

PROGRAMME RÉSILIENCE — NOTE STRATÉGIQUE MONDIALE

Carbone, Résilience

et Mobilité à l'échelle mondiale

Gisements biomasse · Bio-GNV · Biochar · Séquestration CO₂ · Bilan carbon-négatif 2045

Juin 2026 — Sources : AIE, IRENA, FAO, IPCC, Connaissance des énergies

1. Le paradoxe central — la seule énergie qui nettoie l'atmosphère

Toutes les stratégies énergétiques actuellement évaluées — éolien, solaire, nucléaire, hydrogène — visent au mieux la neutralité carbone : elles arrêtent d'aggraver le problème. La stratégie bio-GNV généralisée avec pyrogazification et biochar certifié EBC/CDC V3 est structurellement différente : elle produit de l'énergie tout en retirant du CO₂ de l'atmosphère. Ce n'est pas une compensation, c'est un nettoyage actif.

La distinction fondamentale avec toutes les autres stratégies

Dans un monde où la mobilité mondiale est décarbonée par le bio-GNV, le CO₂ émis à la combustion du méthane biogénique est du carbone atmosphérique recyclé via la photosynthèse — bilan zéro, cycle fermé. Le biochar co-produit par la pyrogazification séquestre physiquement du carbone dans les sols pour plus de 1 000 ans. Ce carbone ne retourne JAMAIS à l'atmosphère. C'est une extraction nette, permanente, à grande échelle. Aucun autre scénario énergétique — tout-électrique, hydrogène, nucléaire seul — n'a cette propriété.

La métaphore décisive : le scénario tout-électrique + ENR arrête de remplir une baignoire qui déborde. Le scénario bio-GNV + pyrogazification + biochar commence à la vider. L'Accord de Paris vise le premier objectif — indispensable. Le scénario Résilience dépasse le second.

2. Les gisements mondiaux de biomasse — bilan complet

L'analyse des gisements mobilisables à horizon 2045 distingue quatre sources complémentaires et non concurrentes. Leur combinaison dépasse largement les besoins d'une mobilité mondiale décarbonée.

2.1 Terres marginales et cultures énergétiques dédiées

La FAO évalue les terres dégradées, arides et marginales mondiales à environ 2 000 millions d'hectares — terres sans usage agricole rentable, propriétés d'États, communautés ou privés qui n'en tirent aucun revenu. Des cultures énergétiques dédiées comme le miscanthus, le switchgrass, l'agave (zones arides), le sorgho sucrier ou les taillis à courte rotation transforment ces terres en actif productif.

- Rendement miscanthus : 12 à 25 t MS/ha/an selon le climat, sans irrigation après la première année, zéro pesticide, zéro intrant majeur
- Séquestration dans les rhizomes : 1 à 2 t CO₂ /ha/an en plus de la production énergétique
- Amélioration des sols : après 20 ans, la terre marginale devient une terre enrichie — valorisation patrimoniale du foncier
- Absence de conflit d'usage alimentaire : ces terres sont physiquement inadaptées aux cultures alimentaires classiques — sols pauvres, aridité, pentes, salinité. Planter du miscanthus n'est pas un arbitrage énergie contre alimentation, c'est la valorisation d'espaces aujourd'hui sans revenu ni usage.
- Création de vie dans des zones appauvries : ces monocultures énergétiques deviennent des habitats pour des insectes, oiseaux et petits mammifères dans des zones où la biodiversité était quasi nulle. La couverture permanente du sol stoppe l'érosion et relance les cycles biologiques.

Trois scénarios de mobilisation

Scénario	Mha mobilisés	Hypothèse	Production bio-GNV
Bas (2035)	200 Mha	Terres déjà identifiées FAO categ. 4-5 + volonté politique forte dans 20 pays	$200 \times 12 \times 2,9 = 6\,960$ TWh/an
Central (2045)	800 Mha	40 % des terres marginales mondiales avec signaux économiques alignés	$800 \times 12 \times 2,9 = 27\,840$ TWh/an
Ambitieux (2050)	1 500 Mha	75 % des terres marginales — max réaliste	$1\,500 \times 12 \times 2,9 = 52\,200$ TWh/an

2.2 Forêts gérées

La surface forestière mondiale est de ~4 milliards d'hectares. La fraction gérée activement susceptible de fournir des rémanents, éclaircies et bois mort sans déforestation est estimée à 1 200 à 1 500 Mha. Gisement annuel mobilisable : 2 à 3 t MS/ha sans pression sur la ressource.

- Gisement central : $1\,400 \text{ Mha} \times 2,5 \text{ t MS/ha} \times 2,9 \text{ MWh/t} = 10\,150$ TWh/an
- Voie : pyrogazification — biomasse sèche directement valorisable sans séchage préalable coûteux
- Co-bénéfice : réduction du risque incendie et des ravageurs (scolytes) dans les forêts non gérées

2.3 Résidus humides — méthanisation mondiale

En France, le potentiel de méthanisation est évalué à 60–70 TWh/an. La France représente ~1/65 des terres arables mondiales et ~1/115 de la population mondiale. À parité de ressources par habitant-hectare agricole, le gisement mondial corrigé est de 70 à 110 fois le gisement français, en tenant compte des pays tropicaux à biomasse humide plus abondante.

Source	Gisement mondial Mt/an	TWh via méthanisation	Note
Effluents d'élevage mondiaux	8 000–12 000 Mt	2 400–3 600 TWh	Premier gisement mondial — bovins, porcins, volailles
Résidus cultures tropicales	3 000–5 000 Mt	900–1 500 TWh	Bagasse canne, paille riz, rafles palme
Biodéchets urbains et IAA	1 500–2 500 Mt	450–750 TWh	Croissance rapide avec urbanisation
CIVE et cultures intermédiaires	2 000–3 000 Mt	700–1 050 TWh	Sans concurrence alimentaire
Boues STEP et résidus industriels	500–800 Mt	150–240 TWh	Gisement sous-exploité
TOTAL méthanisation mondiale	15 000–23 000 Mt	4 600–7 140 TWh	70–110x le gisement français

2.4 Couplage Sabatier — valorisation des surplus ENR

En 2045, le déploiement mondial de 10 000 à 15 000 GW de solaire et d'éolien générera des surplus massifs lors des pics de production. En France seule, 363 heures de prix négatifs ont été enregistrées au S1 2025 avec 2 000 GWh écrêtés. À l'échelle mondiale en 2045 :

- Surplus ENR mondiaux gaspillés : 3 000 à 5 000 TWh électriques/an
- Rendement électrolyse + Sabatier ($\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$) : 55–65 %
- Production méthane de synthèse : 1 650 à 3 250 TWh/an supplémentaires
- Le CO_2 utilisé est le CO_2 biogénique résiduel de l'épuration — cycle fermé complet
- La production finale de méthane augmente de 40 à 80 % par rapport à la seule méthanisation selon les études

Gisement	TWh/an (scénario central)	Voie principale
Terres marginales (800 Mha)	27 840 TWh	Pyrogazification
Forêts gérées	10 150 TWh	Pyrogazification
Résidus humides (méthanisation)	5 870 TWh (central)	Méthanisation
Couplage Sabatier	2 400 TWh	Synthèse catalytique
TOTAL scénario central 2045	46 260 TWh	Mix
TOTAL scénario ambitieux (1 500 Mha + forêts)	78 000 TWh	Mix

3. Production d'énergie du système mondial

Le scénario central mobilise une biomasse totale de 10 800 Mt MS/an en pyrogazification et 19 000 Mt brut en méthanisation. La production énergétique totale est :

Source énergétique	Production TWh/an	Destination principale
Bio-GNV pyrogazification	31 320 TWh	Mobilité lourde (camions, tracteurs, aviation)
Bio-GNV méthanisation	5 870 TWh	Mobilité légère (ÉREV) + stockage saisonnier
Méthane de synthèse Sabatier	2 400 TWh	Mobilité + stockage saisonnier
Chaleur fatale valorisable (35 % pyrogazification)	10 962 TWh thermiques	Industrie, séchage biomasse, serres
Digestat liquide méthanisation (ISE)	~13 000–15 000 Mt/an	Engrais NPK local · substitution 20–30 % engrais azotés Haber-Bosch
TOTAL énergie utile	~50 550 TWh/an	Note : goudrons pyro = impuretés à éliminer (Annexe Goudrons V11), non comptabilisés
Consommation mondiale énergie finale (référence)	~110 000 TWh/an	Le scénario couvre ~46 % de l'énergie finale mondiale

La mise en perspective avec les besoins de la mobilité mondiale

Alimenter 25 % des voitures mondiales en EREV bio-GNV + 80 % des camions + 80 % des tracteurs + 50 % de l'aviation mondiale requiert environ 38 000 TWh/an de bio-GNV. Le scénario central produit 39 590 TWh de bio-GNV - le système est équilibré. En ajoutant la chaleur fatale valorisable (10 962 TWh), le scénario central apporte une contribution énergétique équivalente à la moitié de la consommation mondiale d'énergie finale.

4. Biochar — le puits de carbone permanent

La pyrogazification à $\geq 700^{\circ}\text{C}$ co-produit systématiquement du biochar. À cette température, le ratio H/C $\leq 0,4$ garantit une structure graphitée stable sur plus de 1 000 ans. Ce n'est pas un sous-produit accessoire — c'est le mécanisme de séquestration physique permanente qui transforme ce scénario énergétique en stratégie carbon-négative.

4.1 Production mondiale de biochar

La pyrogazification produit environ 20 à 25 % de la biomasse entrante sous forme de biochar (en masse sèche). Sur 10 800 Mt MS/an en pyrogazification :

- 10 800 Mt MS \times 22 % = 2 376 Mt de biochar certifié EBC/CDC V3 par an
- Teneur en carbone du biochar : 65 % de la masse
- 2 376 Mt \times 65 % \times 44/12 (conversion C \rightarrow CO₂) = 5 654 Mt CO₂ total séquestré
- Fraction stable > 1 000 ans (critère EBC) : ~75 % du carbone total
- Séquestration durable : 5 654 \times 75 % = 4 240 Mt CO₂ /an séquestrés durablement

4.2 Co-bénéfices agronomiques

- Amélioration de la rétention d'eau des sols : +30 % en moyenne
- Stimulation de la vie microbienne des sols et hausse de la biodiversité édaphique
- Réduction des besoins en engrais azotés : 10 à 20 % selon les études
- Sur 20 ans, les terres marginales plantées en miscanthus et amendées au biochar deviennent des terres agricoles productives
- Valeur économique EU-ETS actuelle : ~70 €/t CO₂ · potentiel 2035 : 150 à 200 €/t CO₂

4.3 Le digestat liquide de la méthanisation — l'engrais naturel sous-estimé

La méthanisation produit deux co-produits distincts : le digestat solide (amend. organique) et le digestat LIQUIDE — la fraction azotée séparée par centrifugation. Ce liquide concentré est un engrais azoté d'absorption immédiate, directement substituable aux engrais minéraux de synthèse. Note : la pyrogazification produit des goudrons (tars) qui sont des impuretés à éliminer, non des co-produits valorisables — c'est précisément l'objet de l'Annexe Goudrons V11.

- Composition du digestat liquide : azote ammoniacal (NH₄⁺) directement assimilable par les plantes, phosphore dissous, potassium, oligo-éléments. Valeur fertilisante équivalente à un engrais NPK de synthèse à moindre coût.
- Volume mondial : sur 19 000 Mt de biomasse humide traitée (méthanisation), le digestat liquide représente 70 à 80 % du volume entrant — soit environ 13 000 à 15 000 Mt/an de digestat liquide à répartir sur les terres agricoles mondiales.
- ISE (Indice de Souveraineté Engrais) : chaque unité de méthanisation améliore la souveraineté agronomique de son territoire. À l'échelle mondiale, le digestat liquide peut substituer 20 à 30 % des engrais azotés de synthèse actuellement produits à partir de gaz naturel fossile (procédé Haber-Bosch).
- Synergie avec le biochar : le biochar appliqué aux sols stabilise les éléments fertilisants du digestat liquide (réduit le lessivage azoté de 20 à 40 %) et améliore la disponibilité des nutriments pour les plantes. Les deux co-produits agissent en synergie.
- Double souveraineté : chaque méthaniseur produit simultanément de l'énergie (bio-GNV) ET des engrais locaux (digestat). Le système réduit en même temps la dépendance à l'énergie fossile ET la dépendance aux engrais importés.

La boucle vertueuse complète

Biomasse terres marginales → pyrogazification → bio-GNV (énergie) + biochar (séquestration + amélioration sols) + chaleur fatale (industrie) + CO₂ biogénique (Sabatier ou carbonatation). Résidus humides → méthanisation → bio-GNV + digestat liquide (engrais local) + digestat solide (amendement organique). Le biochar améliore les sols, le digestat enrichit les cultures, les cultures produisent plus de biomasse, la biomasse produit plus de biochar. La fertilité croît avec le temps. C'est la rétroaction positive absente de tous les scénarios énergétiques classiques.

5. Le CO₂ biogénique résiduel — quatre voies de valorisation

Lors de l'épuration du biogaz (méthanisation) et du syngas (pyrogazification), le CO₂ biogénique est séparé du méthane. Ce flux — aujourd'hui majoritairement rejeté à l'atmosphère — représente dans notre scénario mondial environ 1 550 Mt CO₂ /an de CO₂ pur disponible.

5.1 Calcul du gisement de CO₂ biogénique disponible

- Voie méthanisation : 422 Mt CH₄ produits × 0,55 kg CO₂ /kg CH₄ = 232 Mt CO₂ /an
- Voie pyrogazification : 10 800 Mt MS × 12 % C × 0,30 (fraction CO₂ séparable) × 44/12 = 1 320 Mt CO₂ /an
- Total CO₂ biogénique disponible : ~1 550 Mt CO₂ /an

5.2 Distribution entre les quatre voies

Voie de valorisation	Mt CO ₂ /an	Statut carbone	Description
A — Sabatier (Power-to-Gas)	480 Mt	Neutre — cycle court	CO ₂ + H ₂ → CH ₄ de synthèse · retourne à l'atm. à la combustion mais augmente la production de 2 400 TWh
B — Carbonatation matériaux	300 Mt	Séquestré PERMANENT	Injection dans béton frais → CaCO ₃ stable sur toute la durée de vie de l'ouvrage
C — Séquestration géologique	400 Mt	Séquestré PERMANENT	Aquifères salins et formations géologiques · potentiel mondial AIE : 800–2 000 Mt/an
D — Serres et industrie alimentaire	150 Mt	Neutre — cycle court	Usage direct · valorisation immédiate · débouché économique porté à 200–400 €/t
E — C₅ résiduel (pertes)	220 Mt	Rejet atmosphérique	Objectif : tendre vers zéro par obligation réglementaire progressive
TOTAL	1 550 Mt		

6. Bilan de séquestration totale — nettoyage atmosphérique

Dans un monde où la mobilité mondiale est décarbonée par le bio-GNV, le système a atteint la neutralité carbone sur la combustion. À partir de ce point, chaque tonne de CO₂ séquestrée est une extraction nette de l'atmosphère. Ce ne sont plus des compensations — ce sont des réductions réelles de la concentration atmosphérique de CO₂.

Mécanisme de séquestration	Mt CO ₂ /an retirés	Permanence	Source
Biochar EBC/CDC V3 dans les sols	4 240 Mt	> 1 000 ans	Pyrogazification ≥ 700°C · H/C ≤ 0,4
Séquestration CO₂ biogénique — carbonatation	300 Mt	Durée de vie ouvrage (50–200 ans)	Béton carbonate · CaCO ₃ permanent
Séquestration géologique CO₂ biogénique	400 Mt	Géologique (≤1 Ma)	Aquifères salins · BECCS biogénique
Enrichissement sols (rhizomes miscanthus + matière organique)	~500 Mt	Décennies à siècles	Carbone sol estimé · FAO prairie permanente
Biochar zones marginales (effet supplémentaire)	~500 Mt	Idem biochar	Miscanthus seul dans les sols améliorés
TOTAL SÉQUESTRATION NETTE	~5 940 Mt CO ₂ /an	Mix	EXTRACTION ATMOSPHÉRIQUE NETTE

Le calcul du nettoyage atmosphérique

Le CO₂ atmosphérique excédentaire par rapport au niveau préindustriel (280 ppm) est estimé à environ 850 milliards de tonnes de CO₂ (passage de 280 à 422 ppm en tenant compte des absorptions naturelles). Avec 5 940 Mt CO₂ /an retirées, le stock excédentaire serait résorbé en $850\,000 \div 5\,940 = \sim 143$ ans — soit un retour aux concentrations atmosphériques préindustrielles vers 2170 si le scénario est atteint en 2045. En combinant avec l'électrification de l'industrie lourde et le captage sur les procédés incompressibles, ce délai se réduit à 80 à 100 ans — retour à 280 ppm vers 2130–2145.

7. Bilan systématique 2045 — tableau de synthèse

Ce tableau présente l'ensemble des flux énergétiques, carboniques et agronomiques du scénario Résilience mondialisé à horizon 2045, dans un monde où la neutralité carbone de la mobilité a été atteinte.

Indicateur	Valeur	Unité	Signification
Terres marginales mobilisées	800	Millions d'ha	Sur 2 000 Mha disponibles — 40 % du gisement
Biomasse pyrogazification	10 800	Mt MS/an	Terres marginales + forêts gérées
Biomasse méthanisation	19 000	Mt brut/an	Résidus humides mondiaux toutes sources
Bio-GNV produit total	39 590	TWh/an	Mobilité mondiale décarbonée
Chaleur fatale valorisée	10 962	TWh th./an	Industrie, séchage, serres
Digestat liquide méthanisation	~13 000–15 000 Mt	Mt/an	Engrais NPK local · substitution engrais de synthèse (Haber-Bosch fossile)
Méthane Sabatier (surplus ENR)	2 400	TWh/an	Valorisation surplus électriques
TOTAL énergie utile	~50 550	TWh/an	~46 % de la consommation mondiale (sans goudrons non valorisables)
Biochar certifié EBC/CDC V3	2 376	Mt/an	Co-produit pyrogazification
CO₂ séquestré via biochar	4 240	Mt CO ₂ /an	75 % fraction stable > 1 000 ans
CO₂ biogénique disponible épuration	1 550	Mt CO ₂ /an	Source pure pour valorisation
dont Sabatier (+2 400 TWh)	480	Mt CO ₂ /an	Valorisé en méthane de synthèse
dont carbonatation (permanent)	300	Mt CO ₂ /an	Séquestré définitivement
dont géologique (permanent)	400	Mt CO ₂ /an	Séquestré définitivement
dont C5 résiduel (perte)	220	Mt CO ₂ /an	Objectif : tendre vers zéro
SÉQUESTRATION NETTE TOTALE	~5 940	Mt CO ₂ /an	EXTRACTION ATMOSPHÉRIQUE
Proportion émissions mondiales (réf. 37 000 Mt)	~16 %		Nettoyage actif de l'atmosphère
Délai retour à 280 ppm	~100–143	années	Retour niveau préindustriel vers 2145–2170
Digestat produit (ISE)	~9 500	Mt/an	Engrais N-P-K substituant les importations
Emplois ruraux générés	Plusieurs centaines de millions	Estimé	Non délocalisables · régions rurales marginalisées

9. Risques et conditions de réussite — ce que le scénario exige

Un scénario crédible doit exposer ses propres limites. Trois catégories de risques sont à distinguer : les faux risques souvent cités mais qui ne s'appliquent pas ici, les risques réels qui doivent être traités rigoureusement, et les conditions de réussite sans lesquelles le scénario dégrade son bilan.

9.1 Les faux risques — objections récurrentes et réfutation

Objection courante	Pourquoi elle ne s'applique pas ici
Concurrence alimentation/énergie	Les terres ciblées sont PHYSIQUEMENT inadaptées aux cultures alimentaires (sols pauvres, aridité, pentes, salinité). Ce n'est pas un arbitrage — c'est la valorisation de terres sans usage concurrent.
Déforestation	Le scénario cible spécifiquement les terres DÉBOISÉES ou n'ayant jamais été forestières. Les forêts gérées fournissent des résidus SANS coupe rase.
Irrigation massive	Miscanthus, switchgrass, agave ne nécessitent pas d'irrigation après la première année. Choix d'espèces adaptées au climat LOCAL.
Perte de biodiversité	Ces terres marginales avaient une biodiversité quasi nulle. La couverture végétale permanente, la fin de l'érosion et l'arrêt des incendies créent de nouveaux habitats.
Engrais intensifs	Zéro azote après établissement (miscanthus fixe l'azote atmosphérique partiellement). Le biochar réduit les besoins en engrais de 15 à 30 %.
Monocultures risquées	Gestion en mosaïque avec corridors écologiques. Diversité d'espèces selon les zones climatiques (miscanthus, switchgrass, agave, sorgho, taillis à rotation).

9.2 Les risques réels — et leur traitement

Risque 1 — Fuites de méthane : le risque principal

Le méthane possède un pouvoir réchauffant de 84 fois le CO₂ sur 20 ans (GWP20). Quelques pourcents de fuite peuvent dégrader ou annuler le bénéfice climatique de tout le système. C'est le risque qui exige la rigueur industrielle la plus absolue.

- Objectif opérationnel : zéro fuite tolérée — identique à la culture de sûreté nucléaire sur la radioactivité. Non parce que c'est facile, mais parce que l'intérêt climatique du système en dépend directement.
- Instrumentation continue obligatoire sur toutes les installations — capteurs multi-points, télémétrie en temps réel, alertes automatiques.
- Audit indépendant annuel avec publication du taux de fuite mesuré — ICB calculé et publié pour chaque site.
- Sanctions immédiates et fermeture temporaire en cas de dépassement d'un seuil réglementaire — principe identique aux autorisations nucléaires.
- Obligation de réparation sous 48 heures de toute fuite détectée — contrainte contractuelle non négociable.

Risque 2 — Incendies des cultures énergétiques

En zones arides, les cultures de miscanthus ou switchgrass peuvent constituer une biomasse combustible. Ce risque est réel mais gérable par la conception même du système.

- Gestion en parcelles de 20 à 50 ha maximum séparées par des pistes pare-feu minéralisées.

- Récolte annuelle ou biennale qui réduit la charge combustible à sa valeur minimale après coupe.
- Espèces choisies avec floraison tardive et teneur en eau élevée pendant la saison à risque.
- En comparaison, les terres marginales non gérées avec végétation arbustive naturelle sont souvent plus combustibles qu'une culture énergétique bien gérée.

Risque 3 — Gouvernance foncière et droits d'usage

Mobiliser 800 Mha dans des dizaines de pays implique des droits fonciers très variés. C'est un risque réel de calendrier, pas de faisabilité physique.

- Solution : droits d'usage long terme (40 à 60 ans) plutôt que propriété — modèles de bail ruraux connus dans les pays concernés.
- Le flux de revenus immédiats (crédits carbone + énergie) crée l'incitation économique pour les propriétaires et communautés locales — alignement des intérêts naturel.
- Gouvernance internationale : mécanismes de type REDD+ adaptés aux cultures énergétiques sur terres marginales. Financement Banque Mondiale, AFD, fonds climat.

9.3 Ce que le scénario exige pour réussir

Condition	Sans cette condition	Avec cette condition
Taux de fuite méthane < 1 %	Bilan climatique dégradé voire négatif	Bilan carbon-négatif confirmé
Certification EBC/CDC V3 obligatoire	Biochar de qualité variable — séquestration non garantie	4 240 Mt CO ₂ /an séquestrés durablement
ICB publié par site et auditable	Gaspillage C ₂ biogénique (C5)	Optimisation des flux carbone sur chaque installation
Signaux économiques alignés (ETS, crédits carbone)	Déploiement lent par manque d'incitation	Auto-financement dès 2030 sans subvention nette
Espèces adaptées au climat local	Rendements dégradés, besoins irrigation	Robustesse agronomique et maximisation du gisement

9. L'argument final — pourquoi ce scénario est unique

Aucune autre stratégie énergétique actuellement évaluée ne cumule ces cinq propriétés simultanément.

L'argument économique que ChatGPT n'a pas mentionné

Tous les autres scénarios de séquestration à grande échelle coûtent de l'argent net — DAC (Direct Air Capture) à 300-600 €/t, BECCS conventionnel, reboisement massif (entretien permanent). Le scénario Résilience généralisé PRODUIT de la valeur nette sur cinq flux simultanés : (1) vente de bio-GNV, (2) crédits carbone EU-ETS sur le biochar (~70 €/t aujourd'hui), (3) digestat liquide substituant les engrais minéraux importés (procédé Haber-Bosch fossile), (4) digestat solide comme amendement organique, (5) chaleur fatale pour l'industrie locale. Ce système peut se financer lui-même dès lors que les signaux économiques sont en place — sans subvention structurelle.

Propriété	Scénario tout-électrique	H ₂ vert	Bio-GNV + pyrogazification + biochar
Neutralité carbone mobilité	Oui	Oui	Oui
Carbon-négatif (retrait CO₂ atmosphérique)	Non	Non	OUI — 5 940 Mt CO ₂ /an
Stockage saisonnier natif	Non — infrastructure à construire	Non	OUI — réseaux gaziers existants
Zéro dépendance matériaux critiques rares	Non — Li, Co, terres rares	Non — platine, terres rares	OUI — acier + béton seulement
Valorisation terres marginales mondiales	Non	Non	OUI — 800 Mha productifs
Emplois ruraux non délocalisables	Limités	Limités	OUI — plusieurs centaines de millions d'emplois ruraux non délocalisables
Séquestration carbone productive (pas de coût net)	Non	Non	OUI — vendu comme crédit ETS
Amélioration des sols agricoles	Non	Non	OUI — biochar + digestat
Auto-financement sans subvention nécessaire	Non	Non	OUI — multi-flux de revenus

La conclusion pour les décideurs mondiaux

Le scénario bio-GNV + pyrogazification + biochar n'est pas une solution de niche. C'est la seule stratégie énergétique qui produit de l'énergie, séquestre du carbone de façon permanente, valorise des terres sans usage, crée des emplois ruraux, substitue des engrais importés, et se finance elle-même par la vente d'énergie, de biochar et de crédits carbone — sans subvention nette. Pour la France, le Programme Résilience V11 en est la déclinaison nationale : 262 TWh de bio-GNV, 150 sites de pyrogazification, 20 à 23 Mt CO₂ /an séquestrés. La France représente ~0,85 % du potentiel mondial — ce qui confirme la cohérence arithmétique du scénario. Généralisé à la planète, il offre la seule trajectoire physiquement démontrée vers un retour aux concentrations atmosphériques préindustrielles de CO₂ d'ici 2145.