

# ANNEXE TECHNIQUE — PROGRAMME RÉSILIENCE V11

## Verrou des Goudrons (Tars) en Pyrogazéification

Comparatif des technologies de craquage · TRL · CAPEX · Stratégie Phase 0

Mai 2026 — Document technique confidentiel

CONTEXTE — Ce document répond à l'objection unanime des experts (RTE, ADEME, DGEC) : le craquage des goudrons issus de la pyrogazéification est le principal verrou technique qui a conduit à l'arrêt du projet GoBiGas (Göteborg, 2018). Programme Résilience V11 classe ce verrou en Critique Phase 0. La présente annexe détaille les technologies candidates, leurs performances comparées, les enseignements de GoBiGas, et la stratégie de validation Phase 0 (2027–2029).

## Partie 1 — Le problème des goudrons : nature et enjeux

### 1.1 Qu'est-ce qu'un goudron de pyrogazéification ?

Lors de la pyrogazéification de la biomasse lignocellulosique à 750–900°C, la dégradation thermique des composés organiques produit, en plus du syngas utile ( $\text{CO} + \text{H}_2 + \text{CH}_4$ ), une fraction de molécules organiques condensables appelées goudrons (tars en anglais). Ces goudrons sont des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) et des phénols de masse moléculaire élevée.

À température ambiante, ils condensent sur les parois des équipements, les catalyseurs et les échangeurs — provoquant l'obstruction progressive des installations, la désactivation des catalyseurs Ni et la contamination du syngas injecté dans le réseau GRDF.

### 1.2 Pourquoi ce verrou a coulé GoBiGas

L'installation GoBiGas de Göteborg (Engie/Göteborg Energi, 32 MW, 2013–2018) est la référence mondiale en pyrogazéification industrielle. Elle a validé les rendements de 2,85–3,0 MWh  $\text{CH}_4$  /t MS — donnée centrale du Programme Résilience V11. Elle s'est arrêtée en 2018 pour des raisons économiques et techniques, dont le principal était la désactivation progressive du catalyseur Ni/dolomite par dépôt de soufre et coke.

L'enseignement de GoBiGas n'est pas que la technologie est impraticable — c'est qu'elle nécessite une stratégie de régénération du catalyseur validée industriellement avant tout déploiement à grande échelle. C'est exactement l'objectif de la Phase 0 Programme Résilience (2027–2029).

### 1.3 Seuils de tolérance requis

Point de contrôle	Seuil maximal accepté	Conséquence si dépassé
Goudrons syngas brut (avant lavage)	< 10 g/Nm <sup>3</sup> (objectif < 2 g/Nm <sup>3</sup> )	Colmatage des échangeurs thermiques aval
Goudrons après lavage/épuration	< 50 mg/Nm <sup>3</sup> (norme GRDF)	Refus d'injection réseau GRDF — arrêt de la filière
H <sub>2</sub> S (soufre)	< 5 mg/Nm <sup>3</sup>	Poison catalyseur Ni → désactivation accélérée
NH <sub>3</sub> (ammoniac)	< 3 mg/Nm <sup>3</sup>	Contamination réseau GRDF

## Partie 2 — Tableau comparatif des technologies de craquage

Six technologies de craquage des goudrons sont évaluées pour la Phase 0 du Programme Résilience. Le critère principal est la combinaison taux d'élimination x stabilité opérationnelle x coût intégré x TRL.

Technologie	Taux élimination goudrons	TRL	Température (°C)	CAPEX relatif	Disponibilité commerciale	Points critiques
<b>Craquage thermique seul</b>	60–80 %	9 ✓	> 1 100°C	€	Disponible maintenant	Insuffisant seul (<80%). Consommation énergétique élevée. Point de départ Phase 0.
<b>Catalyse Ni/dolomite (lit fixe)</b>	90–99 %	7–8	750–900°C	€€	2027–2029 (Phase 0)	Désactivation du catalyseur Ni par soufre et coke. Régénération nécessaire toutes 200–500h. Principal verrou à lever Phase 0.
<b>Lit fluidisé olivine (GoBiGas)</b>	80–95 %	8	800–850°C	€€	2028–2031	Validé GoBiGas (32 MW, Göteborg). Rendement 2,85–3,0 MWh/t MS confirmé. Goudrons résiduels ~3 g/Nm <sup>3</sup> — acceptable. Référence principale Programme Résilience.
<b>Reformage vapeur catalytique</b>	95–99 %	7	700–900°C	€€€	2029–2033	Très haute efficacité. Intégration H <sub>2</sub> O/O <sub>2</sub> complexe. Coût élevé. Complément possible Phase 2.
<b>Reformage plasma (arc électrique)</b>	> 99 %	5–6 ⚠	> 5 000°C (arc)	€€€€	2033–2038	Efficacité maximale mais consommation électrique très élevée (~20 % de la production). Réservé à des niches haute valeur. Non retenu Phase 0–1.
<b>Oxydation partielle (POX)</b>	85–95 %	8	900–1 100°C	€€	2028–2032	Injection O <sub>2</sub> partielle. Synergies avec unités air séparation. Convient aux grandes installations (>500 t/j). Candidat sérieux Phase 1.
<b>Combiné thermique + olivine + Ni (cascadé)</b>	> 99 %	7–8	800–900°C (zone olivine)	€€–€€€	2029–2033 (Phase 1)	✓ <b>RETENU</b> — <b>Architecture optimale Phase 0→1.</b> Craquage thermique primaire (>1 100°C) élimine 70 % des goudrons lourds, puis olivine + Ni descend <1 g/Nm <sup>3</sup> . Chaque étape protège la suivante. Résilience aux pannes d'une étape.

Légende CAPEX : € = < 5 % du CAPEX site total (2,3 M€) · €€ = 5–10 % · €€€ = 10–20 % · €€€€ = > 20 % (rédhibitoire). TRL 9 = commercial. TRL 7–8 = démontré à l'échelle pilote industrielle. TRL 5–6 = démontré en laboratoire/démonstrateur.

## Partie 3 — Enseignements de GoBiGas et applications Programme Résilience

Paramètre GoBiGas	Résultat obtenu	Enseignement pour Programme Résilience
Puissance nominale	32 MW (20 MWth bio-CH <sub>4</sub> )	Validé à échelle pilote industrielle — 30 MW = 1/30 d'un site 1 000 t/j Programme Résilience
Rendement CH <sub>4</sub> utile	2,85–3,0 MWh/t MS ✓	Confirme la borne basse 2,7 MWh/t MS retenue en V11. Marge de sécurité intégrée.
Technologie craquage goudrons	Lit fluidisé olivine (800–850°C)	Référence directe pour Phase 0. Goudrons résiduels ~3 g/Nm <sup>3</sup> après olivine = acceptable pour injection réseau.
Problèmes rencontrés	Désactivation catalyseur + coût entretien élevé → arrêt 2018	⚠ Verrou principal identifié. Phase 0 consacre 100 % R&D à ce problème. Réponse : architecture cascadée + régénération ex-situ du catalyseur.
Coût de production bio-CH <sub>4</sub>	~120–140 €/MWh (2017–2018)	Cohérent avec fourchette Phase 1 (170–200 €/MWh avec soutien CfD). Descendra avec économies d'échelle.
Durée de fonctionnement	2013–2018 (5 ans de données)	Base de données industrielle réelle disponible. Justifie l'approche Phase 0 avant engagement Phase 1.

Conclusion GoBiGas : L'arrêt de GoBiGas n'invalide pas la technologie — il définit précisément le problème à résoudre. Le rendement 2,85–3,0 MWh/t MS est validé. Le verrou est la désactivation catalytique. La solution (régénération ex-situ + architecture cascadée) est connue et testable en Phase 0. Programme Résilience est post-GoBiGas, pas pré-GoBiGas.

## Partie 4 — Architecture retenue : approche cascadée

### 4.1 Principe

L'architecture optimale pour le Programme Résilience combine trois étapes en cascade, chacune éliminant une fraction spécifique des goudrons. Aucune technologie seule n'atteint les seuils GRDF — leur combinaison le permet :

SYNGAS BRUT → [Étape 1 : Thermique 1 100°C] → ~3 g/Nm<sup>3</sup> → [Étape 2 : Olivine 850°C] → ~0,5 g/Nm<sup>3</sup> → [Étape 3 : Ni fix 750°C] → < 0,1 g/Nm<sup>3</sup> → INJECTION GRDF

### 4.2 Avantages de l'approche cascadée

- Chaque étape protège la suivante : le craquage thermique élimine les goudrons lourds (naphtalène, pyrène) avant qu'ils n'empoisonnent le catalyseur Ni.
- Résilience opérationnelle : si une étape est en maintenance, les deux autres maintiennent une production dégradée (< 100 % rendement mais > 0).

- Flexibilité biomasse : les variations de composition de la biomasse (résidus tempête vs bois mort vs ripisylves) sont absorbées par la redondance des étapes.
- Référence industrielle : GoBiGas utilisait déjà olivine en étape 2 — nous ajoutons le craquage thermique en amont et le Ni en aval.

## Partie 5 — Plan de validation Phase 0 (2027–2029)

La Phase 0 du Programme Résilience (5 sites pilotes, 2,5–3 Md€, 2027–2029) consacre ses efforts de R&D prioritairement à la validation du traitement des goudrons. Sans validation de cette étape, il n'y a pas de Phase 1 — c'est la condition sine qua non du programme.

Jalon Phase 0	Objectif mesurable	Méthode de validation	Condition de passage Phase 1
<b>2027 — Sites GAYA + Salamandre</b>	Taux goudrons < 2 g/Nm <sup>3</sup> en sortie (norme injection GRDF : < 10 mg/Nm <sup>3</sup> après lavage)	Mesures GC en continu sur syngas brut. Certification laboratoire accrédité COFRAC.	< 5 g/Nm <sup>3</sup> syngas brut avant lavage (objectif cible < 2 g/Nm <sup>3</sup> )
<b>2027–2028 — Stabilité catalyseur</b>	Désactivation Ni < 5 % sur 500h continues. Régénération ex-situ validée sans perte de performance.	Tests endurance 1 000h avec analyse XRD du catalyseur avant/après. Protocole régénération standardisé.	Cycle activité > 95 % après 3 régénérations consécutives
<b>2028 — Rendement global</b>	CH <sub>4</sub> utile ≥ 2,7 MWh/t MS sur 330 jours continus. Biochar H/C ≤ 0,4 certifié EBC.	Bilan massique et énergétique intégral par organisme indépendant (GIEK/ADEME).	<b>Rendement ≥ 2,7 MWh/t MS ET biochar CDC V3 certifié</b>
<b>2029 — Qualification GRDF</b>	Syngas purifié conforme spécifications injection GRDF (H <sub>2</sub> S < 5 mg/Nm <sup>3</sup> , goudrons < 10 mg/Nm <sup>3</sup> , NH <sub>3</sub> < 3 mg/Nm <sup>3</sup> ).	Protocole qualification GRDF. Analyse 100 % des paramètres sur 90 jours consécutifs.	<b>Accord de principe GRDF pour injection réseau → DÉCLENCHE PHASE 1</b>

**RÈGLE ABSOLUE** : Sans accord de principe GRDF pour injection réseau à la fin de Phase 0 (2029), le programme ne passe pas en Phase 1. Cette règle est intégrée dans les contrats CfD et les garanties BPI/CDC. C'est la différence entre Programme Résilience et les projets de pyrogazéification qui ont échoué faute de discipline industrielle.

## Partie 6 — Réponse aux objections des experts

### 6.1 Objection DGEC : « Le craquage des goudrons est le cimetière des projets depuis 20 ans »

Réponse : Cette objection est exacte pour les projets qui ont voulu court-circuiter la Phase 0. Programme Résilience ne le fait pas. La règle de non-passage Phase 0 → Phase 1 sans validation GRDF est explicitement contractuelle. Les 5 sites pilotes ne produiront pas un TWh de bio-CH<sub>4</sub> commercialisable avant validation complète des goudrons — ils servent exclusivement à la qualification.

### 6.2 Objection RTE : « Les rendements 2,7–2,9 MWh/t MS ne sont pas garantis »

Réponse : Ils sont validés industriellement sur GoBiGas (2,85–3,0 MWh/t MS sur 5 ans). Programme Résilience utilise la borne basse (2,7 MWh/t MS) comme valeur de calcul. La marge entre 2,7 (scénario conservateur) et 2,85 (GoBiGas validé) constitue un coussin de robustesse de 5 % intégré dès V11.

### 6.3 Objection industrielle : « La régénération du catalyseur Ni est trop coûteuse à grande échelle »

Réponse : Le modèle économique V11 intègre la maintenance catalyseur dans les charges opératoires (verrou goudrons = 1,5–2 % du CAPEX/an sur la ligne maintenance, soit ~7–9 M€/an/site dans la fourchette haute prudente). Le ROI reste de 5–8 ans. La régénération ex-situ est standardisée dans l'industrie pétrochimique depuis 50 ans — il s'agit d'adapter un procédé existant, pas d'en inventer un nouveau.

## Conclusion — Le verrou est identifié, la solution est connue, le financement est planifié

Le problème des goudrons n'est pas un mystère scientifique non résolu — c'est un problème d'ingénierie industrielle à résoudre à l'échelle. Les voies de solution sont connues (olivine + Ni cascadié), les références existent (GoBiGas, installations de méthanisation catalytique en Autriche et Allemagne), et les jalons de validation sont précis et contractualisables.

La Phase 0 (2027–2029) du Programme Résilience est conçue spécifiquement pour lever ce verrou avant tout engagement financier massif. C'est l'approche qu'un comité d'experts ADEME, DGEC ou RTE devrait reconnaître comme méthodologiquement saine.

Message aux décideurs : Programme Résilience V11 ne minimise pas le verrou des goudrons — il en fait la condition préalable non négociable de tout le reste. C'est précisément ce qui le distingue des projets qui ont échoué.

---

### Références techniques

Göransson K. et al. (2011) — *Biomass and Bioenergy* 35(2) : 482–489 · Devi L. et al. (2003) — *Biomass and Bioenergy* 24(2) : 125–140 · Milne T.A. et al. (1998) — NREL/TP-570-25357 (référence fondatrice goudrons) · Engie/Göteborg Energi (2018) — *GoBiGas Final Report · EBC v10.1* (2022) — *European Biochar Certificate · CDC Biochar V3* (2026) · ADEME (2025) — *Performances pyrogazéification biomasse France*

Annexe technique Programme Résilience V11 — Mai 2026