

PROGRAMME RÉSILIENCE 2045

Annexe technique — Verrou des goudrons

ADDENDUM — PARTIE 7

Du démonstrateur à l'unité industrielle 24/7 :
Le fossé critique — Acteurs requis — Stratégie Phase 1

Juin 2026 — Complément à l'Annexe Goudrons V11 (mai 2026)
Analyse fondée sur les lauréats GRDF (janvier 2026) et les retours d'expertise terrain

Partie 7 — Du démonstrateur à l'unité industrielle 24/7 : le fossé critique

L'Annexe Goudrons V11 a correctement identifié le verrou technique et la stratégie de validation Phase 0. Elle n'aborde pas un second fossé, tout aussi critique : **le passage entre un démonstrateur qui fonctionne quelques heures et une unité industrielle assurant une production continue 24h/24, 330 jours/an, sans interruption**. Ce fossé est de nature différente du verrou technologique — c'est un fossé d'échelle industrielle et de compétence opérationnelle.

7.1 Les trois lauréats GRDF — Ce qu'ils sont réellement

Un constat préalable : les photos des installations des trois lauréats confirment leur nature de démonstrateurs de taille réduite. Cela n'est pas une critique — c'est leur rôle dans le dispositif GRDF — mais cela définit précisément leur périmètre de compétence.

Lauréat	Localisation	Profil	Capacité actuelle estimée	Apport Phase 0
NOVEA	Gironde	Startup — démonstrateur opérationnel, approche ouverte + partenaire méthanation	Quelques t/j — non publié	Validation brique méthanation + injection « gaz porté » — premier en France opérationnel
Charwood Innovation	Morbihan	PME cotée Euronext Growth — 18 ans biomasse — 9,3 M€ CA 2025 — démonstrateur présenté avril 2026	~22 t/j (contrat Verallia 8 000 t/an)	Chaîne de valeur complète — montée vers débit représentatif industriel — données intégration
Elvéa Energy / LERMAB	Vosges	Fort ancrage académique — Université de Lorraine LERMAB — procédé purification optimisé	Échelle laboratoire / pilote	Tests catalyseur Ni endurance — données XRD — protocole régénération — le plus pertinent sur le verrou chimique
GoBiGas (référence)	Göteborg (Suède)	Engie + Göteborg Energi — équipe de 200+ ingénieurs — budget ~200 M€	~60–70 t/j (32 MW)	Référence mondiale — arrêté 2018 sur désactivation catalyseur — 1/15ème du site cible Résilience
Site cible Résilience	150 bassins FR	À définir — EPC industriel requis	1 000 t/j (460 M€ CAPEX)	×15 GoBiGas — ×45 Charwood Verallia — jamais démontré à cette échelle

Tableau A — Comparaison des acteurs existants avec le site cible Résilience. Le saut d'échelle ×15 par rapport à GoBiGas est le défi dimensionnant.

Risque majeur : Le site cible Résilience (1 000 t/j) n'a jamais été construit ni démontré nulle part dans le monde. GoBiGas (32 MW, ~60–70 t/j) reste la plus grande installation de référence et elle a été arrêtée. Le saut ×15 ne peut pas être franchi par les trois lauréats GRDF — il requiert des acteurs d'une autre stature industrielle.

7.2 La différence fondamentale : quelques heures vs 330 jours continus

Ce que fait un démonstrateur : il valide le principe thermochimique — la conversion de biomasse en syngas à la bonne température, avec un taux de goudrons mesuré sur quelques heures à quelques jours en conditions contrôlées, biomasse sèche et homogène, équipe dédiée, arrêts planifiés fréquents.

Ce que doit faire une unité industrielle Résilience : traiter 1 000 tonnes de biomasse PAR JOUR sans interruption, 330 jours/an, avec des biomasses de composition variable (taux de soufre, chlore, humidité fluctuants selon les lots forestiers et agricoles), des températures maintenues entre 750 et 900°C en continu, et un catalyseur Ni qui se désactive progressivement à chaque cycle. Le tout sans jamais dépasser le seuil GRDF de 10 mg/Nm³ de goudrons, sous peine d'arrêt d'injection.

Paramètre opérationnel	Démonstrateur (lauréats GRDF)	Unité industrielle Résilience 1 000 t/j
Durée de fonctionnement continu	Quelques heures à quelques jours	330 jours/an — 7 920 h/an sans interruption majeure
Biomasse traitée	Homogène, sèche, contrôlée	Variable : rémanents, pailles, ripisylves — soufre et chlore fluctuants
Gestion catalyseur Ni	Arrêt planifié pour régénération — pas de contrainte de production	Régénération ex-situ en continu — réacteurs en parallèle alternant production et régénération
Conséquence d'un dépassement des seuils GRDF	Arrêt d'essai — données disponibles — pas de perte économique	Arrêt d'injection → perte de 130–190 M€/an de revenus biométhane par jour d'arrêt
Empoisonnement soufre (H ₂ S)	Mesuré, documenté, catalyseur remplacé après essai	Cycle permanent : détection temps réel + injection épurateur H₂ S + régénération Ni < 500h
Équipe d'exploitation	Chercheurs + techniciens — arrêts fréquents acceptés	Opérateurs 4x8h + ingénieurs procédé 24/7 + astreinte senior
Compétence clé requise	Chimie des goudrons + mesure analytique	Gestion industrielle catalyseur Ni en cycle continu — expertise SMR / pétrochimie

Tableau B — Comparaison des exigences opérationnelles. Les cases en rouge marquent les paramètres pour lesquels les lauréats GRDF n'ont pas d'expérience en conditions industrielles.

7.3 La compétence manquante : la gestion du catalyseur Ni en cycle industriel continu

Le verrou opérationnel de la production continue n'est pas le craquage des goudrons en lui-même — c'est la **gestion industrielle du cycle vie/mort/régénération du catalyseur Ni en fonctionnement ininterrompu**. Ce problème est résolu depuis 50 ans dans deux industries uniquement :

Industrie	Procédé analogue	Compétence transférable à Résilience	Acteur français maître
Raffinage pétrolier	FCC (Fluid Catalytic Cracking) — catalyseur zéolithe en cycle continu réaction/régénération toutes 2–10 minutes	Architecture réacteur/régénérateur en parallèle — gestion empoisonnement métaux	TotalEnergies (Gonfreville, Donges, Feyzin)

Industrie	Procédé analogue	Compétence transférable à Résilience	Acteur français maître
		lourds — monitoring continu	
Production d'hydrogène / ammoniac	Steam Methane Reforming (SMR) — catalyseur Ni/alumine — empoisonnement soufre identique au problème Résilience	Cycle de régénération ex-situ standardisé — protocoles COFRAC — monitoring H ₂ S en temps réel	TotalEnergies + Air Liquide (production H ₂ industrielle)
Pyrogazéification biomasse	GoBiGas (olivine, 32 MW) — technologie validée mais arrêtée sur la désactivation Ni	Données de référence disponibles — problème identifié mais non résolu industriellement	Personne en France à échelle industrielle

Tableau C — Analogies industrielles. Le SMR est le procédé le plus proche du verrou Résilience : même catalyseur Ni, même poison soufre, même problématique de gestion en continu.

■ **Note** : La compétence de gestion du catalyseur Ni en cycle continu existe en France — mais exclusivement chez les opérateurs de SMR (production d'hydrogène) et de FCC (raffinage). Ces procédés ne sont pas exploités par les trois lauréats GRDF, ni par Engie, ni par Air Liquide dans sa configuration actuelle. Elle est concentrée chez TotalEnergies, qui exploite des unités SMR sur ses raffineries françaises.

7.4 Pourquoi TotalEnergies + Technip Energies est le seul binôme crédible pour la Phase 1

La question n'est pas de savoir quel acteur est le plus motivé ou le plus vertueux en matière de transition énergétique — c'est de savoir lequel dispose **aujourd'hui en France** des deux compétences simultanément requises pour construire et opérer un site Résilience de 1 000 t/j :

Compétence requise Phase 1	TotalEnergies + Technip	Engie	Air Liquide	Lauréats GRDF
Engineering procédé thermochimique haute température	✓ SMR + FCC opérés	△ GoBiGas arrêté	✗ Séparation gaz	△ Démonstrateur seul
Gestion catalyseur Ni en cycle industriel continu	✓ SMR quotidien	✗ Non maîtrisé	✓ Partiel (H ₂)	✗ Hors portée
EPC projets industriels > 300 M€	✓ Technip Energies	✓ Oui (autres)	✓ Partiel	✗ PME
Exploitation 24/7 site industriel complexe	✓ Raffineries FR	✓ Oui	✓ Oui	✗ Hors portée
Financement 460 M€ par site (propre ou garantie)	✓ Capacité bilan	✓ Oui	✓ Oui	✗ PME
Intérêt stratégique biométhane + biochar + carbone	✓ Fort (neutralité 2050)	△ Modéré	△ Indirect	✓ Cœur de métier
CAPACITÉ GLOBALE PHASE 1	✓✓ Seul binôme complet	△ Partiel	△ Partiel	✗ Phase 0 seulement

Tableau D — Capacité des acteurs pour la Phase 1 industrielle. TotalEnergies + Technip Energies est le seul binôme réunissant l'ensemble des compétences requises en France aujourd'hui.

7.5 Schéma industriel recommandé pour la Phase 1

La Phase 1 Résilience nécessite une structure à trois niveaux distincts, avec des rôles clairement séparés :

Niveau	Rôle	Acteur recommandé	Justification
Niveau 1 Technologie & procédé	Architecture cascadée thermique + olivine + Ni · Gestion cycles catalyseur · Optimisation rendement biomasse → syngas	TotalEnergies (expertise SMR) + apport données lauréats GRDF Phase 0	Seul acteur français maîtrisant le cycle Ni en continu — analogie directe avec ses unités SMR de raffinage
Niveau 2 Engineering & construction	EPC complet 460 M€/site · Ingénierie détaillée · Procurement international · Construction 18 mois · Mise en service	Technip Energies (filiale TotalEnergies jusqu'en 2021, partenaire naturel)	Leader mondial EPC projets gaz et pétrochimie — 100+ unités SMR livrées — cadence 10 sites/an possible
Niveau 3 Exploitation locale	Opération 24/7 · Approvisionnement biomasse local · Maintenance de 1er niveau · Relation agriculteurs	Coopératives agricoles + collectivités locales + CUMA — formées par TotalEnergies/Technip	Ancrage territorial · Contrats biomasse 15 ans · Emplois non délocalisables · Modèle coopératif
Rôle lauréats GRDF	Phase 0 uniquement : qualification procédé, données catalyseur, protocoles GRDF	NOVEA + Charwood + Elvéa/LERMAB — rôle de laboratoires de qualification	Leur rôle est essentiel mais limité à la Phase 0 — ils ne sont pas les opérateurs industriels de Phase 1

Tableau E — Schéma industriel recommandé pour la Phase 1 Programme Résilience.

7.6 Ce que cela implique pour la stratégie Résilience

- **Le chaînon manquant est identifié** : les documents V11 ne nomment pas explicitement l'acteur industriel de Phase 1. C'est la lacune stratégique principale à combler avant septembre 2026.
- **L'engagement de TotalEnergies est la condition du passage Phase 0 → Phase 1** : sans un acteur maîtrisant le cycle Ni en continu, les données de la Phase 0 resteront au stade académique sans débouché industriel.
- **TotalEnergies a un intérêt économique direct** : le biométhane injecté dans le réseau GRDF s'intègre dans leur portefeuille gaz renouvelable. Le biochar et les crédits carbone CRCF s'inscrivent dans leur trajectoire neutralité carbone 2050. L'IRR 8–15 % est compatible avec leurs critères d'investissement.
- **Le levier politique est Stéphane Piednoir/OPECST** : une commande gouvernementale à TotalEnergies pour une étude de faisabilité Phase 1 sur 2 sites pilotes de 100–200 t/j (taille intermédiaire entre démonstrateurs actuels et cible 1 000 t/j) est le bon point d'entrée.
- **La note à TotalEnergies doit cadrer l'intérêt business, pas le projet Résilience** : l'approche doit présenter le biométhane agricole comme une opportunité de marché, le biochar comme un actif carbone certifiable CRCF, et la Phase 0 comme une due diligence gratuite payée par l'État.

✓ **Conclusion** : L'Annexe Goudrons V11 a raison de classer ce verrou comme « Critique Phase 0 ». Cet addendum ajoute le verrou de Phase 1 : le passage à l'échelle industrielle requiert un acteur de niveau raffinerie, maîtrisant le cycle Ni en continu. TotalEnergies + Technip Energies est le seul binôme disponible en France. Le sensibiliser avant septembre 2026 est une priorité stratégique du même ordre que le déblocage réglementaire de l'article R.446-105.

Addendum rédigé en juin 2026 — à intégrer à l'Annexe technique Programme Résilience V11 « Verrou des Goudrons », mai 2026.

Programme Résilience 2045
helion31412.github.io/resilience2045

Paris, juin 2026
CONFIDENTIEL — Usage personnel du destinataire
