

Pourquoi les puits naturels ne peuvent pas porter seuls la stratégie climatique de 2045 — et comment Résilience crée un puits carbone territorial supplémentaire, mesurable et souverain

Août 2026 · Version 5 · Usage institutionnel

Sources : IGN IFN 2025 · GIEC AR6 · Science (Lund/Stanford 2026) · Global Carbon Budget 2025 · CRCF UE (3 fév. 2026) · Programme Résilience V11

RÉSUMÉ EXÉCUTIF

Les politiques climatiques française et européenne reposent sur deux hypothèses fragilisées par les données scientifiques les plus récentes : (1) les puits forestiers constitueront un flux annuel de retrait supplémentaire garanti et croissant jusqu'en 2045 ; (2) ce qu'ils n'absorbent pas peut être compensé par des crédits carbone externes. Or les forêts constituent des stocks de carbone considérables et peuvent continuer à être des puits nets — mais leur capacité de retrait supplémentaire n'est ni illimitée ni garantie dans le temps. Et les forêts africaines ou amazoniennes vers lesquelles l'Europe envisage d'externaliser sont soumises aux mêmes perturbations climatiques croissantes, hors contrôle européen. Le Programme Résilience propose une troisième voie : transformer les flux de biomasse renouvelable du territoire en séquestration carbone permanente par pyrogazéification et biochar, complétée par la valorisation du CO₂ biogénique concentré produit sur chaque site. Le CRCF (UE, 3 février 2026) reconnaît explicitement le biochar comme Permanent Carbon Removal certifiable. Cette note démontre pourquoi cette voie est structurellement différente et non substituable par les politiques forestières ou les compensations externes.

1. Le diagnostic — Ce que les données disent réellement

1.1 Le puits forestier est en déclin — miser sur sa stabilité serait imprudent

Le rapport IGN 2025 (Mémento forestier) dresse un constat sans appel : en France, la mortalité des arbres a augmenté de 125 % en dix ans. La surface forestière s'étend, mais les forêts dépérissent. La production biologique chute, la régénération stagne, les jeunes peuplements souffrent de la pression du gibier et des sécheresses successives.

Ce puits net est aujourd'hui en déclin, alors même que les besoins de retrait de CO₂ augmentent. Il serait donc imprudent de construire la stratégie climatique de 2045 sur l'hypothèse de sa stabilité ou de son augmentation — indépendamment de la valeur comptable actuelle du bilan LULUCF.

Mais le problème est plus profond que la seule santé des arbres. Une étude publiée dans Science le 19 mars 2026 (Pascual et al., Lund University / Stanford University, DOI : 10.1126/science.adz8554) apporte une démonstration décisive sur les forêts suédoises boréales.

RÉSULTAT CLÉ — ÉTUDE SCIENCE 2026 (LUND / STANFORD)

Les forêts primaires étudiées en Suède contiennent 78 à 89 % de carbone de plus que les forêts gérées équivalentes. Mais l'essentiel de cet écart ne se trouve pas dans les arbres — il se trouve dans les sols, constitué au fil de plusieurs siècles d'accumulation lente. Dans les 60 premiers centimètres de sol d'une forêt primaire, on trouve autant de carbone que dans l'ensemble des arbres, bois morts et sol d'une forêt gérée comparable. Ce stock historique ne doit pas être confondu avec un flux annuel de retrait supplémentaire.

Ce résultat conduit à une distinction fondamentale pour la politique climatique, trop peu présente dans le débat public :

Concept	Ce que cela signifie
Stock historique de carbone	Carbone accumulé sur des siècles dans les arbres et les sols. Patrimoine carbone essentiel à préserver. Ne constitue pas automatiquement un flux annuel net supplémentaire — une forêt ancienne peut contenir énormément de carbone sans être pour autant un puits net important.
Capacité de retrait annuel net	Les forêts constituent des stocks considérables et peuvent continuer à être des puits nets. Mais cette capacité n'est ni illimitée ni garantie dans le temps, notamment sous l'effet des perturbations climatiques (sécheresses, scolytes, incendies). C'est ce flux net — et sa trajectoire — qui importe pour la stratégie 2045.
Implication politique	Il serait imprudent de faire reposer la stratégie climatique sur l'hypothèse que les forêts retireront davantage de CO ₂ dans les décennies futures qu'elles ne le font aujourd'hui — alors même que les données récentes montrent un déclin de ce flux.

Trois causes distinctes expliquent cet écart de 83 % — et leur distinction est essentielle pour ne pas mal interpréter l'étude :

- L'âge et le temps d'accumulation — une forêt primaire suédoise a des siècles devant elle pour accumuler du carbone dans ses sols. Une forêt en rotation courte (30–80 ans) n'a simplement pas eu le temps. Si on la laissait vieillir, elle accumulerait progressivement. Ce n'est pas la gestion qui détruit le stock : c'est la jeunesse relative du peuplement.
- Le compactage des sols par les engins lourds — les auteurs de l'étude l'identifient comme hypothèse centrale : les machines lourdes perturbent la structure du sol, réduisent l'activité microbienne et limitent le transfert du carbone vers les horizons profonds. C'est un effet mécanique de la gestion industrielle intensive — distinct de l'entretien léger.
- Le retrait de biomasse aérienne — couper de grands arbres réduit temporairement le stock aérien. Mais une jeune forêt en croissance absorbe du CO₂ plus vite qu'une forêt mature

proche de l'équilibre. Le stock aérien baisse à la coupe, mais la dynamique de croissance peut être plus favorable à moyen terme.

Ces distinctions ont une implication directe pour Résilience : le programme utilise exclusivement des engins légers décarbonés (tracteur ÉREV, porteurs câbles) qui évitent précisément le compactage des sols identifié comme l'une des causes principales du déficit carbone dans les forêts gérées industriellement. Ce n'est pas un détail technique — c'est une garantie écologique.

1.2 Les compensations externes ne sont pas une garantie de permanence

Face aux limites des puits domestiques, l'Union européenne envisage de recourir à des crédits carbone provenant de projets forestiers situés hors du territoire européen. Un crédit carbone forestier n'a de valeur que si le stock qu'il représente est permanent. Or cette permanence dépend de facteurs que l'Europe ne contrôle pas.

LE CAS AMAZONIEN — UN AVERTISSEMENT CONCRET

L'Amazonie a longtemps été considérée comme l'un des grands puits naturels de carbone de la planète. Plusieurs études convergentes montrent que l'Amazonie brésilienne est devenue source nette de carbone lors des extrêmes climatiques récents (sécheresses, incendies). Rosan et al. (Communications Earth & Environment, 2024) confirment que l'Amazonie du sud-est constitue une source nette sur la période 2010–2020, et que la forêt ancienne réduit son absorption pendant les sécheresses. Ce qui était un puits devient, certaines années, une source nette. Le problème climatique qui fragilise ces puits ne s'arrête pas aux frontières européennes.

Par ailleurs, le règlement européen sur la déforestation importée tarde à entrer en vigueur. Les États membres ont refusé un monitoring des forêts par satellite. Dans ce contexte, externaliser la responsabilité du stockage carbone vers des écosystèmes que l'Europe ne surveille pas constitue un risque stratégique.

- La permanence du stock n'est pas garantie hors territoire européen
- L'absence de destruction par incendie ne peut être assurée
- La gouvernance locale est hors contrôle européen
- Le monitoring est insuffisant — refus du satellite au niveau des États membres
- Le double comptage reste un risque réel dans les registres actuels

2. Ce que le GIEC reconnaît — et ce que la traduction politique retient

Le message scientifique complet de l'AR6 du GIEC est : réduire très fortement les émissions ET déployer des retraits durables de CO₂ pour compenser les émissions résiduelles difficiles à éliminer. Le GIEC écrit explicitement :

GIEC AR6 WG3 — CITATION DIRECTE

"The deployment of CDR to counterbalance hard-to-abate residual emissions is unavoidable if net zero CO₂ or GHG emissions are to be achieved."

Dans le débat public, ce message devient souvent « il faut sortir des fossiles ». Ce n'est pas faux — mais c'est incomplet. L'AR6 signale également que différentes méthodes de CDR présentent des niveaux de permanence très différents. C'est sur ce critère que Résilience construit son positionnement.

Type de stockage / méthode	Caractéristiques
Stockage réversible (forêts, sols)	Stock dynamique, utile et à préserver. Ne doit pas être assimilé à une séquestration permanente sur des siècles. Sa vulnérabilité aux incendies, sécheresses et maladies est reconnue par le GIEC.
Séquestration par biochar certifié (critères EBC, H/Corg ≤ 0,4)	Carbone pyrogénique produit dans des conditions contrôlées (température ≥ 550°C). Sa permanence est démontrée par caractérisation analytique et protocole de suivi — pas postulée a priori. Reconnu par le CRCF UE (3 fév. 2026) comme Permanent Carbon Removal.
Séquestration géologique (minéralisation type CarbFix)	Carbone minéralisé dans la roche basaltique ou stocké en formation géologique. Permanence plurimillénaire. Complémentaire du biochar pour le CO ₂ biogénique concentré produit sur les sites Résilience.
Avantage décisif de Résilience	La pyrogazéification territoriale est un mécanisme de CDR dont la permanence (certifiée EBC), la traçabilité (monitoring par site) et la gouvernance (territoire français, cadre CRCF) sont pleinement maîtrisables par l'Europe — ce qu'aucune compensation externe ne peut garantir.

3. Ce que Résilience apporte de structurellement différent

3.1 La logique de base — ne pas confondre stock et flux

Résilience ne propose pas de remplacer la forêt ni de l'exploiter davantage. Il part d'un constat différent : les biomasses que le territoire produit ou doit retirer pour des raisons sylvicoles, agricoles ou de prévention incendie se décomposent actuellement en libérant leur carbone dans l'atmosphère en quelques décennies. La pyrogazéification transforme une partie de ce carbone en biochar stable — créant un retrait net durable que ni la forêt ni les compensations externes ne peuvent garantir.

Scénario	Bilan carbone et valeur produite
Forêt laissée en libre évolution	La biomasse fine non récoltée se décompose et libère son carbone dans l'atmosphère sur quelques

	décennies — bilan neutre sur ce cycle court. Le flux net supplémentaire d'une forêt à biomasse stabilisée est faible, même si la forêt conserve un stock considérable et peut rester un puits net à long terme.
Gestion active + pyrogazéification (biomasse fine < 10–12 cm uniquement)	Biochar stable dont la permanence est démontrée par caractérisation EBC ($H/C_{org} \leq 0,4$). Bilan négatif. La biomasse qui aurait été décomposée devient du carbone soustrait durablement à l'atmosphère. Les gros bois morts (> 20–30 cm) sont préservés intégralement.
Triple flux de valeur par site	1. Biométhane → carburant ÉREV et flexibilité réseau électrique 2. Biochar → séquestration certifiable + amendement sols agricoles (amélioration rétention eau et fertilité face aux sécheresses) 3. CO ₂ biogénique concentré → valorisation industrielle, serre et séquestration géologique (voir §3.2)

3.2 Le CO₂ biogénique concentré — la troisième voie de séquestration

Chaque site de pyrogazéification produit, au-delà du biométhane et du biochar, un flux de CO₂ biogénique pur et concentré. Ce flux présente une caractéristique décisive : il est disponible sous forme concentrée, sans les coûts de capture énergétique qui grèvent les projets de capture sur des flux dilués. Les 150 sites génèrent ainsi environ 35 Mt CO₂/an de CO₂ biogénique concentré selon les estimations V11. Ce volume est disponible sous forme pure sur chaque site — mais son bénéfice carbone net dépend de sa destination : seule la fraction orientée vers la séquestration géologique (minéralisation, stockage en formation profonde) constitue un retrait durable additionnel certifiable ; la fraction valorisée en serres ou en industrie contribue à la réduction d'émissions fossiles sans séquestration permanente.

Destination du CO ₂ biogénique concentré	Usage et mécanisme	Nature du bénéfice carbone
Serres et agriculture sous abri	Substitution directe au CO ₂ fossile utilisé pour la fertilisation carbonique. Valorisation économique immédiate. Réduit les émissions fossiles locales.	Valorisation économique — réduction d'émissions
Industries et chimie verte	Industries alimentaires (boissons), chimie verte, production de carburants synthétiques (Sabatier). Substitution du CO ₂ fossile, raccourcissement des cycles biogéniques.	Réduction d'émissions — stockage temporaire
Séquestration géologique (minéralisation, CarbFix)	Injection dans des formations basaltiques ou salines profondes.	Séquestration permanente additionnelle

	Minéralisation permanente. Complémentaire du biochar : additif sur les sites à sous-sol favorable ou dotés d'une infrastructure de transport.	
Bilan combiné (150 sites)	23 Mt CO₂/an (biochar, séquestration certifiée permanente) + fraction du CO₂ biogénique concentré orientée vers la séquestration géologique (minéralisation, CarbFix). Le reste du CO₂ biogénique contribue à la réduction d'émissions fossiles par substitution. Ces flux s'additionnent sur le même territoire, avec la même infrastructure.	Retrait permanent certifié (biochar) + réduction d'émissions (substitution) + séquestration additionnelle (CO₂ géologique) — sans dépendre d'aucun écosystème étranger

3.3 La boucle économique territoriale — l'innovation de fond

La dimension la plus originale de Résilience n'est pas technologique — elle est économique. La pyrogazéification crée une valeur économique pour les biomasses d'entretien qui, sans débouché, restent une charge pour les exploitants. Ce renversement permet de contractualiser non pas seulement l'achat de biomasse, mais le service d'entretien lui-même.

Dimension	Description
Modèle actuel (sans Résilience)	Entretien des bordures, inter-rangs, interfaces forestières, bandes DFCI → COÛT pour l'exploitant. Biomasse fine abandonnée sur place ou brûlée → émissions différées. 73 % des propriétaires forestiers privés français ne disposent pas d'un document de gestion agréé (Plan Simple de Gestion ou équivalent CNPF), faute notamment de débouché économique pour les petites coupes.
Modèle Résilience (contrat territorial)	Entretien → biomasse collectée → pyrogazéification → énergie + biochar + CO ₂ concentré → valeur économique → financement de l'entretien. Le contrat peut porter sur le service d'entretien, pas seulement sur la livraison de matière. L'entretien devient partiellement une activité productive.
Bénéfices simultanés de la boucle	Réduction de la concurrence hydrique et nutritive de la végétation spontanée + réduction de la charge combustible (risque incendie) + amélioration de la régénération forestière +

	revenus stables pour l'exploitant + séquestration carbone certifiable.
Le cas Zone C — méditerranéen	Dans les zones DFCI, le site paie le propriétaire forestier pour enlever la biomasse combustible. La sylviculture préventive — aujourd'hui subventionnée par l'État à 60–80 % — devient économiquement rationnelle sans subvention. La dépense publique devient un revenu privé productif.

3.4 Les trois niveaux de gisement — architecture sécurisée

Le programme ne repose pas sur une ressource unique. Il s'appuie sur trois niveaux complémentaires dont la mobilisation peut être progressive et conditionnelle :

Niveau / Type	Contenu et logique	Potentiel estimé
Niveau 1 — Biomasses résiduelles (priorité absolue)	Rémanents forestiers < 10–12 cm, résidus agricoles, déchets verts, biodéchets, boues STEP, CIVE, pailles. Gisements documentés (IGN, FCBA, GRDF, ADEME). Mobilisables immédiatement.	~220–242 TWh/an (262 TWh avec Sabatier)
Niveau 2 — Biomasses d'entretien territorial	Bordures, inter-rangs, interfaces forestières, bandes DFCI, haies bocagères. Gisement existant non valorisé. Contractualisation via service d'entretien. Reconversion viticole (64 000 ha arrachés sans débouché).	~30–60 TWh/an (Bloc D, Zones B+C)
Niveau 3 — Cultures de transition (terres marginales)	Miscanthus sur terres en déprise ou ex-vignes hors usage alimentaire. Biomasse socle régulière sur contrats 15 ans. Sécurise l'activité des sites en complément des flux résiduels variables. Prioritairement sur terres en déprise, terres marginales ou anciennes terres agricoles dont la vocation alimentaire n'est plus économiquement ou climatiquement viable. Le miscanthus ne requiert ni pesticides ni herbicides après implantation.	~18–58 TWh/an (marge de sécurité optionnelle)
TOTAL — Plafond crédible 2045	Niveaux 1+2. Les gisements de niveau 3 sont une marge optionnelle — non nécessaire pour atteindre l'objectif système de 295 TWh.	~310–380 TWh/an

3.5 La trajectoire de déploiement — séquentielle et sécurisée

Phase	Contenu	Séquestration estimée
Phase 0 — Démonstrateurs 2025–2028	Validation technologique (craquage des goudrons, caractérisation biochar, bilan CO ₂ biogénique). Sites pilotes : Normandie (Zone A) et Gard (Zone C — double mission DFCI).	—
Phase 1 — Déploiement industriel 2029–2033	35 sites uniquement en Zone A (Grand Ouest bocager, Grand Est forestier, Massif Central). Risque logistique minimal, gisement multi-sources éprouvé.	~5 Mt CO ₂ /an (biochar) + CO ₂ biogénique valorisé
Phase 2 — Déploiement élargi 2034–2040	115 sites supplémentaires en Zones A, B et C. Intégration zones méditerranéennes (DFCI), territoires en reconversion viticole et agricole, miscanthus sur terres marginales.	~23 Mt CO₂/an (biochar) + jusqu'à 35 Mt CO₂ géologique

4. Réponses aux objections prévisibles

4.1 « La forêt gérée stocke moins de carbone que la forêt naturelle »

Cette objection repose sur une confusion entre deux activités catégoriquement différentes : exploiter et entretenir.

L'étude suédoise publiée dans Science (2026) compare des forêts primaires à des forêts soumises à des coupes commerciales régulières — c'est-à-dire des forêts exploitées pour en sortir du bois d'œuvre ou de l'énergie. C'est dans ce contexte que la forêt gérée stocke moins de carbone que la forêt primaire, notamment dans les sols. Ce constat est scientifiquement fondé et Résilience ne le conteste pas.

Mais Résilience ne propose pas d'exploitation supplémentaire. Il propose l'entretien de la biomasse fine — rémanents de coupes existantes, bois mort récent diffus, broussailles, ronciers — qui sans intervention se décompose en libérant son carbone sur quelques décennies, bloque la régénération naturelle et augmente la charge combustible. Ces deux activités ont des effets radicalement différents sur le stock forestier : l'exploitation en sort du carbone ; l'entretien retire ce qui aurait de toute façon émis.

Paradoxalement, un entretien bien conduit améliore la capacité de la forêt à constituer du stock à long terme : en libérant les jeunes plants de la concurrence de la végétation spontanée, il permet aux arbres patrimoniaux de se développer et aux vieux peuplements de se régénérer. Le programme préserve intégralement les gros bois morts (seuil garanti de 20–30 m³/ha), les arbres-habitats, la litière et les zones humides. Ce n'est pas de la sylviculture d'exploitation — c'est du soin forestier.

4.2 « La ressource biomasse est insuffisante pour 150 sites »

Le gisement central de 262 TWh repose sur des flux résiduels documentés (IGN, FCBA, GRDF, ADEME). Les gisements de niveau 1 couvrent seuls plus de 30 % de l'objectif. Les niveaux 1 et 2 combinés atteignent 80–90 %. Le programme n'a besoin du niveau 3 que comme marge de sécurité optionnelle. Par ailleurs, la reconversion viticole (64 000 ha arrachés sans débouché) et le

débroussaillage DFCI (3 à 5 Mt MS/an actuellement abandonnés sur place dans les zones méditerranéennes) constituent des gisements existants non valorisés — pas des ressources à créer.

4.3 « C'est concurrent de la politique forestière »

La logique est inverse. Sans débouché économique pour la biomasse fine d'entretien, 73 % des propriétaires forestiers privés n'ont pas de plan de gestion agréé (source CNPF) — et leurs forêts restent en grande partie non entretenues. Un site de pyrogazéification crée la boucle économique qui rend l'entretien viable : entretien → biomasse → énergie + biochar → revenus → financement de l'entretien. La régénération est facilitée. La gestion active est une condition de la résilience forestière — pas son ennemi.

4.4 « Le biochar ne dure pas 5 000 ans »

Résilience ne postule pas une durée universelle. La permanence du carbone pyrogénique est démontrée par caractérisation analytique : rapport H/Corg $\leq 0,4$ (critères EBC Premium), température de pyrolyse $\geq 550^{\circ}\text{C}$, propriétés mesurées sur chaque lot. Le CRCF européen (3 février 2026) reconnaît explicitement le biochar produit selon ces critères comme Permanent Carbon Removal certifiable. C'est un cadre de certification fondé sur des mesures — pas une hypothèse.

4.5 « Les volumes de séquestration sont insuffisants »

Les 23 Mt CO₂/an de séquestration biochar s'additionnent au potentiel de séquestration du CO₂ biogénique concentré produit sur les mêmes sites — sans infrastructure de capture supplémentaire. Le programme ne prétend pas résoudre seul l'ensemble du bilan carbone français. Il apporte ce qu'aucune autre politique ne fournit aujourd'hui : une séquestration permanente, certifiable et maîtrisable à l'échelle du territoire national, en complément indispensable de la réduction des émissions fossiles — exactement ce que le GIEC AR6 désigne comme inévitable.

5. Conclusion — L'apport spécifique de Résilience

Le changement climatique impose de revoir la manière dont nous considérons les puits de carbone. Les forêts constituent des stocks essentiels et doivent être préservées. Mais leur capacité à fournir un retrait net croissant de CO₂ ne peut être considérée comme garantie — les données montrent qu'elle se dégrade. Les compensations externes exposent la stratégie européenne à des risques géopolitiques et climatiques hors contrôle.

Résilience introduit quatre changements de logique :

- Ne plus confondre stock et puits — une forêt peut contenir énormément de carbone sans constituer un flux annuel de retrait supplémentaire garanti
- Ne plus confondre émission évitée et retrait durable — remplacer les fossiles est utile, mais ne se substitue pas à une séquestration permanente certifiable
- Ne pas faire dépendre toute la stratégie climatique des puits naturels — leur capacité future est exposée aux mêmes dérèglements que nous cherchons à combattre
- Créer des puits supplémentaires à partir des flux territoriaux — biomasses résiduelles, d'entretien et de transition transformées en énergie, biochar et CO₂ biogénique valorisable

POSITION DE RÉSILIENCE

Résilience ne cherche pas à remplacer le puits forestier — il cherche à éviter que la stratégie climatique française et européenne en dépende exclusivement. La pyrogazéification territoriale est un mécanisme de CDR dont la permanence (biochar certifié EBC), la traçabilité (monitoring par site) et la gouvernance (territoire français, cadre CRCF) sont pleinement maîtrisables par l'Europe — ce qu'aucune politique forestière domestique ni aucune compensation externe ne peut garantir. Elle produit simultanément de l'énergie renouvelable, finance l'entretien du territoire, réduit le risque incendie, améliore la résilience agronomique des sols — et séquestre durablement du CO₂ par deux voies complémentaires (biochar + CO₂ biogénique concentré). C'est cette convergence — énergie + carbone + territoire + souveraineté — qui rend le modèle structurellement différent des politiques carbone classiques.

Sources et documents de référence

GIEC AR6 WG1 (2021), AR6 WG3 ch.3 : CDR inevitable · Global Carbon Budget 2025 (Friedlingstein et al.) · Pascual et al., Science 2026, vol.391 n°6791 pp.1256-1261, DOI:10.1126/science.adz8554 (Lund/Stanford) · IGN Memento forestier 2025 · Gatti et al., Nature 2021 (DOI:10.1038/s41586-021-03629-6) · Rosan et al., Commun. Earth Environ. 2024 (DOI:10.1038/s43247-024-01205-0) · CRCF UE 3 fev. 2026 · EBC Premium · Programme Resilience V11 (mai 2026) · Gisement national net V3 (juin 2026) · Note biomasse V4 (juillet 2026) · Positionnement 150 sites V1 (juin 2026) · Note puits carbone V2 · Cadre gestion écologique active V11 · resilience2045.fr