

LE CYCLE DE L'EAU ET LA GESTION DES RESSOURCES HYDRIQUES

Stocker l'eau quand elle tombe, la préserver quand elle manque

Note de synthèse transversale — Programme Résilience 2045 — Juillet 2026

Principe directeur : *la France reçoit encore des volumes de précipitations importants à l'échelle annuelle, mais elle manque de capacité à retenir et stocker l'eau lorsqu'elle tombe. Le problème n'est pas seulement la quantité annuelle disponible — c'est de plus en plus sa répartition dans le temps, sa localisation et notre capacité à l'infiltrer. Les sols appauvris, les zones humides détruites et les haies arrachées ont transformé le territoire en surface imperméable. L'enjeu n'est pas de produire plus d'eau — c'est de ralentir, infiltrer et stocker celle qui tombe déjà.*

Introduction

À l'échelle nationale, le volume annuel de précipitations a relativement peu évolué jusqu'à présent, mais leur répartition spatiale, saisonnière et l'intensité des épisodes ont fortement changé : des pluies intenses concentrées sur de courtes périodes, suivies de sécheresses prolongées, des sols qui ruissellent au lieu d'absorber, des rivières qui débordent puis s'assèchent, des nappes phréatiques qui peinent à se recharger.

Ce dérèglement n'est pas uniquement climatique — il est aussi le résultat de décennies de transformations du territoire : arrachage des haies, drainage des zones humides, compaction et appauvrissement des sols agricoles, imperméabilisation urbaine. Le dérèglement climatique amplifie une vulnérabilité que nous avons nous-mêmes construite.

Cette note pose le diagnostic physique et propose une hiérarchie des solutions — du sol au territoire, de l'agriculteur au législateur.

1. Le cycle de l'eau — ce qui a changé

Avant les transformations agricoles du XXe siècle, le cycle de l'eau terrestre fonctionnait comme un système tamponné : les précipitations étaient ralenties par la végétation, infiltrées par les sols vivants, stockées dans les zones humides, restituées progressivement aux rivières et aux nappes. Les étiages estivaux existaient — ils étaient structurels, pas catastrophiques.

Trois mécanismes ont fragilisé ce système :

La destruction des zones humides. La France a perdu 50 % de ses zones humides depuis 1960. Ces écosystèmes fonctionnaient comme des éponges territoriales : ils absorbaient les crues, restituaient l'eau en période sèche, filtraient les nutriments. Leur disparition a supprimé le principal tampon hydrologique du territoire.

L'arrachage des haies et du bocage. Depuis 1950, la France a perdu 70 % de son réseau de haies bocagères — soit environ 1,4 million de kilomètres (CGAAER, ministère de l'Agriculture, 2023). La perte se poursuit à un rythme de 23 500 km par an entre 2017 et 2021, très loin devant les 3 000 km replantés chaque année. Les haies ralentissent le ruissellement de surface, favorisent l'infiltration, réduisent l'évaporation des sols et maintiennent l'humidité des parcelles. Leur disparition a accéléré le ruissellement et augmenté la vulnérabilité aux crues rapides.

L'appauvrissement des sols agricoles. Un sol vivant, riche en matière organique, absorbe et retient l'eau comme une éponge — jusqu'à 200 litres par mètre cube dans un sol bien structuré. Un sol compacté, appauvri en matière organique, devient imperméable : l'eau ruisselle en surface sans

s'infiltrer. Dans de nombreuses régions agricoles intensives, les sols européens ont perdu 30 à 50 % de leur matière organique depuis un siècle.

Le résultat : lors d'un épisode pluvieux intense, l'eau ne trouve plus de sol capable de l'absorber. Elle ruisselle, charge les rivières en quelques heures, génère des crues, puis disparaît vers la mer sans avoir rechargé les nappes. La sécheresse qui suit n'est pas seulement climatique — c'est le résultat de cette imperméabilisation du territoire.

L'évapotranspiration — le lien entre cycle de l'eau et climat local

L'eau infiltrée dans le sol ne profite pas uniquement aux plantes. Une partie est restituée à l'atmosphère par évapotranspiration — processus par lequel les plantes libèrent de la vapeur d'eau via leurs feuilles. Cette vapeur favorise la formation de nuages, limite les températures extrêmes et participe au recyclage régional des précipitations. Une forêt adulte peut restituer par évapotranspiration 40 à 60 % des précipitations qu'elle reçoit. Restaurer les sols vivants et la végétation contribue ainsi non seulement à stocker l'eau localement, mais aussi à réguler le climat local — un bénéfice rarement comptabilisé dans les politiques hydriques.

2. Le sol — la clé manquante

Le sol est le premier réservoir hydrique du territoire — et le plus sous-estimé. Un sol agricole en bonne santé contient entre 25 et 35 % d'eau en volume. La matière organique est le facteur décisif : chaque gramme de matière organique supplémentaire dans le sol permet de retenir jusqu'à 20 grammes d'eau additionnelle.

La compaction par les engins agricoles lourds aggrave le problème : elle réduit la porosité du sol, empêche les racines de pénétrer en profondeur, et crée une semelle de labour imperméable qui bloque l'infiltration verticale. Sur un sol compacté, jusqu'à 80 % des précipitations peuvent ruisseler au lieu de s'infiltrer.

Reconstruire la capacité d'absorption des sols est le levier le plus coût/efficace et le plus durable disponible. Il ne nécessite pas d'infrastructure — il nécessite des pratiques agricoles différentes et du temps.

État du sol	Absorption (mm/h)	Ruissellement	Recharge nappe
Sol vivant, riche en MO	50–150	Faible	Forte
Sol agricole standard	10–30	Modéré	Faible
Sol compacté, appauvri	1–5	Dominant	Quasi nulle
Sol urbain imperméabilisé	<1	Quasi total	Nulle

Valeurs indicatives observées sur sols non saturés ; elles varient selon la texture (argile, limon, sable) et la structure du sol.

3. La forêt et les zones humides — infrastructures naturelles de régulation

Les forêts, haies, zones humides et ripisylves (végétation des berges) sont des infrastructures hydrologiques au sens strict : elles remplissent des fonctions de régulation que nulle infrastructure artificielle ne peut reproduire à coût équivalent.

Une forêt adulte intercepte 15 à 40 % des précipitations dans sa canopée et ralentit le ruissellement de surface. Les effets hydrologiques varient cependant selon les essences, les climats, les sols et la densité des peuplements : une hêtraie normande n'a pas le même comportement hydrique qu'une

pinède méditerranéenne, une plantation de douglas ou une pessière. Les études sur bassins versants montrent généralement que les forêts peuvent réduire la vitesse du ruissellement et amortir certaines crues, mais leurs effets sur les débits d'étiage dépendent fortement du climat, des essences et de la consommation d'eau par la végétation — une forêt inadaptée à son milieu peut consommer plus d'eau qu'elle n'en retient.

Les zones humides fonctionnent comme des réservoirs tampons : elles absorbent les surplus lors des crues et les restituent progressivement en période sèche. Un hectare de zone humide peut stocker entre 1 000 et 10 000 m³ d'eau selon sa profondeur et sa végétation. La restauration de zones humides est l'investissement hydrologique à meilleur rendement disponible aujourd'hui.

Les ripisylves — bandes végétalisées en bordure de cours d'eau — ralentissent les crues, filtrent les nitrates et phosphates avant qu'ils n'atteignent la rivière, et maintiennent la fraîcheur de l'eau en été par ombrage. Leur destruction systématique dans les années 1970–1990 au nom de l'optimisation agricole a coûté des milliards en dégâts de crue et en dépollution.

4. Stocker l'eau — hiérarchie des solutions

Il n'existe pas une solution au problème hydrique — il existe une hiérarchie de solutions complémentaires, du plus diffus au plus concentré, du moins coûteux au plus technique.

4.1 Stocker dans le sol — premier niveau, levier le plus large

C'est le stockage le plus diffus, le moins coûteux et le plus résilient. Il repose sur quatre leviers complémentaires :

La matière organique — la reconstruction du capital organique des sols passe par le maintien de couverts végétaux légers (racines, résidus fins non lignocellulosiques) et l'apport de compost ou de fumier. Il est important de distinguer deux catégories de résidus : les résidus fins et litières légères contribuent utilement à la matière organique du sol lorsqu'ils sont incorporés. Les résidus lignocellulosiques épais ont un destin différent : leur décomposition naturelle réintroduit à terme leur carbone dans le cycle atmosphérique, sous forme de CO₂ et, lorsque les conditions deviennent anaérobies, de CH₄. Leur conversion par pyrogazéification permet au contraire de valoriser leur énergie tout en transformant une fraction de leur carbone en biochar stable, susceptible d'être séquestré durablement dans les sols. Les pratiques d'agriculture de conservation (semis direct, couverts végétaux permanents) reconstruisent la matière organique sur 10 à 30 ans et sont complémentaires de la filière biochar — elles ne s'y substituent pas.

Le digestat de méthanisation mélangé au biochar — l'épandage direct de fumier stocké en tas est une pratique courante mais sous-optimale. Un fumier stocké plusieurs semaines en tas se décompose en conditions anaérobies dès que l'oxygène ne pénètre plus au-delà d'une profondeur de l'ordre de 20 à 30 cm : il produit du méthane diffus non capté et perd une fraction significative de son azote par volatilisation ammoniacale. L'épandage direct expose ensuite les nitrates au lessivage vers les nappes lors des épisodes pluvieux. La voie optimale dans le cadre du système Résilience est la méthanisation des effluents, suivie d'une séparation de phases : le digestat liquide, mélangé au biochar avant épandage, bénéficie de l'effet éponge du biochar qui retient les nutriments azotés dans la zone racinaire et réduit le lessivage de 20 à 40 % selon les études. La fraction solide, incorporée à la pyrogazéification, produit du biochar supplémentaire. Ce cycle se substitue partiellement aux engrais azotés de synthèse tout en réduisant leur entraînement vers les nappes phréatiques et les cours d'eau.

Le biochar — le biochar haute température (pyrogazéification $\geq 700^{\circ}\text{C}$) augmente la rétention hydrique des sols de 10 à 40 % selon les études, avec une stabilité du carbone pouvant s'étendre de plusieurs siècles à plusieurs millénaires selon les caractéristiques du sol et du biochar. Sa structure poreuse retient l'eau disponible pour les plantes tout en améliorant la conductivité hydraulique. C'est le seul amendement qui combine séquestration carbone durable et amélioration hydrique structurelle

— et il est produit précisément à partir des résidus lignocellulosiques qui ne doivent pas être laissés à décomposer en conditions anaérobies.

La faune des sols — vers de terre, champignons mycorhiziens, bactéries créent des galeries et agrégats qui structurent le sol et maintiennent sa porosité. Un sol avec 500 kg de vers de terre par hectare absorbe jusqu'à 10 fois plus d'eau qu'un sol sans faune. La restauration de la vie des sols est un prérequis à toute amélioration hydrique durable.

4.2 Ralentir le ruissellement — deuxième niveau

Avant de stocker, il faut ralentir. L'eau qui ruisselle vite ne s'infiltre pas — elle charge les rivières et disparaît. Plusieurs types d'obstacles peuvent être déployés selon les contextes :

Les haies et bandes enherbées ralentissent le ruissellement de surface sur les versants et multiplient les points d'infiltration. Leur reconstitution est pertinente dans les zones bocagères et agricoles où le risque incendie est limité. Dans les versants forestiers, notamment en zone méditerranéenne, la végétation arbustive dense et les broussailles constituent au contraire un combustible qui aggrave le risque incendie — leur gestion active (débroussaillage, exploitation raisonnée) est prioritaire sur leur maintien. La logique hydrologique et la logique de prévention des incendies convergent ici : une végétation gérée, entretenue et valorisée est préférable à une végétation abandonnée, qu'elle soit dense ou sèche.

Le miscanthus, planté en bandes transversales dans les talwegs ou en bordure de parcelles, constitue un obstacle au ruissellement particulièrement efficace : ses tiges denses freinent l'eau, favorisent l'infiltration et résistent à l'arrachage. Son avantage supplémentaire est double — il peut être récolté annuellement et constitue une biomasse de haute valeur pour la pyrogazéification, transformant une infrastructure de ralentissement en ressource énergétique. C'est un exemple de cohérence entre gestion hydrologique et filière Résilience, selon les conditions pédoclimatiques et les usages du territoire.

Les petits ouvrages hydrauliques (seuils, gabions, digues filtrantes) peuvent compléter ces dispositifs végétaux dans les zones à forte pente ou à ruissellement concentré. Les ouvrages minéraux ou les barrières végétales vivantes sont préférables aux fascines de bois mort laissées en travers des talwegs — ces dernières immobilisent de la biomasse ligneuse, constituent un combustible potentiel en cas d'incendie et privent la filière d'une ressource valorisable.

4.3 Retenues de surface — troisième niveau

Les retenues collinaires (petits barrages de fond de vallon) captent les ruissellements hivernaux pour les restituer en irrigation estivale. Elles sont techniquement simples, peu coûteuses à l'unité, et peuvent être réalisées à l'échelle de l'exploitation agricole. Leur multiplication à grande échelle représente un potentiel significatif à l'échelle nationale, sous réserve des contraintes locales et environnementales.

Les zones d'expansion des crues contrôlées sont des espaces aménagés pour accueillir temporairement les excédents lors des épisodes pluvieux intenses, réduisant la pointe de crue en aval et favorisant l'infiltration. Leur coût est très inférieur à celui des digues et des dégâts de crue qu'elles préviennent.

Les mégabassines — grands réservoirs alimentés par pompage hivernal — font l'objet d'un conflit politique majeur. Leur intérêt agronomique est réel pour les cultures irriguées ; leur impact sur les nappes phréatiques dépend de la façon dont elles sont alimentées. Pompées dans les nappes en période de stress, elles aggravent le problème qu'elles prétendent résoudre. Alimentées par ruissellement de surface en hiver, elles peuvent constituer un outil complémentaire.

L'association des retenues de surface avec des panneaux photovoltaïques flottants constitue une évolution technique intéressante qui modifie leur bilan global. Une couverture partielle de la surface

(60 à 70 %) réduit l'évaporation de l'ordre de 40 % selon les premières mesures réalisées sur la retenue de Lazer (Hautes-Alpes) par la R&D d'EDF (novembre 2025) — une économie d'eau correspondant à l'irrigation d'environ 130 hectares par retenue. Les panneaux bénéficient par ailleurs d'un refroidissement naturel par l'eau qui améliore leur rendement de 5 à 15 % par rapport aux installations au sol sous forte chaleur. L'ombrage limite également la prolifération algale et l'eutrophisation, problème récurrent dans les retenues estivales. En France, les premières installations significatives sont opérationnelles depuis 2019 à Piolenc (Vaucluse, 17 MWc, Akuo Energy) et depuis 2021 à Peyrolles-en-Provence (Bouches-du-Rhône, 14,7 MWc, Boralex). Cette combinaison ne résout pas les questions de fond sur l'alimentation des retenues — la physique des nappes reste la même — mais elle améliore sensiblement leur bilan hydrique et énergétique.

4.4 Recharge artificielle des nappes — quatrième niveau

La recharge artificielle des nappes consiste à introduire intentionnellement de l'eau dans un aquifère pour reconstituer ses réserves. Elle répond directement au paradoxe central du régime hydrique actuel : lors des épisodes pluvieux intenses, l'eau ruisselle trop vite sur des sols saturés ou imperméabilisés pour s'infiltrer naturellement. Les nappes ne se rechargent pas malgré des précipitations abondantes — plus de 60 % des précipitations en France repartent par ruissellement ou évaporation sans jamais atteindre les aquifères. Il existe deux voies physiquement et réglementairement distinctes, qu'il est essentiel de ne pas confondre.

4.4.1 Eau de pluie captée en retenue → infiltration dans la nappe

C'est la voie la plus naturelle et la moins risquée — elle accélère un processus naturel plutôt qu'elle ne l'invente. Lors des épisodes de hautes eaux hivernaux, l'eau de ruissellement est captée dans des retenues collinaires ou des bassins tampons, contrôlée (turbidité, matières en suspension, absence de polluants agricoles), puis orientée vers des bassins d'infiltration d'où elle percole lentement jusqu'à la nappe. Durant ce trajet, le sol joue son rôle épurateur naturel — la qualité de l'eau s'améliore par filtration physique et dégradation bactérienne. Ce n'est pas de la dépollution — c'est du stockage souterrain sans évaporation.

Les avantages sont multiples : zéro évaporation contrairement aux retenues de surface, pas d'artificialisation du milieu, moindres conflits d'usage, et stockage inter-saisonnier qui désaisonnalise les prélèvements. L'eau stockée en nappe pendant l'hiver est disponible en été sans les pertes thermiques d'une retenue exposée. Cette logique est opérationnelle en Allemagne, en Suisse, aux Pays-Bas et dans plusieurs régions espagnoles depuis des décennies. En France, le bassin Seine-Normandie dispose de sites d'infiltration alluviale depuis les années 1980 (Verneuil-Vernouillet, Flins-Aubergenville) et un projet à Boussens (Occitanie) vise à infiltrer l'eau du canal d'irrigation dans la nappe locale. Un amendement adopté à l'Assemblée nationale en avril 2026 crée enfin un cadre légal reconnaissant le caractère non consommatif à long terme de ces opérations — auparavant, un porteur de projet qui injectait de l'eau hivernale dans une nappe était traité administrativement comme s'il la prélevait définitivement, ce qui bloquait les autorisations. Le BRGM estime que la recharge naturelle des nappes pourrait baisser de 10 à 30 % d'ici 2070 — ce levier est donc stratégique.

4.4.2 Eaux usées traitées → usages alternatifs non potables

C'est une logique physiquement et réglementairement différente. Les eaux usées traitées, même après épuration avancée, ne doivent pas rejoindre les nappes destinées à l'alimentation en eau potable — le risque de contamination résiduelle (micropolluants, PFAS, perturbateurs endocriniens) reste une question ouverte dans la littérature scientifique. En revanche, elles constituent une ressource alternative précieuse pour des usages à risque contrôlé qui ne nécessitent pas la qualité eau potable : irrigation de certaines cultures (avec les précautions sanitaires adaptées selon les types), arrosage d'espaces verts et terrains sportifs, refroidissement de centrales industrielles et électriques,

process industriels, lutte contre les incendies. Ces usages libèrent d'autant les ressources en eau de qualité pour les besoins humains et la recharge des nappes potables. La France réutilise actuellement moins de 1 % de ses eaux usées traitées dans ces usages — contre 87 % en Israël et plus de 10 % dans plusieurs États méditerranéens. Le décret du 10 mars 2022 a assoupli le cadre réglementaire pour la réutilisation en agriculture, mais le déploiement reste limité. Ce gisement est considérable et ne présente pas les risques associés à l'injection dans les nappes potables.

La distinction entre ces deux voies est essentielle pour le débat public : confondre recharge des nappes par eau de pluie et injection d'eaux usées traitées dans les aquifères revient à mélanger deux logiques aux niveaux de risque, aux cadres réglementaires et aux finalités radicalement différents. La première est une accélération du cycle naturel — la seconde est une valorisation d'une ressource alternative pour des usages spécifiques.

5. Adapter les cultures et réduire les pertes

Stocker l'eau ne suffit pas si on la perd ensuite par des cultures inadaptées, une irrigation inefficace ou des pratiques qui maximisent l'évaporation. L'adaptation au nouveau régime hydrique passe d'abord par un choix de cultures cohérent avec la disponibilité réelle de l'eau.

5.1 Adapter les cultures au territoire — le levier le plus sous-estimé

La première question n'est pas comment irriguer, mais quoi cultiver. Certaines cultures sont structurellement inadaptées aux zones en déficit hydrique. Le maïs grain irrigué dans le Sud-Ouest ou le bassin de la Loire consomme 300 à 500 mm d'eau d'irrigation par saison, dans des zones où les nappes et les rivières sont en déficit structurel. Irriguer en pleine canicule avec des asperseurs en fonctionnement à midi entraîne des pertes importantes par évaporation et dérive — particulièrement élevées par vent fort et faible humidité — avant même que l'eau atteigne le sol. C'est une impasse thermodynamique et agronomique.

Des alternatives adaptées existent et sont insuffisamment déployées : le sorgho grain et fourrager, le tournesol, les légumineuses sèches (lentilles, pois chiche, féveroles), le chanvre, les variétés de blé rustiques à cycle court. Ces cultures valorisent le sol sans irrigation intensive, maintiennent une couverture du sol qui limite l'évaporation, et plusieurs d'entre elles — chanvre, sorgho — constituent des biomasses de qualité pour la pyrogazéification.

Le miscanthus mérite une mention particulière : culture pérenne à très faible besoin en eau après installation, il produit une biomasse lignocellulosique abondante — en moyenne 10 à 14 t/ha/an de matière sèche en France selon les données INRAE (2015–2021), avec un potentiel de 15 à 20 t/ha dans les meilleures conditions pédoclimatiques — sans irrigation en régime établi, résiste aux sécheresses grâce à son système racinaire profond, et constitue l'une des meilleures ressources pour la pyrogazéification. Planté en bandes dans le paysage, il joue simultanément le rôle de brise-vent, d'obstacle au ruissellement et de ressource énergétique — selon les conditions pédoclimatiques et les usages du territoire.

5.2 Réduire les pertes par évaporation et améliorer l'irrigation

L'évaporation des sols nus est un problème majeur : un sol nu sous canicule peut perdre plusieurs millimètres d'eau par jour par évaporation directe. Une végétation adaptée et gérée activement — cultures intermédiaires, mulching (paillage), couverts herbacés fauchés, agroforesterie — réduit cette évaporation en maintenant l'ombre et l'humidité en surface sans constituer un risque incendie. C'est la végétation dense, sèche et non gérée — broussailles, maquis, rémanents lignocellulosiques accumulés — qui aggrave ce risque, non la végétation basse entretenue.

6bis — Biomasse post-incendie — gisement prioritaire et levier de reconstruction hydrique

L'été 2026 marque un tournant dans l'histoire des incendies français : 110 000 hectares brûlés au 10 août 2026, record absolu EFFIS depuis le début des observations satellitaires, dépassant le précédent record annuel avant même la fin de la saison estivale (Source : EFFIS — European Forest Fire Information System, mise à jour attendue fin septembre 2026). Ce bilan confirme la trajectoire décrite dans les sections précédentes : des sols appauvris, des zones humides détruites, une végétation combustible accumulée sans valorisation — et un climat qui amplifie des vulnérabilités que nous avons nous-mêmes construites.

Ce contexte crée une articulation directe entre la gestion hydrologique du territoire, la prévention incendie et la filière biomasse du Programme Résilience. Ces trois logiques ne sont pas séparables — elles convergent sur les mêmes acteurs, les mêmes parcelles et les mêmes flux de matière.

6bis.1 Les perturbations hydrologiques post-incendie

Un incendie ne détruit pas seulement la végétation — il modifie durablement le comportement hydrique du sol. La chaleur intense pyrolyse partiellement la matière organique de surface et crée une couche hydrophobe qui empêche l'infiltration : les molécules organiques hydrophobes libérées par la combustion migrent dans le sol et tapissent les pores. Sur un sol brûlé, le ruissellement peut être multiplié par 5 à 10 par rapport à un sol intact — exactement l'inverse de ce que les §1 à §4 cherchent à construire.

Les premières pluies automnales qui suivent un incendie estival constituent ainsi le moment de risque hydrique maximal : sols nus et imperméabilisés, végétation absente, relief dénudé — les crues éclairs et les coulées de boue post-incendie sont documentées dans de nombreuses régions méditerranéennes, notamment après les incendies du Var (2021), du Gard (2022) et des Landes (2022). La restauration de la capacité d'infiltration des sols brûlés est donc une urgence hydrologique au même titre qu'une urgence écologique.

Conséquence de l'incendie	Mécanisme physique	Durée	Levier Résilience
Hydrophobie des sols brûlés	Cendres hydrophobes forment une croûte imperméable — ruissellement $\times 5$ à $\times 10$ vs sol intact	1 à 3 ans selon précipitations	Priorité de revégétalisation + biochar pour reconstruire la structure poreuse
Risque crue post-incendie	Sols imperméabilisés + relief dénudé → crues éclairs lors des premiers orages	Saison suivante (automne)	Bandes enherbées d'urgence, petits ouvrages de ralentissement transitoires
Dégagement carbone massif	1 ha forêt méditerranéenne brûlé → 50 à 150 t CO ₂ émis. 110 000 ha été 2026 → 5,5 à 16,5 Mt CO ₂	Immédiat (pendant le feu)	Valorisation rapide biomasse résiduelle évite la décomposition anaérobie (+CH ₄)
Bois mort et mortalité différée	Arbres stressés meurent dans les 2 à 5 ans post-incendie → gisement de biomasse lignocellulosique	2 à 5 ans	Mobilisation prioritaire pour pyrogazéification dans la fenêtre 2-3 ans avant dépérissement
Perte de la couche organique	La couche humique (MO des sols) est détruite par la chaleur — restauration en 10 à 30 ans	10 à 30 ans	Apport de biochar accélère la reconstruction de la structure poreuse
Déstabilisation des versants	Racines mortes ne maintiennent plus les sols → risque	2 à 5 ans	Revégétalisation d'urgence avec espèces pionnières à enracinement rapide

	d'érosion et de coulées de boue		
--	---------------------------------	--	--

Valeurs indicatives — émissions CO₂ selon type de forêt (méditerranéenne à garrigue : 50–80 t CO₂/ha, forêt de pins maritime : 80–130 t CO₂/ha, forêt dense de feuillus : 100–150 t CO₂/ha). Bilan été 2026 : estimation 5,5 à 16,5 Mt CO₂ (donnée provisoire au 10 août 2026).

6bis.2 La biomasse post-incendie — un gisement prioritaire à fenêtre courte

Un incendie génère deux types de biomasse lignocellulosique qu'il serait erroné de laisser se décomposer sur place en conditions naturelles.

Les bois brûlés directement et les rémanents carbonisés constituent la première ressource. Leur mobilisation rapide présente un double intérêt : éviter la décomposition anaérobie des bois morts qui produirait du méthane diffus non capté (GWP₁₀₀ = 27,9 — IPCC AR6), et alimenter les unités de pyrogazéification avec une biomasse déjà préséchée par la combustion partielle. La fenêtre de mobilisation est courte : 2 à 3 ans avant que les attaques phytosanitaires (scolytes, champignons) et la décomposition ne dégradent irrécupérablement la valeur énergétique du bois.

Les bois dépérissants dans les 2 à 5 ans post-incendie constituent la deuxième ressource. Les arbres stressés par la chaleur mais non immédiatement brûlés meurent progressivement. Ce gisement différé est prévisible, localisable, et doit être planifié dès maintenant dans les bilans d'approvisionnement des sites Résilience des zones concernées — Normandie, Pyrénées-Orientales, Gard, Landes — sans attendre la matérialisation du dépérissement.

Ordre de grandeur — gisement biomasse été 2026

- 110 000 ha brûlés × densité biomasse lignocellulosique estimée 30 à 80 t MS/ha (forêts méditerranéennes à garrigue) → 3 à 8 Mt de biomasse potentiellement mobilisable.
- Un site Résilience de 1 000 t/j traite ~350 000 t/an. Le gisement post-incendie été 2026 représente donc de l'ordre de 8 à 23 années-sites de traitement, à répartir sur la fenêtre 2026–2029 entre les sites de la zone Sud.
- Biochar co-produit potentiel (rendement ~25–30 %) : 0,75 à 2,4 Mt de biochar — soit 1,9 à 6,1 Mt CO₂eq séquestrés en sols agricoles méditerranéens. Cela compenserait partiellement les 5,5 à 16,5 Mt CO₂ émis par les incendies eux-mêmes.

Ces ordres de grandeur sont indicatifs et dépendent du type de végétation, de la densité forestière et du taux de biomasse mobilisable (accessibilité, qualité). Ils illustrent l'ampleur du gisement, pas un bilan certifié.

6bis.3 La contradiction réglementaire — un levier politique urgent

Le document souligne en §4.2 que la gestion active de la végétation combustible (débranchage, exploitation raisonnée) est prioritaire sur son maintien dans les versants méditerranéens. Ce constat se heurte à une contradiction réglementaire qui n'est pas mineure : l'interdiction de coupes et broyages du 15 mars au 15 août, destinée à protéger la faune nicheuse, couvre précisément la période de montée en puissance du risque incendie en zone méditerranéenne.

Cette interdiction a contribué à l'accumulation de combustible végétal qui a alimenté les incendies de l'été 2026. Ce n'est pas une contradiction mineure entre deux politiques publiques — c'est une contradiction entre deux impératifs de protection environnementale (faune nicheuse vs forêt) dont l'arbitrage actuel s'est avéré défavorable à la prévention.

Propositions de résolution — à intégrer dans le levier politique §7

- Dérogation encadrée pour les zones à risque incendie élevé (PPRIF) : autoriser les interventions de débroussaillage jusqu'au 1er juillet sous conditions (horaires, méthodes, signalement à la DDT) — sur le modèle des dérogations espèces protégées déjà accordées pour les projets d'énergie renouvelable.
- Valorisation économique comme incitation : une biomasse qui a une valeur de marché (énergie + biochar) est une biomasse que les propriétaires et collectivités ont intérêt à débroussailler. L'existence des sites Résilience transforme une obligation réglementaire de débroussaillage (souvent non respectée faute de débouchés) en une activité économiquement viable.
- Procédure d'urgence post-incendie : créer une procédure accélérée (< 3 mois) d'autorisation de mobilisation de biomasse brûlée sur les périmètres incendiés, hors calendrier de droit commun (15 mars–15 août). La fenêtre phytosanitaire impose une réactivité que le droit ordinaire ne permet pas.

Ce point rejoint le levier R.446-105 déjà identifié dans le corpus Résilience : les autorisations environnementales accélérées pour les sites Résilience doivent intégrer explicitement la mobilisation de biomasse post-incendie comme cas d'usage prioritaire. Source : Corpus Résilience V11 — Risque procédural biomasse forestière.

6bis.4 Le lien de causalité inversé — prévention par valorisation

Le constat du §4.2 peut être formulé avec plus de force dans le contexte de l'été 2026 : la végétation combustible non gérée qui a alimenté les incendies était, avant d'être brûlée, exactement la biomasse lignocellulosique que les sites Résilience auraient dû transformer en biométhane et en biochar.

Ce lien de causalité inversé est un argument politique de premier ordre : les incendies de l'été 2026 n'ont pas seulement libéré 5,5 à 16,5 Mt de CO₂ dans l'atmosphère — ils ont détruit une ressource énergétique et carbonique qui aurait pu, si elle avait été valorisée, séquestrer 1,9 à 6,1 Mt CO₂eq supplémentaires dans les sols agricoles méditerranéens tout en produisant de l'énergie locale.

La question posée aux décideurs n'est donc pas seulement : comment gérer les incendies après qu'ils ont eu lieu ? Elle est : quel dispositif économique crée l'incitation permanente à gérer la végétation avant qu'elle ne brûle ? La réponse de Résilience est la valorisation de cette biomasse : un territoire qui vend sa végétation combustible à un site de pyrogazéification est un territoire qui la débroussaillera. Le débroussaillage autofinancé par la vente d'énergie est la seule solution durable à l'accumulation de combustible — les obligations réglementaires de débroussaillage, rarement respectées faute de débouchés économiques, en sont la preuve a contrario.

6bis.5 Reconstruction hydrique post-incendie — rôle du biochar

La restauration du cycle hydrique des sols brûlés rejoint directement les mécanismes décrits en §2 et §4.1. La couche hydrophobe post-incendie se résorbe naturellement en 1 à 3 ans selon les précipitations — mais ce délai naturel est aussi celui du risque hydrique maximal (crues éclairs, érosion, lessivage des cendres riches en nitrates vers les nappes).

L'apport de biochar issu de la pyrogazéification de la biomasse brûlée elle-même crée une boucle de reconstruction particulièrement cohérente : la végétation combustible collectée sur le périmètre incendié est transformée en biochar, qui est réappliqué sur les sols brûlés pour reconstituer leur structure poreuse, accélérer la résorption de la couche hydrophobe et restaurer la capacité d'infiltration — tout en séquestrant durablement une fraction du carbone libéré par l'incendie.

Boucle de reconstruction hydrique post-incendie — cohérence Résilience

- Biomasse brûlée collectée (bois morts, rémanents, débroussaillage post-incendie) → pyrogazéification → biométhane (énergie locale) + biochar (amendement).
- Biochar appliqué sur sols brûlés : restructuration de la porosité, résorption accélérée de la couche hydrophobe, amélioration de la rétention hydrique de 10 à 40 % selon les études (voir §4.1).
- Réduction du risque crue post-incendie par restauration plus rapide de la capacité d'infiltration — bénéfice direct sur la sécurité des populations en aval.
- Séquestration nette partielle du carbone émis par l'incendie : le bilan CO₂ de l'incendie est réduit d'autant que la fraction convertie en biochar stable (H/Corg ≤ 0,4) est soustraite au cycle atmosphérique pour une durée millénaire.
- Revegetation accélérée : les sols enrichis en biochar retrouvent plus vite une couverture végétale dense qui protège contre l'érosion éolienne et hydrique en attendant la reconstitution forestière naturelle.

Cette boucle illustre la cohérence systémique mentionnée en §6 : Résilience traite énergie, carbone et territoire comme un système intégré. La biomasse post-incendie est le cas d'usage le plus immédiat et le plus visible de cette logique — un argument de communication politique majeur à l'automne 2026.

 **Note de mise à jour** — Le chiffre de 110 000 ha brûlés est provisoire au 10 août 2026. Le bilan définitif de la saison incendie 2026 est attendu fin septembre 2026 (EFFIS/Prométhée). Ce §6bis devra être mis à jour avec le bilan final avant toute diffusion institutionnelle. La trajectoires-co2.html mentionne un chiffre intermédiaire de 93 000 ha au 26 juillet — les deux chiffres doivent être harmonisés à la même date de référence.

Sources spécifiques à ce §6bis

EFFIS (European Forest Fire Information System) — Bilan incendies France 2026 · Prométhée (Observatoire de la forêt méditerranéenne) — données régionales · INRAE — Hydrologie post-incendie et restauration des sols · IRSTEA/INRAE — Biochar et sols post-incendie (études Bouches-du-Rhône 2017-2020) · Corpus Résilience V11 — Gisement national net V3 · Risque procédural biomasse forestière · Positionnement 150 Sites V1 (zones A/B/C/D) · Note Architecture Juridique CDR V5 · IPCC AR6 — GWP₁₀₀ CH₄ = 27,9 · Coefficients d'émission incendie forêt méditerranéenne.

L'irrigation par aspersion génère des pertes significatives par évaporation et dérive, davantage encore lorsqu'elle fonctionne en pleine journée sous forte chaleur. L'irrigation localisée (goutte-à-goutte) réduit ces pertes de façon importante. Pour les systèmes d'aspersion maintenus, irriguer la nuit ou en début de matinée réduit substantiellement les pertes par évaporation — un gain immédiat sans investissement supplémentaire.

L'ombrage des canaux d'irrigation ouverts réduit également l'évaporation de façon significative. En Espagne et en Inde, des canaux ont été couverts de panneaux solaires — double bénéfice : réduction de l'évaporation et production d'électricité sur des surfaces déjà artificialisées.

6. Ce que Résilience contribue indirectement

Le Programme Résilience 2045 n'est pas un programme hydrique — mais plusieurs de ses composantes contribuent directement à la résilience hydrique du territoire, sans que ce soit leur objectif premier.

La méthanisation des effluents d'élevage suivie de la séparation de phases constitue le premier co-bénéfice hydrique de la filière. Le digestat liquide mélangé au biochar avant épandage retient les nutriments azotés dans la zone racinaire et réduit structurellement leur lessivage vers les nappes et les cours d'eau. Ce cycle se substitue partiellement aux engrais azotés de synthèse — dont l'excédent non absorbé par les plantes est l'une des causes principales d'eutrophisation des eaux souterraines et superficielles. Moins d'engrais de synthèse, mieux retenus par le biochar : double gain pour la qualité de l'eau.

Le biochar co-produit par pyrogazéification, enfoui dans les sols agricoles, améliore structurellement leur capacité de rétention hydrique. Sur 150 sites produisant 11,5 à 13,5 Mt de biochar par an, l'impact sur les sols français serait significatif à l'échelle de la décennie — non seulement pour la séquestration carbone, mais pour la résilience hydrique des exploitations en période de canicule.

L'interception des résidus lignocellulosiques avant leur décomposition naturelle évite la réintroduction de leur carbone dans le cycle atmosphérique via le méthane et le CO₂ diffus, et convertit ces flux en biochar et en énergie. Ce faisant, elle supprime simultanément un combustible potentiel pour les incendies et un frein à la restauration des sols.

Le miscanthus, cultivé comme ressource pour la pyrogazéification, joue un rôle hydrique direct : ses bandes dans le paysage ralentissent le ruissellement, ses racines profondes maintiennent la structure du sol, et son cycle pérenne évite la perturbation annuelle des sols liée aux cultures conventionnelles.

Le maintien des prairies permanentes pâturées préserve des surfaces dont la capacité d'infiltration est supérieure à celle des terres labourées. Une prairie permanente non compactée infiltre 3 à 5 fois plus d'eau qu'une parcelle cultivée équivalente.

Ces contributions sont des co-bénéfices de la logique Résilience — pas son objectif central. Elles illustrent la cohérence systémique d'une approche qui traite énergie, carbone et territoire comme un système intégré plutôt que comme des sujets séparés.

7. Implications politiques — hiérarchie des leviers

Levier de premier rang — adapter les cultures au territoire. Avant toute infrastructure, la question de l'adéquation entre les cultures et la disponibilité réelle de l'eau doit être posée. Maintenir des cultures à fort besoin hydrique dans des zones en déficit structurel, avec une irrigation inefficace en plein jour, est une impasse agronomique et économique. Les politiques agricoles doivent accompagner la transition vers des cultures adaptées — et reconnaître que le miscanthus, le sorgho ou les légumineuses sèches ne sont pas des cultures de repli, mais des cultures d'avenir.

Levier de second rang — restaurer les sols et optimiser les effluents. Restaurer le capital organique des sols est le levier le plus large et le plus durable. La voie méthanisation + digestat liquide + biochar est supérieure à l'épandage direct de fumier sur tous les critères : moins d'émissions diffuses, moins de lessivage azoté, meilleure rétention hydrique, substitution partielle des engrais de synthèse. Les politiques agricoles doivent rémunérer ces pratiques et intégrer la qualité des nappes comme critère de performance agronomique. Les bénéfices économiques indirects peuvent être considérables, notamment par la réduction des dommages liés au ruissellement, aux crues et aux sécheresses, ainsi que des coûts d'infrastructure.

Levier de troisième rang — restaurer les zones humides et le bocage. La restauration des haies, ripisylves et zones humides est un investissement hydrologique à très haut rendement. Les politiques actuelles existent mais sont sous-financées et trop lentes.

Levier de quatrième rang — retenues et stockage de surface. Les retenues collinaires et zones d'expansion des crues sont des outils complémentaires utiles, mais leur impact reste local. Ils ne peuvent pas compenser l'absence de sols vivants et de zones humides.

Levier de cinquième rang — efficience de l'irrigation. La transition vers l'irrigation localisée, le changement des horaires d'aspersion et l'ombrage des canaux sont des gains immédiats à faible coût. Ils relèvent d'accompagnement technique et de financement de la transition.

Ce qui ne fonctionne pas : construire des infrastructures hydrauliques coûteuses sur des territoires dont les sols sont imperméables, les zones humides détruites, les cultures inadaptées et les effluents mal valorisés. L'infrastructure ne peut pas suppléer à l'écosystème, ni à l'agronomie.

Tableau de synthèse — Les six confusions les plus fréquentes

Confusion fréquente	Réalité physique	Conséquence politique
"Il pleut moins" — le problème est uniquement climatique	Le volume annuel a relativement peu évolué à l'échelle nationale jusqu'à présent. C'est la distribution temporelle, l'intensité des épisodes et la capacité d'absorption des sols qui ont changé. Le dérèglement climatique amplifie une vulnérabilité que nous avons construite.	On attend des solutions climatiques sans traiter la vulnérabilité hydrique construite par les pratiques agricoles et l'aménagement du territoire.
Les barrages et mégabassines résolvent le problème	Sans sols capables d'absorber l'eau et sans zones humides pour la tamponner, les infrastructures stockent une eau qui s'évapore ou ruisselle. Elles déplacent le problème sans le résoudre structurellement.	Investissement massif en infrastructure sur des territoires dont la capacité naturelle de rétention a été détruite. Coût élevé, efficacité limitée, conflits locaux.
Irriguer davantage compense la sécheresse	Une irrigation réalisée aux heures les plus chaudes entraîne des pertes importantes par évaporation et dérive. Sur un sol appauvri, l'eau ruisselle sans profiter à la plante. La bonne réponse est l'adaptation des cultures, pas l'augmentation du débit.	Conflits d'usage sur la ressource, coûts énergétiques croissants, rendements décroissants. Maintenir du maïs irrigué dans des zones en déficit structurel est une impasse agronomique.
Épandre le fumier directement sur le sol est la seule voie	Un fumier stocké en tas produit du méthane diffus et perd son azote par volatilisation. L'épandage direct expose les nitrates au lessivage vers les nappes. Le couple digestat liquide + biochar retient les nutriments dans la zone racinaire et réduit le lessivage de 20 à 40 %.	L'eutrophisation des nappes est partiellement liée à des pratiques d'épandage sous-optimales. La voie méthanisation + digestat + biochar est supérieure sur tous les critères hydrique, carbone et agronomique.
Laisser les résidus lignocellulosiques au sol restaure les sols	Les résidus fins contribuent à la matière organique. Les résidus épais se décomposent en réintroduisant leur carbone dans le cycle atmosphérique — sous forme de CO ₂ et, en conditions anaérobies, de CH ₄ . Leur conversion en	Confusion entre deux types de résidus aux destins optimaux différents. Les résidus lignocellulosiques sont mieux valorisés par

Confusion fréquente	Réalité physique	Conséquence politique
	biochar produit un amendement hydrique permanent et séquestre durablement une fraction du carbone.	pyrogazéification — leur biochar retourne au sol avec un effet durable.
Le problème de l'eau est distinct du problème des sols et des engrais	Le sol est le premier réservoir hydrique. Sa teneur en matière organique et en biochar détermine sa capacité à absorber et retenir l'eau ET les nutriments. Moins d'engrais de synthèse, mieux retenus : double gain pour la qualité de l'eau.	Les politiques agricoles, de l'eau et de l'énergie sont traitées séparément. La filière méthanisation + biochar est un levier simultané sur les trois — insuffisamment reconnu.

Cette note a été élaborée dans le cadre du Programme Résilience 2045 à partir du corpus de notes techniques V11 (mai-juillet 2026). Elle s'appuie sur les données du BRGM (eaux souterraines), de l'OFB (zones humides), de l'INRAE (sols agricoles et matière organique), de l'ONF (hydrologie forestière), de l'ADEME (méthanisation et digestats) et des études comparatives européennes sur la recharge des nappes. Les chiffres sont des ordres de grandeur représentatifs — ils doivent être lus comme des illustrations des mécanismes physiques, non comme des mesures précises.