

Programme Résilience 2045

De la transition énergétique à la gestion permanente du carbone

Résilience V11 · Fusion Helion · He-3 · Refroidissement · Usages irréductibles du bio-CH₄ — Synthèse prospective V2

Document de travail — Juillet 2026

La question de départ — et la double réponse inattendue

La question initiale était simple : le refroidissement des centrales nucléaires sera-t-il un problème croissant avec le changement climatique ?

La réponse a ouvert deux perspectives complémentaires :

1. La fusion Helion D-He3 réduit radicalement le besoin de refroidissement grâce à la conversion directe d'énergie. Mais elle ne l'élimine pas totalement — les 30% résiduels nécessitent toujours un puits froid.
2. Même si la fusion réussit pleinement et l'électricité devient abondante, il reste des usages où les molécules carbonées renouvelables sont physiquement irremplaçables : aviation long-courrier, lanceurs spatiaux, industrie haute température, stockage saisonnier, séquestration carbone.

Ces deux perspectives convergent vers la même conclusion : le Programme Résilience V11 n'est pas un programme de transition qui disparaît quand la fusion arrive. C'est un programme dont la pertinence évolue sans jamais s'effacer.

1. Le refroidissement des centrales — Un problème physique inévitable

La loi de Carnot ne négocie pas : tout convertisseur d'énergie thermique en travail a besoin d'une source froide. Quand l'environnement se réchauffe, le problème s'aggrave structurellement.

1.1 L'état actuel et les projections

- **Parc fluvial sous contrainte** : 12 réacteurs sur cours d'eau à débit faible. Indisponibilités climatiques multipliées par 3 à 4 d'ici 2050 (EDF / Cour des Comptes). En 2022, certains sites ne pouvaient plus rejeter leurs effluents faute de débit suffisant.
- **La bonne solution pour la France** : l'implantation côtière. La mer est un puits froid infini et stable (15–20°C même en canicule). Les nouveaux EPR2 sont délibérément en bord de Manche/Atlantique. C'est un choix physique, pas politique.
- **Ce qui ne fonctionne pas à 45°C** : le refroidissement à air (SMR Holtec ACC). Le ΔT entre condenseur et air ambiant s'effondre à 45°C — la puissance de sortie s'effondre avec lui. En Méditerranée en 2045 : inutilisable.
- **Désalinisation solaire vs nucléaire-désalinisation** : dans un pays plein de soleil, le couplage PV + osmose inverse est physiquement et économiquement bien plus logique. L'osmose inverse électrique se couple directement au solaire sans cycle thermique. La demande en eau est maximale exactement quand le soleil est maximal.

Solution	Besoin eau	Maturité	Contrainte 45°C	Remarque clé
Circuit fermé + tour évaporation (nouveaux SMR, EPR2)	Faible (x30 moins)	✅ TRL 9	Réduite mais pas nulle	Obligatoire pour tous les nouveaux réacteurs français. Résout la contrainte fluviale, pas la canicule.
Implantation côtière / maritime (Penly, Gravelines, Paluel)	Mer = puits froid infini	✅ Disponible	Stable — mer 15–20°C même en canicule	La vraie solution pour la France. Choix délibéré pour les nouveaux EPR2 en bord de Manche.
Couplage désalinisation solaire (Méditerranée)	Zéro	✅ TRL 9 — déployé	Aucune — soleil maximal quand eau manque	Plus logique que nucléaire-désalinisation. PV + osmose inverse directe. Déjà déployé Maroc, Espagne, Israël.
SMR refroidissement à air (Holtec ACC)	Zéro	🟡 TRL 7–8	❌ Critique Rendement effondré ΔT condenseur/air nul	Fonctionne en Utah (air sec, 25°C). En Méditerranée à 45°C : inutilisable. La physique ne négocie pas.
Reconversion circuit ouvert → hybride	Moyen	✅ TRL 9 — coûteux	Amélioration partielle	Des centaines de M€ par réacteur. EDF juge inenvisageable pour le parc existant.
Fusion Helion D-He3 (conversion directe 70%)	Très faible (30% résiduel)	🟡 TRL 6–7 2028–2035	Réduite — 30% à évacuer vs 65% classique	Circuit sel fondu → CO ₂ supercritique pour les 30% résiduels. Puits froid réduit d'un facteur 3. Rupture thermodynamique.
Fusion D-He3 abondant (conversion ~95%)	Quasi nul	🔴 TRL 5–6 2040–2060	Quasi inexistante (~5%)	Avec He-3 abondant, la contrainte thermodynamique devient marginale. En espace : zéro puits froid (rayonnement).

2. La fusion Helion — Une rupture thermodynamique

Helion Energy (contrat Microsoft pour 2028) propose une rupture qui va bien au-delà d'une amélioration du refroidissement.

2.1 La conversion directe — Ce qui change fondamentalement

Dans une centrale classique, 100% de l'énergie passe par un cycle thermique et la totalité de l'énergie non convertie en travail doit être évacuée vers l'environnement. Helion fait autre chose : la réaction D-He3 produit des particules chargées qui induisent directement un courant électrique — sans jamais passer par une source chaude au sens de Carnot.

Ce qui change fondamentalement avec Helion

- Les 70% captés par conversion directe ne génèrent pas de chaleur à évacuer — ils ne passent jamais par un cycle de Carnot.
- Les 30% résiduels (neutrons + chaleur) doivent aller quelque part — circuit sel fondu → CO₂ supercritique → puits froid.
- Mais 30% d'un système de 500 MWe, c'est comparable à une petite centrale à gaz — pas à un EPR de 1 650 MW.
- La contrainte sur le puits froid est réduite d'un facteur 3 à 4. Ce n'est pas une amélioration marginale — c'est un changement de nature thermodynamique.
- En espace : zéro puits froid requis. Le rayonnement cosmique dissipe la chaleur résiduelle. La fusion D-He3 est idéale pour la propulsion interplanétaire.

2.2 L'He-3 — La trajectoire vers ~95% de conversion directe

Phase Helion	Réaction	Conversion directe	Signification
Génération actuelle (gen 6-7)	D-He3 terrestre limité	~70%	Les 70% captés directement ne génèrent pas de chaleur à évacuer. Les 30% résiduels (neutrons + chaleur) nécessitent un circuit de refroidissement — comparable à une petite centrale à gaz, pas à un EPR.
Transition 2030-2040	D-T + capture He-3 (désintégration tritium 12,3 ans)	~70%	Les réacteurs D-T de première génération produisent du tritium → He-3. Le parc devient sa propre fabrique d'He-3. La transition est auto-alimentée.
Mature 2040-2060	D-He3 abondant (lunaire ou produit)	~95%	Réaction quasi-aneutronique : D + He3 → He4 (3,6 MeV) + proton (14,7 MeV). Tous deux particules chargées, directement convertibles. Refroidissement résiduel (~5%) marginal.
Long terme 2050+	D-He3 lunaire (régolites : millions de tonnes)	~95%+	Le vent solaire a bombardé la Lune 4 milliards d'années. Régolites : 0,01-0,05 ppm He-3. Millions de tonnes disponibles. Motivation réelle (rarement avouée) des programmes Artemis et des ambitions lunaires chinoises.
Espace (propulsion)	D-He3 ou fusion plasma	~95%+	En espace : zéro puits froid requis — le rayonnement cosmique dissipe la chaleur résiduelle. La fusion est idéale pour la propulsion interplanétaire. SpaceX utilise déjà le méthane liquide (Raptor) pour la Terre — la fusion prendra le relais dans l'espace.

L'He-3 lunaire — la motivation inavouée des programmes spatiaux

Le vent solaire a bombardé la Lune pendant 4 milliards d'années sans atmosphère pour le filtrer.

Les régolites lunaires contiennent 0,01-0,05 ppm He-3 — des millions de tonnes au total.

L'intérêt stratégique de l'He-3 lunaire est l'une des vraies motivations (rarement avouée) derrière les programmes Artemis et les ambitions chinoises sur la Lune.

Un parc de réacteurs D-T de première génération deviendrait une source d'He-3 pour la deuxième génération — la transition est auto-alimentée.

3. Les usages irréductibles du bio-CH₄ — Ce que l'électricité ne peut pas faire

C'est l'argument central que la version précédente de cette note sous-estimait. Même dans un monde où la fusion Helion réussit pleinement et l'électricité devient abondante et quasi-gratuite, il reste des usages où les molécules carbonées renouvelables sont physiquement irremplaçables.

La raison n'est pas économique. Elle n'est pas technologique. Elle est physique : densité énergétique massique, puissance instantanée au décollage, températures de procédé, durée de stockage, permanence de la séquestration.

Usage	Pourquoi l'électricité ne suffit pas	Densité énergétique comparée	Solution	Remarque
Aviation long-courrier (Paris-New York, 9 000 km)	Densité massique physique : batterie Li-ion = 0,9 MWh/t vs kérosène = 11,9 MWh/t → facteur 13×	Bio-GNL : 5,9 MWh/L 2,5× supérieur à H ₂ liquide	Bio-GNL (~-162°C)	Même avec électricité gratuite, l'énergie doit être stockée à bord sous forme dense. Aucune batterie ne peut atteindre la densité du kérosène. Bio-GNL = seule option crédible à horizon 2045.
Lanceurs spatiaux (décollage — SpaceX Starship)	Puissance instantanée : 33 moteurs Raptor = 230 t poussée	Méthane liquide : PCI 50 MJ/kg + LOX	Bio-méthane liquide	SpaceX a déjà choisi le méthane (CH ₄ /LOX) pour Starship — pour sa densité, sa production renouvelable possible, et

Usage	Pourquoi l'électricité ne suffit pas	Densité énergétique comparée	Solution	Remarque
	chacun Puissance totale ~100 GW → impossible en batterie	oxydant		sa compatibilité avec la production in-situ sur Mars. En espace : la fusion D-He3 prendra le relais pour la propulsion longue distance.
Transport maritime longue distance (>10 000 km)	Autonomie : batterie = ~500 km max vs trajet Asie-Europe = 20 000 km → impossible sans escale tous les 500 km	Bio-GNL : autonomie ~10 000-15 000 km par plein	Bio-GNL maritime	Le GNL est déjà en déploiement massif (MSC, CMA-CGM, Carnival). La transition fossile → bio-GNL est invisible : même moteurs, même infrastructure.
Industrie haute température (>800°C) acier, ciment, verre, céramiques	Résistances électriques inefficaces au-delà de 1 200°C Arc électrique coûteux et instable pour les grands volumes	Bio-CH ₄ : flexibilité thermique 800-1 600°C	Bio-CH ₄ process HT	La sidérurgie, le ciment et le verre représentent ~15% des émissions industrielles mondiales. L'électrification directe est possible pour certains procédés mais pas tous. Bio-CH ₄ = irremplaçable pour les hautes températures.
Stockage saisonnier hiver → printemps	Batteries = 4-8h max L'hiver dure 3 mois → facteur 250× insuffisant	GRDF : 130 TWh stockage naturel cavités salines	Bio-CH ₄ réseau GRDF	Aucune technologie électrique ne peut assurer le stockage intersaisonnier à ce coût et à cette échelle. Le réseau GRDF existant est un actif stratégique irremplaçable.
Séquestration CO ₂ historique (880 Gt carbone en excès)	L'électricité ne séquestre pas le CO ₂ La fusion non plus Les arbres séquestrent mais les décomposent en 50-200 ans	Biochar : 500-5 000 ans de séquestration stable et certifiée	Biochar EBC co-produit pyrogazéification	Même avec fusion abondante, le CO ₂ historique accumulé dans l'atmosphère reste. Le biochar est l'une des rares réponses physiquement crédibles. Son rôle devient la finalité principale du programme après 2045.
CO ₂ biogénique concentré (co-produit pyrogazéification)	L'électricité ne produit pas de CO ₂ biogénique pur concentré La fusion non plus	CO ₂ biogénique déjà capté par photosynthèse	Serres, bétons, Sabatier, CCS bio	Le CO ₂ biogénique issu de pyrogazéification sort concentré à 15-25% — coût de captage 3 à 5× inférieur au CO ₂ industriel dilué. Utilisable pour serres agricoles, minéralisation bétons, Sabatier ou stockage géologique.

Le cas SpaceX — un choix déjà fait

SpaceX a délibérément choisi le méthane liquide (CH₄/LOX) pour le moteur Raptor et le Starship — et non le kérosène de Falcon 9.

Les raisons sont exactement celles du Programme Résilience : densité énergétique supérieure au kérosène sur le ratio PCI/volume, production renouvelable possible (méthane de synthèse ou bio-méthane), et compatibilité avec la production in-situ sur Mars (CO₂ + H₂O → CH₄ + O₂ par réaction de Sabatier).

Un moteur électrique pour le décollage est physiquement impossible : les 33 moteurs Raptor du Super Heavy produisent une puissance instantanée d'environ 100 GW. Aucune batterie ne peut fournir cette puissance dans une masse et un volume acceptables.

En espace, la fusion D-He3 prendra le relais pour la propulsion longue distance — mais le décollage depuis la Terre restera l'apanage des carburants chimiques denses, bio-méthane en tête.

4. La boucle bouclée — Résilience V11 et fusion : une séquence cohérente

Résilience V11 et la fusion Helion ne se concurrencent pas. Ils se succèdent dans une trajectoire où le rôle du bio-CH₄ évolue sans jamais disparaître.

Phase	Horizon	Énergie dominante	Rôle du bio-CH ₄ V11	Contrainte refroidissement
1	2025-2045	Bio-CH ₄ + ÉREV + nucléaire existant ENR massives (~144 GW)	Énergie principale Stockage saisonnier 130 TWh Biochar : séquestration carbone Aviation + PL + maritime	Problème aigu pour le parc fluvial Nouveaux EPR2 circuit fermé / côtier
2	2030-2040	Fusion génération 1 (Helion D-He3 terrestre)	Toujours dominant Complémentaire fusion naissante Usages irréductibles : aviation, lanceurs, industrie HT	Refroidissement résiduel ~30% Circuit sel fondu → CO ₂ supercritique Puits froid réduit facteur 3
3	2040-2060	Fusion génération 2 (D-He3 abondant) Électricité quasi-illimitée	Rôle recentré mais permanent : • Aviation long-courrier (densité) • Lanceurs spatiaux (puissance) • Industrie HT (>800°C) • Gestionnaire carbone (biochar)	Conversion directe ~95% Refroidissement résiduel ~5% Contrainte quasi nulle
4	2050+	Fusion D-He3 lunaire Électricité abondante Fusion spatiale (propulsion plasma)	Rôle permanent et irréductible : • Séquestration CO ₂ historique • Aviation + lanceurs Terre • CO ₂ biogénique valorisé • Biochar = finalité durable	Contrainte quasi nulle Fusion spatiale : zéro puits froid (rayonnement cosmique)

L'argument fondamental — La robustesse à sa propre obsolescence partielle

Supposons que la fusion Helion réussisse pleinement d'ici 2040-2050. L'électricité devient abondante. Le refroidissement n'est plus un problème.

Le Programme Résilience V11 devient-il inutile ? Non — et voici pourquoi en trois points :

1. La densité énergétique ne change pas avec la fusion. Un Paris–New York avec des batteries reste physiquement impossible. Un décollage de Starship avec des moteurs électriques aussi. Le bio-GNL et le bio-méthane restent irremplaçables pour ces usages.
 2. Le CO₂ historique accumulé dans l'atmosphère (880 Gt de carbone en excès) ne disparaît pas avec la fusion. Il doit être retiré activement. Le biochar séquestre ce carbone pour 500 à 5 000 ans — et c'est un co-produit de la filière bio-CH₄, pas un coût supplémentaire.
 3. Le CO₂ biogénique concentré produit par la pyrogazéification est une ressource unique : il sort déjà pur, sans dépense d'énergie pour le concentrer. Utilisable pour les serres, les bétons (minéralisation permanente), le Sabatier ou le stockage géologique.
- Quand l'énergie devient abondante, le rôle du bio-CH₄ évolue — il passe d'énergie principale à gestionnaire permanent du carbone atmosphérique. Sa pertinence ne diminue pas. Elle change de nature.

5. Les ENR — Leur rôle propre dans un monde fusion

La fusion et le nucléaire produisent une électricité abondante et pilotable. Mais ils partagent une contrainte que les ENR n'ont pas : ils ne peuvent pas aller partout. Un réacteur Helion ne se pose pas sur un toit à Marrakech, sur un flotteur au large de Marseille ou sur une ferme en Beauce. Cette capillarité géographique est la valeur intrinsèque et permanente des ENR — elle ne disparaît pas avec l'abondance d'électricité centralisée.

5.1 Solaire + désalinisation — La synergie physique parfaite

Le soleil est maximal exactement là où l'eau est rare et exactement quand la demande est maximale. L'osmose inverse électrique se couple directement au PV sans cycle thermique — et sans puits froid. Ni la fusion ni le nucléaire n'offrent cet avantage sur ce créneau spécifique.

- **Déjà déployé massivement** : Maroc, Espagne, Israël, Émirats. L'osmose inverse solaire est aujourd'hui la moins chère pour produire de l'eau douce dans les zones ensoleillées.
- **Lien avec V11** : le stress hydrique croissant (–10 à –40 % du débit des rivières d'ici 2050–2070 en France) rend la désalinisation solaire indispensable dans le Midi méditerranéen — là où les centrales nucléaires fluviales seront les plus contraintes.

5.2 Biomasse algale côtière — Un gisement complémentaire non alimentaire

Les algues marines affichent un rendement photosynthétique 5 à 10× supérieur aux plantes terrestres en biomasse par hectare. Elles ne nécessitent ni terres agricoles, ni eau douce, ni engrais azotés. Couplées au solaire pour l'électricité auxiliaire, elles constituent un gisement biomasse potentiel non concurrent de l'alimentation.

- **Méthanisation** : les algues humides sont idéales pour la méthanisation (pas pour la pyrogazéification qui préfère les lignocellulosiques secs). Complément naturel au gisement V11.
- **CO₂ biogénique** : capté depuis le CO₂ dissous en mer. Valorisable en Sabatier, serres, minéralisation bétons. Boucle carbone fermée.
- **France** : côtes Atlantique et Méditerranée. La Bretagne produit déjà des macroalgues. La filière énergie est embryonnaire mais cohérente avec V11.

5.3 ENR + Sabatier — Transformer l'intermittence en molécules

Dans V11, les électrolyseurs Sabatier absorbent déjà 40 TWh de surplus ENR curtilés pour produire du méthane de synthèse. Avec la fusion qui arrive, ce flux peut augmenter : l'électricité fusion assure la base, les ENR curtilées alimentent les électrolyseurs, et les deux convergent vers la même molécule stockable dans le réseau GRDF.

- **Le triangle stable** : ENR (production capillaire distribuée) + Fusion (production centralisée pilotable) + Bio-CH₄ (stockage saisonnier + gestion du carbone). Trois niches physiquement différentes et complémentaires. Aucune ne remplace les deux autres.

Application ENR	Avantage physique irréductible	Lien avec V11	Remarque
Désalinisation solaire (PV + osmose inverse)	Soleil maximal = eau rare = été. Couplage direct sans cycle thermique. Zéro puits froid.	Méditerranée française. Alternative aux rivières sous contrainte. Synergique V11.	Déjà déployé massivement (Maroc, Espagne, Israël, EAU). Option la moins chère pour eau douce en zones ensoleillées. Ni fusion ni nucléaire n'offrent cet avantage.
Biomasse algale côtière (macroalgues + microalgues)	Rendement 5–10× plantes terrestres. Zéro terre agricole, zéro eau douce, zéro engrais azotés.	Méthanisation V11. CO ₂ biogénique → Sabatier. Gisement non alimentaire.	Côtes Atlantique et Méditerranée françaises. Idéal pour la méthanisation. Bretagne : filière macroalgues embryonnaire mais cohérente avec V11.
ENR + Sabatier (Power-to-Gas)	Valorise les surplus intermittents. Électricité → molécule stockable.	Déjà 40 TWh V11 via Sabatier. Peut monter avec fusion.	Surplus ENR + électricité fusion → électrolyseurs → méthane → GRDF. Les trois sources (ENR, fusion, biomasse) convergent vers le même vecteur

Application ENR	Avantage physique irréductible	Lien avec V11	Remarque
	Zéro curtailment.	Converge vers le réseau GRDF.	stockable.
Agrivoltaïsme (double usage agricole + solaire)	Pas de compétition foncière. Gain irrigation (ombre partielle). Revenu complémentaire.	Synergique avec V11. Agriculteur = acteur énergétique. Compatible biomasse en bordure.	50–80 TWh/an potentiel France (V11 Complément 2). Réglementation en cours. Compatible avec cultures de biomasse en bordure de champ.
ENR distribuées (toits, zones isolées, Outre-Mer)	Capillarité géographique totale. Là où fusion et nucléaire ne vont pas. Autonomie locale.	Non compétitif avec V11. Même philosophie : utiliser l'existant local.	Réunion, Guadeloupe, Martinique, Guyane : ENR + stockage bio-CH ₄ = autonomie complète. Modèle exportable aux pays du Sud.

6. Conclusion — Le XXIe siècle comme siècle de la gestion du carbone

Synthèse finale

Les transitions énergétiques du XIXe et du XXe siècle avaient un objectif : produire davantage d'énergie.

La transition du XXIe siècle a un objectif supplémentaire : gérer durablement le carbone déjà présent dans l'atmosphère.

Le Programme Résilience V11 s'inscrit dans cette transition avec une cohérence rare :

- Il utilise l'infrastructure existante pour remplacer le fossile sans rupture visible (2025–2045)
- Il produit un stockage saisonnier que rien d'autre ne peut remplacer (130 TWh GRDF)
- Il couvre les usages irréductibles que l'électricité ne peut pas assurer (aviation, lanceurs, industrie HT)
- Il séquestre du carbone atmosphérique en permanence via le biochar (23 Mt CO₂/an)
- Il valorise le CO₂ biogénique concentré — ressource unique et irremplaçable
- Il prépare le terrain pour la fusion en réduisant la pression sur le réseau électrique
- Et il reste pertinent même si la fusion réussit pleinement

C'est cette propriété — la robustesse à sa propre obsolescence partielle — qui fait du Programme Résilience une pièce structurante de la transition énergétique mondiale.

Non pas parce qu'il est irremplaçable comme source d'énergie. Mais parce qu'il est irremplaçable comme outil de gestion du carbone.

Références

- Programme Résilience V11 — Document consolidé (mai 2026) · Gisement national net V3 (juin 2026)
- Helion Energy — Technologie FRC (Field-Reversed Configuration) · Contrat Microsoft 2028
- SpaceX — Moteur Raptor CH4/LOX · Starship : choix du méthane pour densité et production renouvelable
- ASNR — Impact de la sécheresse sur les centrales nucléaires (2024)
- Cour des Comptes / EDF — Indisponibilités climatiques ×3–4 à horizon 2050
- Holtec International — SMR-300 Air-Cooled Condenser system (2024)
- CNRS LPSC Grenoble — MSFR, programmes SAMOFAR / SAMOSAFER
- IAEA — Status of Molten Salt Reactor Technology (2023)
- INRAE — Sécheresse, crise énergétique et nucléaire en France (2023)
- NASA / ESA — Artemis programme : He-3 comme motivation stratégique de l'exploration lunaire