, A., Alam, M., Hole, D., 2017. Assessing the efficiency and effectiveness of rangeland restoration in Namaqualand, South Africa. *Plant Ecol* 218, 7–22. <https://doi.org/10.1007/s11258-016-0644-3>
 - Broadmeadow, S., Nisbet, T.R., 2004. The effects of riparian forest management on the freshwater environment: a literature review of best management practice. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 8, 286–305. <https://doi.org/10.5194/hess-8-286-2004>
 - Bruxelles environnement, 2025. Améliorer la ville : des solutions basées sur la nature.
 - Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P.W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W.W.L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., Jotzo, F., Krug, T., Lasco, R., Lee, Y.-Y., Masson-Delmotte, V., Meinshausen, M., Mintenbeck, K., Mokssit, A., Otto, F.E.L., Pathak, M., Pirani, A., Poloczanska, E., Pörtner, H.-O., Revi, A., Roberts, D.C., Roy, J., Ruane, A.C., Skea, J., Shukla, P.R., Slade, R., Slangen, A., Sokona, Y., Sörensson, A.A., Tignor, M., Van Vuuren, D., Wei, Y.-M., Winkler, H., Zhai, P., Zommers, Z., Hourcade, J.-C., Johnson, F.X., Pachauri, S., Simpson, N.P., Singh, C., Thomas, A., Totin, E., Arias, P., Bustamante, M., Elgizouli, I., Flato, G., Howden, M., Méndez-Vallejo, C., Pereira, J.J., Pichs-Madruga, R., Rose, S.K., Saheb, Y., Sánchez Rodríguez, R., Ürgé-Vorsatz, D., Xiao, C., Yassaa, N., Alegría, A., Armour, K., Bednar-Friedl, B., Blok, K., Cissé, G., Dentener, F., Eriksen, S., Fischer, E., Garner, G., Guivarch, C., Haasnoot, M., Hansen, G., Hauser, M., Hawkins, E., Hermans, T., Kopp, R., Leprince-Ringuet, N., Lewis, J., Ley, D., Ludden, C., Niamir, L., Nicholls, Z., Some, S., Szopa, S., Trewin, B., Van Der Wijst, K.-I., Winter, G., Witting, M., Birt, A., Ha, M., Romero, J., Kim, J., Haites, E.F., Jung, Y., Stavins, R., Birt, A., Ha, M., Orendain, D.J.A., Ignon, L., Park, S., Park, Y., Reisinger, A., Cammaramo, D., Fischlin, A., Fuglestedt, J.S., Hansen, G., Ludden, C., Masson-Delmotte, V., Matthews, J.B.R., Mintenbeck, K., Pirani, A., Poloczanska, E., Leprince-Ringuet, N., Péan, C., 2023b. IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
 - Cariñanos, P., Casares-Porcel, M., Díaz De La Guardia, C., Aira, M.J., Belmonte, J., Boi, M., Elvira-Rendueles, B., De Linares, C., Fernández-Rodríguez, S., Maya-Manzano, J.M., Pérez-Badía, R., Rodríguez-de La Cruz, D., Rodríguez-Rajo, F.J., Rojo-Úbeda, J., Romero-Zarco, C., Sánchez-Reyes, E., Sánchez-Sánchez, J., Tormo-Molina, R., Vega Maray, A.M., 2017. Assessing allergenicity in urban parks: A nature-based solution to reduce the impact on public health. *Environmental Research* 155, 219–227. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.02.015>
 - Cassette, L., 2025. Reportage Forêt de Fontainebleau : le chêne, « formidable compétiteur » face réchauffement climatique.
 - CEPRI, 2025. Solutions fondées sur la Nature pour l'adaptation au changement climatique afin de prévenir les risques d'inondation.
 - CEPRI, 2021. Les inondations par ruissellements, suivez le guide !
 - Chautems, M., Cornec, G., 2025. Vers une agriculture régénératrice - Clés de réussite et leviers pour maîtriser les risques économiques de la transition. AXA Climate.
 - Cherel, E., Cavallin, P., Debeir, L., Moncorps, S., 2023. La libre évolution, une trajectoire de gestion des espaces naturels : Accompagner les processus naturels dans leur adaptation aux changements globaux.
 - Chocat, B., Brelot, E., groupe de travail « eaux pluviales et aménagement » du Graie, 2022. Notes sur
- C** • Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P.W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W.W.L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., Jotzo, F., Krug, T., Lasco, R., Lee, Y.-Y., Masson-Delmotte, V., Meinshausen, M., Mintenbeck, K., Mokssit, A., Otto, F.E.L., Pathak, M., Pirani, A., Poloczanska, E., Pörtner, H.-O., Revi, A., Roberts, D.C., Roy, J., Ruane, A.C., Skea, J., Shukla, P.R., Slade, R., Slangen, A., Sokona, Y., Sörensson, A.A., Tignor, M., Van Vuuren, D., Wei, Y.-M., Winkler, H., Zhai, P., Zommers, Z., Hourcade, J.-C., Johnson, F.X., Pachauri, S., Simpson, N.P., Singh, C., Thomas, A., Totin, E., Arias, P., Bustamante, M., Elgizouli, I.,

les techniques alternatives.

- Chuine, I., Ciais, P., Cramer, W., Laskar, J., 2023. Les forêts françaises face au changement climatique - Rapport du Comité des sciences de l'environnement de l'Académie des sciences et points de vue d'Académiciens de l'Académie d'Agriculture de France.
 - Churkina, G., Kuik, F., Bonn, B., Lauer, A., Grote, R., Tomiak, K., Butler, T.M., 2017. Effect of VOC Emissions from Vegetation on Air Quality in Berlin during a Heatwave. *Environ. Sci. Technol.* 51, 6120–6130. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b06514>
 - Ciais, P., Zhou, C., Schneider, P., Schwartz, M., Besic, N., Vega, C., Bontemps, J.-D., 2025. An outlook on the Rapid Decline of Carbon Sequestration in French Forests and associated reporting needs. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2505.11512>
 - Cisowski, F., Dallaporta, B., Gentil-Sergent, C., Lacarde, É., Vidal, R., Sautereau, N., 2025. Recueil des synthèses - Quantification des externalités de l'agriculture Biologique.
 - CNPF, 2023. Schéma régional de gestion sylvicole Île-de-France. Centre National de la Propriété Forestière.
 - Comité de bassin Seine-Normandie, 2023. Stratégie d'adaptation au changement climatique sur le bassin Seine-Normandie.
 - Cour des comptes, 2025. Synthèse du rapport public thématique sur la transition écologique.
 - Curt, T., Rigolot, É., 2020. Prévenir les risques d'incendies de forêt dans un contexte de changement global : Sciences Eaux & Territoires Numéro 33, 50–55. <https://doi.org/10.3917/set.033.0050>
- D**
- Dadson, S.J., Hall, J.W., Murgatroyd, A., Acreman, M., Bates, P., Beven, K., Heathwaite, L., Holden, J., Holman, I.P., Lane, S.N., O'Connell, E., Penning-Rowsell, E., Reynard, N., Sear, D., Thorne, C., Wilby, R., 2017. A restatement of the natural science evidence concerning catchment-based 'natural' flood management in the UK. *Proc. R. Soc. A.* 473, 20160706. <https://doi.org/10.1098/rspa.2016.0706>
 - Dagois, R., Dépinoy, M., Hérin, J.-J., Brelot, E., Paldacci, F., Moulin, N., 2025. Fonctions écologiques des noues urbaines. Retours d'expérience. Plante & Cité, Angers.
 - De Frenne, P., Lenoir, J., Luoto, M., Scheffers, B.R., Zellweger, F., Aalto, J., Ashcroft, M.B., Christiansen, D.M., Decocq, G., De Pauw, K., Govaert, S., Greiser, C., Gril, E., Hampe, A., Jucker, T., Klinges, D.H., Koelemeijer, I.A., Lembrechts, J.J., Marrec, R., Meeussen, C., Ogée, J., Tyystjärvi, V., Vangansbeke, P., Hylander, K., 2021. Forest microclimates and climate change: Importance, drivers and future research agenda. *Global Change Biology* 27, 2279–2297. <https://doi.org/10.1111/gcb.15569>
 - Deboeuf de Los Ríos, G., Barra, M., Grandin, G., Bauquet, N., 2022. Renaturer les villes: méthode, exemples et préconisations. Regreen nature-based solutions l'Institut Paris Region-ARB, Agence régionale de la biodiversité, Paris.
 - Delfanne, F., Duraquet, C., Gagnaire, E., Koch, S., 2017. Le verdissement des pieds de façades - Préconisations pour favoriser le développement du végétal le long des bâtiments dans la métropole lilloise (No. Cahier n°5). L'Atelier des espaces publics de la métropole lilloise.
 - Dépoues, V., Dolques, G., Nicol, M., 2022a. Anticiper les effets d'un réchauffement de +4 °C: quels coûts de l'adaptation ? (I4CE).
 - Dépoues, V., Dolques, G., Nicol, M., 2022b. Se donner les moyens de s'adapter aux conséquences du changement climatique en France: de combien parle-t-on ? I4CE.
 - Dequeker, E., Kalfon, M., Beaumont, D., Ingarao, O., AcQuandallehille, A., 2026. Investir dans l'adaptation au changement climatique: réflexions et pistes d'actions, Chaire d'Economie urbaine de l'ESSEC. ed. Banque des Territoires.
 - Dewulf, L., Houard, X., 2016. Liste rouge régionale des Rhopalocères et Zygènes d'Île-de-France. Office pour les insectes et leur environnement – Association des Lépidoptéristes de France, Paris.
 - Didier, M., Menoli, S., Evette, A., Frossard, P.-A., Vivier, A., Lessem, I., Office Français De La Biodiversité, 2025. GENITEC - Solutions Naturelles sans Structures Rigides (guide technique). <https://doi.org/10.57745/SINHK1>
 - Direction Régionale Interdépartementale de l'Agriculture, de l'Alimentation et de la Forêt, Région Île-de-France, 2020. Programme régional de la forêt et du bois d'Île-de-France 2019-2029.
 - Du Bus de Warnaffe, G., 2023. Pour une gestion écologique des forêts: récolter du bois dans une forêt vivante, Techniques de pro. Terre vivante, Mens.
 - Direction régionale et interdépartementale de l'Environnement, de l'Aménagement et des Transports d'Île-de-France, 2025. Connaître les effets du changement climatique en Île-de-France - Planification écologique COP régionale volet adaptation.
 - Duffaut, C., Versini, P.-A., Frascaria-Lacoste, N., 2022. Are really Nature-Based Solutions sustainable solutions to design future cities in a context of global change? Discussion about the vulnerability of these new solutions and their probable unsustainable implementation. *Science of The Total Environment* 853, 158535. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158535>

- E**
- EFSE, CGEDD, 2019. La séquestration du carbone par les écosystèmes français, La Documentation Française. ed, Théma Analyse.
 - Ellis, C.J., 2020. Microclimatic refugia in riparian woodland: A climate change adaptation strategy. *Forest Ecology and Management* 462, 118006. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118006>
 - Erwan, C., Garrigou, S., Huart, G., 2022. Vulnérabilités de l'Île-de-France aux effets du changement climatique. L'Institut Paris Region.
 - Esperon-Rodriguez, M., Tjoelker, M.G., Lenoir, J., Baumgartner, J.B., Beaumont, L.J., Nipperess, D.A., Power, S.A., Richard, B., Rymer, P.D., Gallagher, R.V., 2022. Climate change increases global risk to urban forests. *Nat. Clim. Chang.* 12, 950–955. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01465-8>
 - Eurométropole de Strasbourg, 2022. Guide de végétalisation : façades, toitures, pieds de murs, trottoirs et pieds d'arbres.
 - European Environment Agency (Ed.), 2018. European waters: assessment of status and pressures 2018, EEA Report. Publications Office of the European Union, Luxembourg. <https://doi.org/10.2800/303664>
 - Evans, C.D., Peacock, M., Baird, A.J., Artz, R.R.E., Burden, A., Callaghan, N., Chapman, P.J., Cooper, H.M., Coyle, M., Craig, E., Cumming, A., Dixon, S., Gauci, V., Grayson, R.P., Helfter, C., Heppell, C.M., Holden, J., Jones, D.L., Kaduk, J., Levy, P., Matthews, R., McNamara, N.P., Misselbrook, T., Oakley, S., Page, S.E., Rayment, M., Ridley, L.M., Stanley, K.M., Williamson, J.L., Worrall, F., Morrison, R., 2021. Overriding water table control on managed peatland greenhouse gas emissions. *Nature* 593, 548–552. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03523-1>
- F**
- Faytre, L., Carrage, S., 2026. Populations et logements face aux crues en Île-de-France - Analyse des enjeux en 2025. L'Institut Paris Region.
 - Fischer, C., Roscher, C., Jensen, B., Eisenhauer, N., Baade, J., Attinger, S., Scheu, S., Weisser, W.W., Schumacher, J., Hildebrandt, A., 2014. How Do Earthworms, Soil Texture and Plant Composition Affect Infiltration along an Experimental Plant Diversity Gradient in Grassland? *PLoS ONE* 9, e98987. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0098987>
 - France Assureurs, 2022. Rapport annuel 2022 (Rapport annuel).
 - Frascaria-Lacoste, N., Versini, P.-A., Duffaut, C., Fernández-Manjarrés, J., 2025. La restauration socio-écologique, une transposition concrète du concept normatif des solutions fondées sur la nature ? *Comptes Rendus. Biologies* 348, 55–69. <https://doi.org/10.5802/crbiol.175>
- G**
- Frossard, P.-A., Evette, A., 2009. Le génie végétal pour la lutte contre l'érosion en rivière : une tradition millénaire en constante évolution. Numéro Spécial : Ecologie de la restauration et ingénierie écologique.
 - Fulthorpe, R., MacIvor, J.S., Jia, P., Yasui, S.-L.E., 2018. The Green Roof Microbiome: Improving Plant Survival for Ecosystem Service Delivery. *Front. Ecol. Evol.* 6, 5. <https://doi.org/10.3389/fevo.2018.00005>
 - Gauthray-Guyénet, V., Royer-Tardif, S., Yusufu Kachaka, E., Grenier-Héon, D., Boulfroy, E., 2022. Impacts des arbres en milieu urbain sur la qualité de l'air, la séquestration du carbone et la captation des eaux de pluie.
 - Gérard, M., Vanderplanck, M., Wood, T., Michez, D., 2020. Global warming and plant–pollinator mismatches. *Emerging Topics in Life Sciences* 4, 77–86. <https://doi.org/10.1042/ETLS20190139>
 - González-García, A., Palomo, I., Codomo, A., Rodeghiero, M., Dubo, T., Vallet, A., Lavorel, S., 2025. Co-benefits of nature-based solutions exceed the costs of implementation. *Cell Reports Sustainability* 2, 100336. <https://doi.org/10.1016/j.crsus.2025.100336>
 - Grandin, G., 2026. Vie et devenir des friches franciliennes : dynamiques et enjeux écologiques, Notes Rapides. Agence Régionale de la Biodiversité en Île-de-France / Institut Paris Region.
 - Grill, G., Lehner, B., Thieme, M., Geenen, B., Tickner, D., Antonelli, F., Babu, S., Borrelli, P., Cheng, L., Crochetiere, H., Ehalt Macedo, H., Filgueiras, R., Goichot, M., Higgins, J., Hogan, Z., Lip, B., McClain, M.E., Meng, J., Mulligan, M., Nilsson, C., Olden, J.D., Opperman, J.J., Petry, P., Reidy Liermann, C., Sáenz, L., Salinas-Rodríguez, S., Schelle, P., Schmitt, R.J.P., Snider, J., Tan, F., Tockner, K., Valdujo, P.H., Van Soesbergen, A., Zarfl, C., 2019. Mapping the world's free-flowing rivers. *Nature* 569, 215–221. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1111-9>
 - Gurnell, A.M., Grabowski, R.C., 2016. Vegetation–Hydrogeomorphology Interactions in a Low-Energy, Human-Impacted River. *River Research & Apps* 32, 202–215. <https://doi.org/10.1002/rra.2922>
- H**
- Houeix, K., Lecuir, G., Laïlle, P., Dépinoy, M., 2025. Notes Rapides. L'Institut Paris Region/Agence Régionale de la biodiversité d'Île-de-France.

- I**
- IGN, AMF, Fédération nationale des communes forestières (Eds.), 2024. Les obligations légales de débroussaillage - Foire aux questions à l'attention des propriétaires, à l'attention des maires.
 - INRA (Ed.), 2019. Sotcker du carbone dans les sols français - Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ?
 - Intergovernmental Panel On Climate Change (Ippc) (Ed.), 2023. Summary for Policymakers, in: Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change. Cambridge University Press, pp. 3-48. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.001>
 - IPCC, 2019. Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.
 - IUCN, International Union for Conservation of Nature, 2020. IUCN Global Standard for Nature-based Solutions: a user-friendly framework for the verification, design and scaling up of NbS: first edition, 1st ed. IUCN, International Union for Conservation of Nature. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2020.08.en>
- J**
- Jactel, H., Moreira, X., Castagneyrol, B., 2021. Tree Diversity and Forest Resistance to Insect Pests: Patterns, Mechanisms, and Prospects. *Annu. Rev. Entomol.* 66, 277-296. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-041720-075234>
 - Johan (coord.), H., Houard, X., 2021. Liste rouge régionale des orthoptéroïdes d'Île-de-France : criquets, grillons, sauterelles, mante religieuse et phasme gaulois. l'Institut Paris région, Paris.
 - Johan, H., Agnoux, S., Barra, M., Dewulf, L., Houeix, K., Huart, G., Mondy, C.P., Renault, O., Vallet, J., Lois, G., 2026. Etat de santé de la biodiversité en Île-de-France-L'influence du changement climatique.
 - Josephson, A., Su, R.G., Collins, G., Jacobs, K., 2024. The Economics of Climate Adaptation: An Assessment. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2411.16893>
- K**
- Knapp, S., MacIvor, J.S., 2023. Nature-based solutions and biodiversity: synergies, trade-offs, and ways forward, in: McPhearson, T., Kabisch, N., Frantzeskaki, N. (Eds.), *Nature-Based Solutions for Cities*. Edward Elgar Publishing, pp. 82-103. <https://doi.org/10.4337/9781800376762.00014>
- L**
- Laille, P., Jean, R., Dépinoy, M., 2023. « Micro-forêts » en France métropolitaine : une diversité de projets, d'acteurs et de pratiques – Synthèse de l'appel à signalements 2022. Plante & Cité, Angers.
 - Larbodièrre, L., Davies, J., Schmidt, R., Magero, C., Vidal, A., Aroyo Schnell, A., Bucher, P., Maginnis, S., Cox, N., Hasinger, O., Abhilash, P.C., Conner, N., Westerberg, V., Costa, L., 2020. Notre terrain d'entente: rétablir la santé des terres pour une agriculture durable. IUCN, International Union for Conservation of Nature. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2020.10.fr>
 - Lauwaet, D., Vranckx, S., Dens, S., Hawer, T., 2020. Impact van Nature Based Solutions in het Brussels hoofdstedelijk gewest.
 - Lecomte, E., 2017. Et pour la capture du CO₂, c'est Morris ! Sciences et avenir.
 - Lettre de la part de 800 scientifiques au Parlement européen concernant le bois-énergie, 2018.
 - Leturcq, P., 2020. Empreinte carbone de la forêt et de l'utilisation de son bois. *Rev. For. Fr* 72, 525-537. <https://doi.org/10.20870/revforfr.2020.5348>
 - Lewis, S.L., Wheeler, C.E., Mitchard, E.T.A., Koch, A., 2019. Restoring natural forests is the best way to remove atmospheric carbon. *Nature* 568, 25-28. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-01026-8>
 - Li, H., Zhao, Y., Wang, C., Ürge-Vorsatz, D., Carmeliet, J., Bardhan, R., 2024. Cooling efficacy of trees across cities is determined by background climate, urban morphology, and tree trait. *Commun Earth Environ* 5, 754. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01908-4>
 - Lindsey, P., Bassuk, N., 1991. Specifying Soil Volumes to Meet the Water Needs of Mature Urban Street Trees and Trees in Containers. *AUF* 17, 141-149. <https://doi.org/10.48044/jauf.1991.040>
 - L'Institut Paris Region, Région Île-de-France (Eds.), 2025. Schéma directeur de la Région Île-de-France - Environnemental (DRIFE-E) « Île-de-France 2040 un nouvel équilibre ». Projet d'aménagement régional.
 - Luan, J., Li, S., Liu, S., Wang, Y., Ding, L., Lu, H., Chen, L., Zhang, J., Zhou, W., Han, S., Zhang, Y., Hättenschwiler, S., 2024. Biodiversity mitigates drought effects in the decomposer system across biomes. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 121, e2313334121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2313334121>
 - Luyssaert, S., Schulze, E.-D., Börner, A., Knohl, A., Hessenmöller, D., Law, B.E., Ciais, P., Grace, J., 2008. Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature* 455, 213-215. <https://doi.org/10.1038/nature07276>

- M**
- Maddyne, Aquagir, Banque des Territoires, 2024. Panorama de l'eau - les Solutions fondées sur la Nature.
 - Maison, A., Jaumouillé, N., Sermondadaz, S., 2024. En ville, les arbres ont des effets mitigés sur la qualité de l'air. <https://doi.org/10.64628/AAK.dqu3trhn3>
 - Marquet, S., Feix, I., Thibier, E., 2018. Aménager avec la nature en ville, des idées préconçues à la caractérisation des effets environnementaux, sanitaires et économiques.
 - Martin, J.G.C., Scolobig, A., Linnerooth-Bayer, J., Liu, W., Balsiger, J., 2021. Catalyzing Innovation: Governance Enablers of Nature-Based Solutions. *Sustainability* 13, 1971. <https://doi.org/10.3390/su13041971>
 - Masselot, P., Mistry, M., Vanoli, J., Schneider, R., lungman, T., Garcia-Leon, D., Ciscar, J.-C., Feyen, L., Orru, H., Urban, A., Breitner, S., Huber, V., Schneider, A., Samoli, E., Stafoggia, M., de'Donato, F., Rao, S., Armstrong, B., Nieuwenhuijsen, M., Vicedo-Cabrera, A.M., Gasparrini, A., Achilleos, S., Kyselý, J., Indermitte, E., Jaakkola, J.J.K., Rytí, N., Pascal, M., Katsouyanni, K., Analitis, A., Goodman, P., Zeka, A., Michelozzi, P., Houthuijs, D., Ameling, C., Rao, S., Das Neves Pereira Da Silva, S., Madureira, J., Holobaca, I.-H., Tobias, A., Íñiguez, C., Forsberg, B., Åström, C., Ragettli, M.S., Analitis, A., Katsouyanni, K., Surname, F.N., Zafeiratou, S., Vazquez Fernandez, L., Monteiro, A., Rai, M., Zhang, S., Aunan, K., 2023. Excess mortality attributed to heat and cold: a health impact assessment study in 854 cities in Europe. *The Lancet Planetary Health* 7, e271–e281. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(23\)00023-2](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(23)00023-2)
 - Mayer, P.M., Reynolds, S.K., McCutchen, M.D., Canfield, T.J., 2007. Meta-Analysis of Nitrogen Removal in Riparian Buffers. *J of Env Quality* 36, 1172–1180. <https://doi.org/10.2134/jeq2006.0462>
 - McElwee, P.D., Harrison, P.A., van Huysen, T.L., Alonso Roldán, V., Barrios, E., Dasgupta, P., DeClerck, F., Harmáčková, Z., Hayman, D.T.S., Herrero, M., Kumar, R., Ley, D., Mangalagiu, D., McFarlane, R.A., Paukert, C., Pengue, W.A., Prist, P.R., Ricketts, T.H., Rounsevell, M.D.A., Saito, O., Selomane, O., Seppelt, R., Singh, P.K., Sitas, N., Smith, P., Vause, J., Molua, E.L., Zambrana-Torrel, C., Obura, D., 2025. IPBES Nexus Assessment: Summary for Policymakers. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.13850289>
 - Medina, S., Adélaïde, L., Wagner, V., de Crouy Chanel, P., Real, E., Colette, A., Couvidat, F., Bessagnet, B., Durou, A., Host, S., Hulin, M., Corso, M., Pascal, M., 2021. Impact de pollution de l'air ambiant sur la mortalité en France métropolitaine. Réduction en lien avec le confinement du printemps 2020 et nouvelles données sur le poids total pour la période 2016-2019.
 - Michalet, R., Carcaillet, C., Delerue, F., Domec, J., Lenoir, J., 2023. Assisted migration in a warmer and drier climate: less climate buffering capacity, less facilitation and more fires at temperate latitudes? *Oikos* e10248. <https://doi.org/10.1111/oik.10248>
 - Ministère de la Transition écologique, de la biodiversité, de la forêt, de la mer et de la pêche, 2025. Plan d'action pour la préservation des sols forestiers.
 - Ministère de la Transition écologique, de l'Énergie, du Climat et de la Prévention des risques, 2025. Plan national d'adaptation au changement climatique, Préparer la France à +4°C.
 - Ministère de l'Agriculture et de la souveraineté alimentaire, 2025. Bilan de la santé des forêts en 2024.
 - Molineux, C.J., Gange, A.C., Newport, D.J., 2017. Using soil microbial inoculations to enhance substrate performance on extensive green roofs. *Science of The Total Environment* 580, 846–856. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.031>
 - Monberg, R.J., Howe, A.G., Kepfer-Rojas, S., Ravn, H.P., Jensen, M.B., 2019. Vegetation development in a stormwater management system designed to enhance ecological qualities. *Urban Forestry & Urban Greening* 46, 126463. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126463>
 - Morard, V., Joassard, I., 2019. L'environnement en France - Rapport de synthèse.
 - Moreno-Mateos, D., Alberdi, A., Morriën, E., Van Der Putten, W.H., Rodríguez-Uña, A., Montoya, D., 2020. The long-term restoration of ecosystem complexity. *Nat Ecol Evol* 4, 676–685. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-1154-1>
 - Moreno-Mateos, D., Maris, V., Béchet, A., Curran, M., 2015. The true loss caused by biodiversity offsets. *Biological Conservation* 192, 552–559. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.08.016>
 - Moreno-Mateos, D., Power, M.E., Comín, F.A., Yockteng, R., 2012. Structural and Functional Loss in Restored Wetland Ecosystems. *PLoS Biology* 10, e1001247. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001247>
 - Muratet, A., Chiron, F., Muratet, M., 2019. Manuel d'écologie urbaine, Collection Al Dante. Les Presses du Réel, Dijon.
- N**
- Naiman, R.J., Décamps, H., 1997. The Ecology of Interfaces: Riparian Zones. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 28, 621–658. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.28.1.621>
 - Narcy, J.-B., 2013. Regards des sciences sociales

- sur la mise en oeuvre des politiques de l'eau, Comprendre pour agir. ONEMA, Vincennes.
- Nesshöver, C., Assmuth, T., Irvine, K.N., Rusch, G.M., Waylen, K.A., Delbaere, B., Haase, D., Jones-Walters, L., Keune, H., Kovacs, E., Krauze, K., Külvik, M., Rey, F., Van Dijk, J., Vistad, O.I., Wilkinson, M.E., Wittmer, H., 2017. The science, policy and practice of nature-based solutions: An interdisciplinary perspective. *Science of The Total Environment* 579, 1215–1227. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.106>
 - Nivet, C., Bonhême, I., Peyron, J.-L., 2012. Les indicateurs de biodiversité forestière : synthèse des réflexions issues du programme de recherche Biodiversité, gestion forestière et politiques publiques. Ecofor - Écosystèmes forestiers ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, Paris La Défense.
 - Nowak, D.J., Ogren, T.L., 2021. Variations in urban forest allergy potential among cities and land uses. *Urban Forestry & Urban Greening* 63, 127224. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127224>
- O**
- OCDE, 2025. Adapter l'Île-de-France aux risques de raréfaction de l'eau. Éditions OCDE. <https://doi.org/10.1787/270e92ac-fr>
 - OFB, 2024. Restauration des fonctions écologiques de la Bièvre amont et de ses affluents en milieu urbain.
 - Office National des Forêts, 2017. Communiqué de presse - Vers une nouvelle gestion des forêts domaniales en Île-de-France.
 - Onerc, 2019. Des Solutions fondées sur la Nature pour s'adapter au changement climatique, Rapport de l'Onerc au Premier ministre et au Parlement.
 - Opperman, J.J., Luster, R., McKenney, B.A., Roberts, M., Meadows, A.W., 2010. Ecologically Functional Floodplains: Connectivity, Flow Regime, and Scale. *J American Water Resour Assoc* 46, 211–226. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2010.00426.x>
 - Organisation mondiale de la Santé, 2021. Lignes Directrices OMS Relatives à la Qualité de l'air : Particules (PM_{2,5} et PM₁₀), Ozone, Dioxyde d'azote, Dioxyde de Soufre et Monoxyde de Carbone. Résumé D'orientation, 1st ed. ed. World Health Organization, Geneva.
- P**
- Palmer, M.A., Hondula, K.L., Koch, B.J., 2014. Ecological Restoration of Streams and Rivers: Shifting Strategies and Shifting Goals. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 45, 247–269. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-120213-091935>
 - Palmer, M.A., Menninger, H.L., Bernhardt, E., 2010. River restoration, habitat heterogeneity and biodiversity: a failure of theory or practice? *Freshwater Biology* 55, 205–222. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02372.x>
 - Paquette, A., Sousa-Silva, R., Maure, F., Cameron, E., Belluau, M., Messier, C., 2021. Praise for diversity: A functional approach to reduce risks in urban forests. *Urban Forestry & Urban Greening* 62, 127157. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127157>
 - Pattnaik, N., Rahman, M.A., Pauleit, S., 2025. Urban vegetation structure and composition influence pedestrian thermal comfort in public spaces: A case study in Munich. *Urban Forestry & Urban Greening* 114, 129162. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2025.129162>
 - Peng, L., Searchinger, T.D., Zions, J., Waite, R., 2023. The carbon costs of global wood harvests. *Nature* 620, 110–115. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06187-1>
 - Pörtner, H.-O., Scholes, R.J., Agard, J., Archer, E., Arneth, A., Bai, X., Barnes, D., Burrows, M., Chan, L., Cheung, W.L. (William), Diamond, S., Donatti, C., Duarte, C., Eisenhauer, N., Foden, W., Gasalla, M.A., Handa, C., Hickler, T., Hoegh-Guldberg, O., Ichii, K., Jacob, U., Insarov, G., Kiessling, W., Leadley, P., Leemans, R., Levin, L., Lim, M., Maharaj, S., Managi, S., Marquet, P.A., McElwee, P., Midgley, G., Oberdorff, T., Obura, D., Osman Elasha, B., Pandit, R., Pascual, U., Pires, A.P.F., Popp, A., Reyes-García, V., Sankaran, M., Settele, J., Shin, Y.-J., Sintayehu, D.W., Smith, P., Steiner, N., Strassburg, B., Sukumar, R., Trisos, C., Val, A.L., Wu, J., Aldrian, E., Parmesan, C., Pichs-Madruga, R., Roberts, D.C., Rogers, A.D., Díaz, S., Fischer, M., Hashimoto, S., Lavorel, S., Wu, N., Ngo, H., 2021a. Scientific outcome of the IPBES-IPCC co-sponsored workshop on biodiversity and climate change. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.4659158>
 - Pörtner, H.-O., Scholes, R.J., Agard, J., Archer, E., Bai, X., Barnes, D., Burrows, M., Chan, L., Cheung, W.L. (William), Diamond, S., Donatti, C., Duarte, C., Eisenhauer, N., Foden, W., Gasalla, M.A., Handa, C., Hickler, T., Hoegh-Guldberg, O., Ichii, K., Jacob, U., Insarov, G., Kiessling, W., Leadley, P., Leemans, R., Levin, L., Lim, M., Maharaj, S., Managi, S., Marquet, P.A., McElwee, P., Midgley, G., Oberdorff, T., Obura, D., Osman Elasha, B., Pandit, R., Pascual, U., Pires, A.P.F., Popp, A., Reyes-García, V., Sankaran, M., Settele, J., Shin, Y.-J., Sintayehu, D.W., Smith, P., Steiner, N., Strassburg, B., Sukumar, R., Trisos, C., Val, A.L., Wu, J., Aldrian, E., Parmesan, C., Pichs-Madruga, R., Roberts, D.C., Rogers, A.D., Díaz, S., Fischer, M., Hashimoto, S., Lavorel, S., Wu, N., Ngo, H., 2021b. IPBES-IPCC co-sponsored workshop

report on biodiversity and climate change. Zenodo.
<https://doi.org/10.5281/ZENODO.4782538>

- R**
- RadioFrance, 2019. Le billet vert. Des « arbres à algues » dépolluants. Le billet sciences.
 - Région Île-de-France, 2022. Plan de protection, de résistance et d'adaptation de la Région Île-de-France face au changement climatique.
 - Ren, Y., Ge, Y., Ma, D., Song, X., Shi, Y., Pan, K., Qu, Z., Guo, P., Han, W., Chang, J., 2017. Enhancing plant diversity and mitigating BVOC emissions of urban green spaces through the introduction of ornamental tree species. *Urban Forestry & Urban Greening* 27, 305–313. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.08.011>
 - Renault, O., 2024. Agriculture et biodiversité : mobiliser et favoriser la biodiversité dans les systèmes agricoles, Les études de l'Institut Paris Region. l'Institut Paris Region, Paris.
 - Réseau mixte technologique pour l'adaptation des forêts au changement climatique, Groupement d'intérêt public Écosystèmes forestiers (Eds.), 2023. Coupes rases et renouvellement des peuplements forestiers en contexte de changement climatique : expertise collective CRREF synthèse de l'expertise, juin 2023. Ecofor, Paris.
 - Rey, F., Bertrand-Krajewski, J.-L., Fernandez, S., Guerrin, J., Herivaux, C., Lafforgue, M., Le Coent, P., Pons, M.-N., Rulleau, B., 2026. Nature-based solutions for water management: Pluridisciplinary state-of-the-art and research needs. *Ecological Engineering* 225, 107887. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2025.107887>
 - Robert, V., Cécile, de M., Nathalie, de N.-D., Isabelle, D., 2022a. Le climat francilien et les grandes lignes du changement climatique en Île-de-France. GREC francilien.
 - Robert, V., Florence, H., Aglaé, J., Nathalie, B., de Noblet Nathalie, 2022b. Les extrêmes climatiques et les risques associés au changement climatique. GREC francilien.
 - Rosier, I., Diels, J., Somers, B., Van Orshoven, J., 2023. The impact of vegetated landscape elements on runoff in a small agricultural watershed: A modelling study. *Journal of Hydrology* 617, 129144. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129144>
 - Roux A. (coord.), Colin A. (coord.), Dhôte J.-F. (coord.), Schmitt B. (coord.), Bailly A., Bastien J.-C., Bastick C., Berthelot A., Bréda N., Caurla S., Carnus J.-M., Gardiner B., Jactel H., Leban J.-M., Lobianco A., Loustau D., Marçais B., Meredieu C., Pâques L., Rigolot E., Saint-André L., Guehl J.-M., 2020. Filière forêt-bois et atténuation du changement climatique : entre séquestration du carbone en forêt et développement de la bioéconomie, Matière à débattre et décider. Éditions Quae, Versailles.
 - Roux, A., Dhôte, J.-F., Bastick, C., Colin, A., Bailly, A., Bastien, J.-C., Berthelot, A., Bréda, N., Caurla, S., Carnus, J.-M., Gardiner, B., Jactel, H., Leban, J.-M., Lobianco, A., Loustau, D., Marçais, B., Martel, S., Meredieu, C., Moisy, C., Pâques, L., Picart-Deshors, D., Rigolot, E., Saint-André, L., Schmitt, B., 2017. Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique ? Une étude des freins et leviers forestiers à l'horizon 2050. Rapport d'étude pour le ministère de l'Agriculture et de l'alimentation.
- S**
- Sabrin, S., Karimi, M., Nazari, R., 2023. The cooling potential of various vegetation covers in a heat-stressed underserved community in the deep south: Birmingham, Alabama. *Urban Climate* 51, 101623. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101623>
 - Schnabel, F., Beugnon, R., Yang, B., Richter, R., Eisenhauer, N., Huang, Y., Liu, X., Wirth, C., Cesarz, S., Fichtner, A., Perles-Garcia, M.D., Hähn, G.J.A., Härdtle, W., Kunz, M., Castro Izaguirre, N.C., Niklaus, P.A., Von Oheimb, G., Schmid, B., Trogisch, S., Wendisch, M., Ma, K., Bruehlheide, H., 2025. Tree Diversity Increases Forest Temperature Buffering via Enhancing Canopy Density and Structural Diversity. *Ecology Letters* 28, e70096. <https://doi.org/10.1111/ele.70096>
 - Searchinger, T.D., Beringer, T., Holtzmark, B., Kammen, D.M., Lambin, E.F., Lucht, W., Raven, P., Van Ypersele, J.-P., 2018. Europe's renewable energy directive poised to harm global forests. *Nat Commun* 9, 3741. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06175-4>
 - Seddon, N., Smith, A., Smith, P., Key, I., Chausson, A., Girardin, C., House, J., Srivastava, S., Turner, B., 2021. Getting the message right on nature-based solutions to climate change. *Global Change Biology* 27, 1518–1546. <https://doi.org/10.1111/gcb.15513>
 - Selmi, W., Weber, C., Rivière, E., Blond, N., Mehdi, L., Nowak, D., 2016. Air pollution removal by trees in public green spaces in Strasbourg city, France. *Urban Forestry & Urban Greening* 17, 192–201. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.04.010>
 - Selosse, M.-A., Rafaelian, A., 2021. L'origine du monde : une histoire naturelle du sol à l'intention de ceux qui le piétinent. Actes Sud, Arles.
 - Société botanique de France (Ed.), 2021. L'introduction d'essences exotiques en forêt : livre blanc. Société botanique de France, Paris.
 - Société botanique de France, UICN France, 2023. Prévention du risque incendie et biodiversité dans

les forêts françaises.

- Soltanifard, H., Amani-Beni, M., 2025. The cooling effect of urban green spaces as nature-based solutions for mitigating urban heat: insights from a decade-long systematic review. *Climate Risk Management* 49, 100731. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2025.100731>
- Sousa-Silva, R., Smargiassi, A., Kneeshaw, D., Dupras, J., Zinszer, K., Paquette, A., 2021. Strong variations in urban allergenicity riskscape due to poor knowledge of tree pollen allergenic potential. *Sci Rep* 11, 10196. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89353-7>
- Stanley, C.H., Helletsgruber, C., Hof, A., 2019. Mutual Influences of Urban Microclimate and Urban Trees: An Investigation of Phenology and Cooling Capacity. *Forests* 10, 533. <https://doi.org/10.3390/f10070533>
- Stephenson, N.L., Das, A.J., Condit, R., Russo, S.E., Baker, P.J., Beckman, N.G., Coomes, D.A., Lines, E.R., Morris, W.K., Rüger, N., Álvarez, E., Blundo, C., Bunyavejchewin, S., Chuyong, G., Davies, S.J., Duque, Á., Ewango, C.N., Flores, O., Franklin, J.F., Grau, H.R., Hao, Z., Harmon, M.E., Hubbell, S.P., Kenfack, D., Lin, Y., Makana, J.-R., Malizia, A., Malizia, L.R., Pabst, R.J., Pongpattananurak, N., Su, S.-H., Sun, I.-F., Tan, S., Thomas, D., Van Mantgem, P.J., Wang, X., Wiser, S.K., Zavala, M.A., 2014. Rate of tree carbon accumulation increases continuously with tree size. *Nature* 507, 90–93. <https://doi.org/10.1038/nature12914>
- Sternberg, T., Viles, H., Cathersides, A., Edwards, M., 2010. Dust particulate absorption by ivy (*Hedera helix* L.) on historic walls in urban environments. *Science of The Total Environment* 409, 162–168. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.09.022>
- Suggitt, A.J., Wilson, R.J., Isaac, N.J.B., Beale, C.M., Auffret, A.G., August, T., Bennie, J.J., Crick, H.Q.P., Duffield, S., Fox, R., Hopkins, J.J., Macgregor, N.A., Morecroft, M.D., Walker, K.J., Maclean, I.M.D., 2018. Extinction risk from climate change is reduced by microclimatic buffering. *Nature Clim Change* 8, 713–717. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0231-9>
- Sweeney, B.W., Newbold, J.D., 2014. Streamside Forest Buffer Width Needed to Protect Stream Water Quality, Habitat, and Organisms: A Literature Review. *J American Water Resour Assoc* 50, 560–584. <https://doi.org/10.1111/jawr.12203>
- Tamura, N., Lulow, M.E., Halsch, C.A., Major, M.R., Balazs, K.R., Austin, P., Huxman, T.E., Kimball, S., 2017. Effectiveness of seed sowing techniques for sloped restoration sites. *Restoration Ecology* 25, 942–952. <https://doi.org/10.1111/rec.12515>
- The Shift Project (Ed.), 2024. Pour une agriculture bas carbone, résiliente et prospère - Pour une transformation ambitieuse du secteur.
- Thiele, A., 2011. Thiele, A., Couwenberg, J. Tanneberger, T. Augustin, J. Bärtsch, S. Liashchynskaya, N. Michaelis, D. Minke, M., Joosten, H. (2011). Assessing greenhouse gas emissions from peatlands using vegetation as a proxy – First trial and insights on Belarusian peatlands. *Geophysical Research Abstracts*. Vol. 13, EGU2011.
- Thompson, R.L., Lassaletta, L., Patra, P.K., Wilson, C., Wells, K.C., Gressent, A., Koffi, E.N., Chipperfield, M.P., Winiwarter, W., Davidson, E.A., Tian, H., Canadell, J.G., 2019. Acceleration of global N₂O emissions seen from two decades of atmospheric inversion. *Nat. Clim. Chang.* 9, 993–998. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0613-7>
- Tian, H., Xu, R., Canadell, J.G., Thompson, R.L., Winiwarter, W., Suntharalingam, P., Davidson, E.A., Ciais, P., Jackson, R.B., Janssens-Maenhout, G., Prather, M.J., Regnier, P., Pan, N., Pan, S., Peters, G.P., Shi, H., Tubiello, F.N., Zaehle, S., Zhou, F., Arneth, A., Battaglia, G., Berthet, S., Bopp, L., Bouwman, A.F., Buitenhuis, E.T., Chang, J., Chipperfield, M.P., Dangal, S.R.S., Dlugokencky, E., Elkins, J.W., Eyre, B.D., Fu, B., Hall, B., Ito, A., Joos, F., Krummel, P.B., Landolfi, A., Laruelle, G.G., Lauerwald, R., Li, W., Lienert, S., Maavara, T., MacLeod, M., Millet, D.B., Olin, S., Patra, P.K., Prinn, R.G., Raymond, P.A., Ruiz, D.J., Van Der Werf, G.R., Vuichard, N., Wang, J., Weiss, R.F., Wells, K.C., Wilson, C., Yang, J., Yao, Y., 2020. A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks. *Nature* 586, 248–256. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2780-0>
- Tibi A. (coord.), Martinet V. (coord.), Vialatte A. (coord.), Alignier V., Angeon V., Bohan D.A., Bougherrara D., Cordeau S., Courtois P., Deguine J.-P., Enjalbert J., Fabre F., Fréville H., Grateau R., Grimonprez B., Gross N., Hannachi M., Launay M., Lelièvre V., Lemarié S., Martel G., Navarrete M., Plantegenest M., Ravigné V., Rusch A., Suffert F., Thoyer S., 2022. Protéger les cultures en augmentant la diversité végétale des espaces agricoles. Synthèse du rapport d'ESCo.
- Tiemeyer, B., Freibauer, A., Borraz, E.A., Augustin, J., Bechtold, M., Beetz, S., Beyer, C., Ebli, M., Eickenscheidt, T., Fiedler, S., Förster, C., Gensior, A., Giebels, M., Glatzel, S., Heinichen, J., Hoffmann, M., Höper, H., Jurasinski, G., Lagner, A., Leiber-Sauheitl, K., Peichl-Brak, M., Drösler, M., 2020. A new methodology for organic soils in national greenhouse gas inventories: Data synthesis, derivation and application. *Ecological Indicators* 109, 105838. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105838>

T

- Timbeau, X., Pommeret, A., Robinet, A., Viennot, M., Delahais, A., Dépoues, V., Nicol, M., Callonec, G., Gourmand, L., Rannou, F., 2023. Les incidences économiques de l'action pour le climat, dommages et adaptation (Rapport thématique). OFCE, université Savoie Mont Blanc, France Stratégie, CIRED, I4CE, Ademe, DG Trésor, CGDD.

- U** • UICN Comité français, 2021. 8 questions à se poser pour mettre en œuvre les Solutions fondées sur la Nature - un guide d'appropriation du Standard mondial de l'UICN.
- UICN France, 2022. Les Solutions fondées sur la Nature pour les risques graves et incendie en France, UICN France. ed. Paris.
- Urák, I., Hartel, T., Gallé, R., Balog, A., 2017. World-wide peatland degradations and the related carbon dioxide emissions: the importance of policy regulations. *Environmental Science & Policy* 69, 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.12.012>

- V** • Vaz Monteiro, M., Doick, K.J., Handley, P., Peace, A., 2016. The impact of greenspace size on the extent of local nocturnal air temperature cooling in London. *Urban Forestry & Urban Greening* 16, 160–169. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.02.008>
- Vennin, S., Montpied, P., Behr, P., Thimonier, A., Dupouey, J.-L., 2025. Mechanisation of forest operations drives long-term changes in plant communities. *Forest Ecology and Management* 585, 122562. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.122562>
- Viaud, V., Grimaldi, C., Merot, P., 2009. Impact of hedgerows on water and soil resources as illustrated in brittany - Recent results and outlook 61, 493–502.
- Vicarelli, M., Sudmeier-Rieux, K., Alsadadi, A., Shrestha, A., Schütze, S., Kang, M.M., Leue, M., Wasielewski, D., Mysiak, J., 2024. On the cost-effectiveness of Nature-based Solutions for reducing disaster risk. *Sci Total Environ* 947, 174524. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174524>
- Vidal-Beaudet, L., 2018. Du déchet au Technosol fertile : l'approche circulaire du programme français de recherche SITERRE. *vertigo Hors-série* 31. <https://doi.org/10.4000/vertigo.21887>
- Ville de Paris, 2021. Créer et entretenir un mur végétalisé, *Revue de Projet*.

- Wang, X., Rahman, M.A., Mokroš, M., Rötzer, T., Pattnaik, N., Pang, Y., Zhang, Y., Da, L., Song, K., 2023. The influence of vertical canopy structure on the cooling and humidifying urban microclimate during hot summer days. *Landscape and Urban Planning* 238, 104841. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104841>
- Weiskopf, S.R., Rubenstein, M.A., Crozier, L.G., Gaichas, S., Griffis, R., Halofsky, J.E., Hyde, K.J.W., Morelli, T.L., Morissette, J.T., Muñoz, R.C., Pershing, A.J., Peterson, D.L., Poudel, R., Staudinger, M.D., Sutton-Grier, A.E., Thompson, L., Vose, J., Weltzin, J.F., Whyte, K.P., 2020. Climate change effects on biodiversity, ecosystems, ecosystem services, and natural resource management in the United States. *Science of The Total Environment* 733, 137782. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137782>
- Wendling, L., Garcia, J., Descoteaux, D., Sowińska-Świerkosz, B., McPhearson, T., Frantzeskaki, N., La Rosa, D., Yiwen, Z., Lin, T., Fidélis, T., Dumitru, A., Mitsch, W.J., Lavrić, S., Maucieri, C., Wang, Y., McCarton, L., O'Hogain, S., Schmidt, S., Vidal, G., Crespo, C.H., 2021. Editorial: Introduction to the Nature-Based Solutions journal. *Nature-Based Solutions* 1, 100003. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2021.100003>
- Wohl, E., Bledsoe, B.P., Jacobson, R.B., Poff, N.L., Rathburn, S.L., Walters, D.M., Wilcox, A.C., 2015. The Natural Sediment Regime in Rivers: Broadening the Foundation for Ecosystem Management. *BioScience* 65, 358–371. <https://doi.org/10.1093/biosci/biv002>

- Y** • Yang, X., Li, B., Li, N., Ma, X., 2026. A study of the cooling effect of urban trees: Influencing factors, assessment methods, planning strategies, and impacts. *Theor Appl Climatol* 157, 31. <https://doi.org/10.1007/s00704-025-05904-2>

- W** • Wang, X., Rahman, M.A., Mokroš, M., Rötzer, T., Pattnaik, N., Pang, Y., Zhang, Y., Da, L., Song, K., 2023. The influence of vertical canopy structure on the cooling and humidifying urban microclimate

LES ÉTUDES

DE L'INSTITUT PARIS REGION



L'INSTITUT PARIS REGION
ASSOCIATION LOI 1901

CAMPUS PLEYAD - PLEYAD 4
66-68 RUE PLEVEL
93200 SAINT-DENIS

ISBN 978-2-7371-2283-5