

MÉTHANE — ÉMISSIONS NATURELLES ET MAÎTRISE DES FUITES

DANS LA FILIÈRE bioCH₄ V2

Note technique — Programme Résilience V11 — Septembre 2026 — V2 (corrections suite cross-validation GPT/Gemini) · Sources : Global Methane Budget 2025 (Saunois et al., ESSD/Copernicus) · IPCC AR6 · CDC Méthanisation V2.3 · Corpus Résilience V11

Note méthodologique V2 — Cette version corrige quatre points identifiés par cross-validation GPT/Gemini : (1) cohérence 262 TWh ↔ 18,8 Mt CH₄/an ; (2) % vs émissions naturelles recalculé (7,5–9,4 %) ; (3) seuil critique présenté comme variable selon le carburant substitué (9,9–15,5 %), non comme constante universelle ; (4) argument biomasse → CH₄ différencié par catégorie, non généralisé à toute biomasse.

Positionnement de cette note : le risque de fuite de méthane est réel et doit être traité comme une contrainte de conception, de mesure et d'exploitation — pas comme un argument à minimiser. Pour les flux organiques dont le scénario de référence comporte des émissions méthane significatives, une filière correctement contrôlée peut transformer une émission diffuse en flux capté, mesuré et valorisé. La performance climatique doit être démontrée par comparaison avec le scénario de référence réel et par mesure effective des pertes — pas affirmée.

1 — LES ÉMISSIONS NATURELLES DE MÉTHANE : CONTEXTE GLOBAL

Selon le Global Methane Budget 2000–2020 (Saunois et al., 2025, ESSD/Copernicus), les émissions mondiales totales atteignent 608 Tg CH₄/an en 2020, en hausse de 12 % par rapport aux années 2000. Environ 35 à 40 % de ces émissions (200–250 Tg/an) sont d'origine naturelle ou indirectement liée au réchauffement climatique.

1.1 Sources naturelles — quantification

Source naturelle	Tg CH ₄ /an	% total mondial	Incertitude	Mécanisme / Note
Zones humides (wetlands)	155–180	25–30 %	±50 %	Méthanogenèse anaérobie — 1ère source mondiale. Amplifiée par le réchauffement climatique.
Eaux douces intérieures	120–180	20–25 %	±50 %	Révisée à la hausse (Saunois et al., 2025). Méthanogenèse en zones anoxiques de fond.
Sources géologiques	30–50	5–8 %	±30 %	Suintements naturels, volcans sous-marins, failles géothermiques.
Permafrost arctique	10–30	2–5 %	±80 %	En augmentation avec le réchauffement : rétroaction climatique non contrôlable.
Termites	9–15	2–3 %	±50 %	Méthanogenèse intestinale. ~4 % des

				émissions naturelles hors zones humides.
Océans (biogénique)	4–10	<2 %	±60 %	Zones anoxiques océaniques. Contribution modeste, mesure difficile.
Feux naturels	2–5	<1 %	±40 %	Variable selon les années. Accentué par les méga-incendies (été 2026 France).
Total sources naturelles	~200–250	~35–40 %	±30 %	Le reste (~60 %) est d'origine anthropique directe.

Source : *Global Methane Budget 2000–2020*, Saunio et al., 2025, ESSD/Copernicus

Positionnement correct vis-à-vis des émissions naturelles — éviter le whataboutism

- Le méthane naturel illustre l'importance des flux biogéniques dans le cycle global, mais ne constitue pas une justification pour tolérer des émissions anthropiques évitables. Une part importante des émissions naturelles n'est pas directement contrôlable par une politique de réduction anthropique — mais certaines sont amplifiées par le réchauffement (zones humides, permafrost), ce qui renforce l'urgence d'agir sur les sources anthropiques.
- La filière Résilience produit ~18,8 Mt CH₄/an à pleine maturité (262 TWh ÷ 13,9 kWh/kg). Rapporté aux émissions naturelles (200–250 Tg/an), cela représente 7,5 à 9,4 %. Rapporté au total mondial (608 Tg/an), cela représente 3,1 %. Ce chiffre ne minimise pas le problème — il le cadre pour dimensionner les efforts de contrôle nécessaires.

Le méthane atmosphérique a une durée de vie courte (~9 ans, IPCC AR6). Maîtriser les fuites aujourd'hui a un effet mesurable sur la concentration atmosphérique à une échéance de 10–20 ans — un avantage par rapport au CO₂ qui s'accumule sur des siècles.

2 — LE SEUIL CRITIQUE DE FUITES : UNE VARIABLE, PAS UNE CONSTANTE

La littérature cite souvent un seuil unique au-delà duquel les fuites méthane annuleraient le bénéfice climatique. Ce seuil n'est pas une constante physique universelle — il dépend du carburant substitué, de la période de référence (GWP100 ou GWP20), du périmètre d'analyse (combustion seule ou cycle de vie complet) et du taux de fuite du carburant fossile de référence lui-même. Le calcul ci-dessous retient l'hypothèse la plus conservatrice (GWP100 = 27,9 ; combustion biogénique neutre ; carburant fossile de référence sans fuites propres).

Usage / Carburant substitué	CO ₂ évité (kg/kg CH ₄)	Seuil critique fuites (%)	Seuil contrac. Résilience (%)	Marge de sécurité
Gaz naturel fossile (réseau)	2,75	~9,9 %	≤ 1 %	×10
HFO maritime	3,76	~13,5 %	≤ 1 %	×13,5
Diesel Euro VI (camion)	3,84	~13,8 %	≤ 1 %	×14
Kérosène aviation	4,34	~15,5 %	≤ 1 %	×16

Seuil contractuel Résilience	—	—	≤ 1 %	×10 à ×16 selon usage
---------------------------------	---	---	-------	--------------------------

Méthode de calcul du seuil critique

- Principe : 1 kg CH₄ biogénique brûlé = 0 kg CO₂ fossile. Si le carburant fossile substitué émet X kg CO₂/kg CH₄ équivalent, alors une fuite de F % représente $F/100 \text{ kg CH}_4 \times \text{GWP100} = F/100 \times 27,9 \text{ kg CO}_2\text{eq}$. Seuil critique : $F/100 \times 27,9 = X \rightarrow F = X/27,9 \times 100$.
- Exemple gaz naturel fossile : $X = 2,75 \text{ kg CO}_2/\text{kg CH}_4 \rightarrow \text{seuil} = 2,75/27,9 \times 100 = 9,9 \%$. Exemple diesel camion : $X \approx 3,84 \text{ kg CO}_2/\text{kg CH}_4 \text{ équivalent utile} \rightarrow \text{seuil} = 13,8 \%$.
- Seuil contractuel Résilience ≤ 1 % : marge de sécurité ×10 (vs gaz naturel) à ×16 (vs kérosène). Cette marge est robuste sur l'ensemble des usages de la filière.

Précaution : ce calcul suppose une combustion biogénique neutre et un carburant fossile substitué sans fuites propres. En cas de méthane slip résiduel non traité ou de comparaison avec du gaz fossile lui-même sujet à fuites, le seuil effectif peut s'écarter. C'est pourquoi le protocole à 5 niveaux (§4) est indispensable.

3 — SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE PAR CATÉGORIE DE BIOMASSE

L'argument selon lequel la filière « intercepte des flux CH₄ naturels » est valide pour certaines catégories de biomasse — celles dont le scénario de référence réel comporte effectivement une production significative de méthane en conditions anaérobies. Il ne s'applique pas uniformément à toute biomasse. Cette distinction est essentielle pour rendre l'argument inattaquable face à des contradicteurs techniques.

Catégorie biomasse	Scénario de référence — émissions CH ₄	Argument avec filière Résilience
Lisier porcin / effluents d'élevage stockés	Conditions anaérobies quasi-certaines → CH ₄ diffus non capté estimé 1–3 % des émissions agricoles FR. Argument contrefactuel très solide.	Méthanisation → capture du flux CH ₄ naturel + valorisation. Fuites < 1 % contractuel. N ₂ O fortement réduit.
Biodéchets ménagers en décharge non traitée	Fermentation anaérobie → CH ₄ non capté (25–35 % du biogaz perdu en décharge classique). Argument très solide.	Méthanisation → biométhane capté + CO ₂ biogénique valorisé (C ₂ ICB).
Résidus lignocellulosiques humides (paille mouillée, rémanents humides)	Conditions partiellement anaérobies selon humidité et stockage → émissions CH ₄	Argument modéré. Données expérimentales à préciser par catégorie. Ne pas généraliser.

	variables mais significatives.	
Résidus lignocellulosiques secs (bois mort sec, paille sèche stockée)	Décomposition aérobie prédominante → principalement CO₂, pas de CH₄ significatif. Argument contrefactuel FAIBLE.	L'argument climatique repose sur la substitution de fossile et la séquestration biochar — pas sur des émissions CH ₄ évitées.
Fumier stocké en tas	Couches anaérobies internes → CH ₄ diffus. Perte 20–40 % azote par volatilisation.	Méthanisation + digestat + biochar → azote retenu zone racinaire. Lessivage nitrates réduit de 20–40 % (données à valider Phase 0).

Formulation correcte de l'argument contrefactuel

- À utiliser : « Pour les flux organiques dont le scénario de référence réel comporte des émissions méthane significatives (effluents d'élevage, biodéchets, matières organiques humides), une filière correctement contrôlée peut transformer une émission diffuse en flux capté, mesuré et valorisé. »
- À éviter : « Toute biomasse non valorisée émet du méthane. » — trop général, inexact pour les biomasses sèches, attaquable par tout contradicteur technique.

La force de l'argument est proportionnelle à la rigueur de la segmentation par catégorie. Les cas les plus solides (lisier, biodéchets) suffisent à appuyer la thèse centrale.

4 — L'INDICE ICB : RENDRE VISIBLE ET MESURABLE LE CARBONE BIOGÉNIQUE

L'ICB (Indice de Conservation du Carbone Biogénique), introduit dans le Cahier des charges méthanisation V2.3, est l'élément le plus original de cette note selon la cross-validation GPT/Gemini. Il répond à une critique centrale de la filière actuelle (Cour des comptes, mars 2025) : environ 25 à 35 % du carbone biogénique entrant dans les digesteurs est perdu — CO₂ rejeté + fuites CH₄ non valorisées. L'ICB rend cette perte visible, mesurable et contractuellement sanctionnable.

Fraction	Description	Valeur actuelle filière FR	Objectif V2.3 (5 ans)	Impact fuites CH ₄
C₁	Carbone énergétique — CH ₄ injecté ou valorisé	45–55 % du COT	Maintenu	Direct : C ₁ élevé = moins de C ₅ (pertes)
C₂	CO ₂ biogénique valorisé (serres, industrie, P2G)	< 2 %	≥ 15 %	Valorisation CO ₂ réduit la tentation de torchage
C₃	Carbone agronomique — digestat au sol	15–25 %	25–35 %	Neutre sur CH ₄ — améliore azote et eau

C₄	Carbone séquestré — biochar EBC	< 0,5 %	Encouragé (bonus)	Fraction solide digestat → pyrogazéification → biochar C ₄
C₅	Carbone perdu — CO ₂ rejeté + fuites CH ₄	25–35 % (estimé)	< 15 %	C ₅ = indicateur pivot. Tout CH ₄ fugitif = C ₅ . Alerte si croissant.
ICB global	(C ₁ +C ₂ +C ₃ +C ₄)/COT	0,65–0,75 (estimé)	≥ 0,85	ICB < 0,60 : –15 % soutien. ICB ≥ 0,90 : +5 % bonus.

5 — PROTOCOLE DE MAÎTRISE DES FUITES — TECHNOLOGIES ET SEUILS

Le seuil contractuel Résilience de ≤ 1 % de fuites sur la chaîne complète repose sur un protocole à cinq niveaux documenté dans le Segment 4 Long-Courrier V6 (§7) et le CDC V2.3 (§6.3). Note V2 : la surveillance de pression du réseau GRDF ne constitue pas une mesure directe des émissions fugitives — le LDAR reste nécessaire en complément pour la quantification.

Source de fuite	Niveau de risque	Technologie de contrôle	Taux résiduel cible	Référence
Digesteurs et gazomètres	Modéré — joints, membranes	Compteurs biogaz certifiés + bilan massique continu. Alerte si écart > 3 %. OGI infrarouge trimestriel (EyeCGas 2.0). LDAR annuel drone laser.	< 0,5 %	CDC V2.3 §6.3
Unités d'épuration biogaz	Faible à modéré	Surveillance concentration + débit sur toutes évacuations. Analyse biométhane en continu.	< 0,2 %	CDC V2.3 §6.3
Réseau GRDF (distribution)	Très faible	200 000 km réseau avec surveillance pression. Note : la pression n'est pas une mesure directe des émissions fugitives — le LDAR reste nécessaire en complément.	< 0,1 %	Standard GRDF

Rex Atkinson pistons (methane slip)	Modéré sans traitement	MOC (Methane Oxidation Catalyst) à l'échappement. HPDI pour camions/maritimes.	< 0,1 % avec MOC	Segment 4 V6 §7
Turbofan aviation CH ₄	Quasi nul	Combustion > 1 400°C — destruction totale résidu. Slip quasi nul.	< 0,01 %	Note Aviation V11
Connectiques cryogéniques GNL	Faible	Double vanne cryogénique, boucles fermées boil-off, capteurs CH ₄ IR seuil 0,5 % vol.	< 0,1 %	Segment 4 V6 §7
Stockages digestat liquide	Modéré — dégazage résiduel	Toitures ou membranes étanches obligatoires (CDC V2.3 §6.1). Captage biogaz résiduel.	< 0,2 %	CDC V2.3 §6.1
BILAN CHAÎNE COMPLÈTE	Seuil critique : 9,9–15,5 % selon carburant substitué (voir §2)	Tous contrôles combinés + bilan massique annuel certifié auditeur indépendant.	≤ 1 % contractuel (×10–×16 vs critique)	V11 global

Les cinq niveaux du protocole intégré

- ① Conception : matériaux certifiés ATEX, double vanne sur tous les points de transfert. Problème traité à la source.
- ② Monitoring continu : plateforme nationale reporting temps réel. Écart bilan massique > 3 % → alerte exploitant + DREAL sous 72h.
- ③ Campagnes LDAR régulières : OGI infrarouge trimestriel par prestataire indépendant. Résultats intégrés au calcul C₅/ICB.
- ④ Post-traitement moteurs : MOC à l'échappement (< 0,1 % slip) ; HPDI pour camions et maritime (< 0,2 % slip).
- ⑤ Bilan contractuel : seuil ≤ 1 % chaîne complète, vérifiable annuellement par bilan massique certifié par auditeur indépendant (BPI/garant). Sanctions : > 3 % = mise en demeure 30 j ; > 5 % maintenu 6 mois = suspension + procédure ICPE.

CONCLUSION — QUATRE NIVEAUX DE RÉPONSE À L'OBJECTION

L'objection sur les fuites de méthane est la plus sérieuse des critiques potentielles à la filière bioCH₄. Elle ne doit pas être niée — elle doit être traitée avec précision.

Contexte global — Les émissions naturelles (200–250 Tg/an, 35–40 % du total mondial) montrent l'importance des flux biogéniques. La production Résilience (~18,8 Mt/an = 262 TWh ÷ 13,9 kWh/kg)

représente 7,5–9,4 % des émissions naturelles et 3,1 % du total mondial. Ce cadrage ne minimise pas le problème — il dimensionne les efforts de contrôle nécessaires.

Argument contrefactuel (différencié par catégorie) — Pour les biomasses à scénario de référence anaérobie significatif (effluents d'élevage, biodéchets), la filière transforme une émission diffuse incontrôlée en flux capté et mesuré. Cet argument ne s'applique pas aux biomasses sèches à décomposition aérobie.

Seuil critique — variable selon usage — Le seuil de compatibilité climatique varie de 9,9 % (vs gaz naturel fossile) à 15,5 % (vs kérosène aviation). Le seuil contractuel Résilience de ≤ 1 % offre une marge de sécurité de $\times 10$ à $\times 16$ selon l'usage.

Protocole de mesure et ICB — Le seuil ≤ 1 % est contractuellement encadré par un protocole à 5 niveaux (conception, monitoring continu, LDAR trimestriel, post-traitement moteurs, bilan annuel certifié). L'ICB rend visible et sanctionnable chaque fraction de carbone perdu (C_5). L'ÉREV Résilience est le seul véhicule à carburant doté d'un monitoring continu des fuites transmis à une plateforme nationale.

Sources

Global Methane Budget 2000–2020, Saunio et al., 2025, ESSD/Copernicus · IPCC AR6 — $GWP_{100} CH_4 = 27,9$ · Cour des comptes — Rapport méthanisation (mars 2025) · Programme Résilience V11 : CDC Méthanisation V2.3 (août 2026) · Segment 4 Long-Courrier V6 §7 · Corpus ÉREV V3 Final · Note Aviation BioGNL V11 · Démonstrateur territorial Bretagne V1 · BIOCON Group UK — Biogas Leak Detection Guide (mai 2026) · Kunak Air — Monitoring (sept. 2025)