

COMPARATIF MULTI-SECTEUR — CARBURANTS & TECHNOLOGIES V5

Aviation · Voiture · Camion lourd · Maritime · Propriétés physiques · CO₂ · NOx · PM · Logistique · Optimums · Programme Résilience V11 — Septembre 2026 V5

Note méthodologique centrale — Ce document compare les carburants entre eux, pas les véhicules sur leur usage réel. La colonne « CO₂ ajouté à l'atmosphère » représente uniquement le CO₂ d'origine fossile émis à la combustion (g CO₂/MJ utile après rendement η). Le CO₂ d'origine biogénique est neutre par définition du cycle court de la biomasse : il a été prélevé sur l'atmosphère lors de la croissance de la plante et y retourne — bilan nul sur la concentration atmosphérique. Il n'apparaît donc pas dans cette colonne. Le crédit biochar (séquestration nette permanente) est présenté séparément. Le bilan net = CO₂ ajouté à l'atm. + crédit biochar.

Légende

■ 100 % fossile ■ Transition / intermédiaire ■ Performance optimale (Résilience) ■ Bilan CO₂ net négatif (biochar) ■ Électrique / H₂ zéro CO₂ combustion ■ SAF biogénique (CO₂ atm = fraction fossile seule)

1 — PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET DENSITÉ ÉNERGÉTIQUE DES CARBURANTS

Le PCI volumique (MJ/L) est la donnée déterminante pour l'ingénierie des réservoirs et la logistique. Le PCI massique (MJ/kg) — souvent seul cité — crée une illusion favorable à l'H₂ : 120 MJ/kg semble exceptionnel jusqu'à ce qu'on divise par le volume nécessaire au stockage. La colonne '% kéro vol' exprime le volume de réservoir supplémentaire requis pour transporter la même énergie que le kérosène.

Carburant	PCI MJ/kg	%C	Densité kg/L	PCI vol MJ/L	% kéro vol	kg CO ₂ /kg	MJ/kg CO ₂	Stockage	Conditionnement — pénalité chaîne
Kérosène Jet A-1	43.2	86%	0.800	34.56	100 %	3.15	13.7	Liquide ambient	Référence
SAF HEFA	43.2	85%	0.780	33.70	98 %	3.12	13.8	Liquide ambient	Hydrotraitement + infra kérosène
Essence	43.5	85%	0.745	32.41	94 %	3.12	13.9	Liquide ambient	Standard
Diesel	43.0	86%	0.840	36.12	105 %	3.15	13.7	Liquide ambient	Standard
HFO maritime S0,5 %	40.5	86%	0.970	39.28	114 %	3.17	12.8	Liquide ambient	Soutage portuaire
CH ₄ · GNL -162°C	50.0	75%	0.422	21.10	61 %	2.75	18.2	Cryogénique -162°C	Liquéfaction ~0,25 kWh/kg · camion cryo

CH ₄ · GNV 250 bar	50.0	75%	0.187	9.35	27 %	2.75	18.2	Gaz 250 bar	Réseau gaz → compresseur (~0,12– 0,25 kWh/kg)
DME	28.9	52%	0.668	19.31	56 %	1.91	15.1	Liquide ~5 bar	Synthèse méthanol → déshydratation
Méthanol	19.9	37.5%	0.791	15.74	46 %	1.38	14.4	Liquide ambiant	Synthèse via syngas (~8 kWh/kg)
NH ₃ liquide	18.6	0%	0.682	12.69	37 %	0	∞	Liquide –33°C/10 bar	Haber-Bosch (~10 kWh/kg) · 35–40 % PCI perdu
H ₂ · liquide –253°C	120.0	0%	0.071	8.52	25 %	0	∞	Cryogénique –253°C	Liquéfaction ~15 kWh/kg — pénalité énergétique très élevée
H ₂ · gaz 700 bar	120.0	0%	0.040	4.80	14 %	0	∞	Gaz 700 bar composite	Compression 5–7 kWh/kg · tube trailer 700 bar

Impact volumique — H₂ vs CH₄ GNL : un écart d'ingénierie, pas seulement d'énergie

- H₂ liquide –253°C : 8,52 MJ/L = 25 % du kérosène. Pour un vol Paris–New York, les réservoirs H₂ occuperaient ~1 353 m³ contre ~538 m³ pour GNL et ~395 m³ pour kérosène — incompatible avec l'architecture cellule conventionnelle sans refonte complète du fuselage.
- H₂ gaz 700 bar : 4,80 MJ/L = 14 % du kérosène. Un camion tube-trailer 700 bar transporte ~350 kg H₂ (~42 000 MJ) contre ~10 500 kg GNL (~525 000 MJ) pour un camion cryogénique équivalent — facteur ×12 en énergie par rotation.
- CH₄ GNL –162°C : 21,10 MJ/L = 61 % du kérosène. L'écart réservoir avion (+36 % pour Paris–New York) est gérable architecturalement. Parmi les carburants cryogéniques combustibles, le CH₄ GNL présente une densité volumique nettement supérieure à l'H₂ et une intégration sensiblement moins pénalisante.

Preuve historique : Tupolev Tu-155 — 5 vols H₂ (avril 1988), puis ~100 vols GNL (à partir de janvier 1989). La même conclusion 35 ans avant les études actuelles.

2 — CO₂ AJOUTÉ À L'ATMOSPHÈRE, SÉQUESTRATION BIOCHAR ET BILAN NET

La colonne 'CO₂ ajouté à l'atmosphère' représente uniquement le CO₂ fossile émis, rapporté au MJ utile (après η). Pour un carburant 100 % biogénique (SAF 100 %, bioCH₄ 100 %), cette colonne est 0 : la combustion libère du CO₂ physiquement, mais ce CO₂ avait été prélevé sur l'atmosphère par la photosynthèse — bilan nul. Pour un mélange 50 % fossile / 50 % biogénique, seule la moitié contribue à la colonne. Les valeurs NO_x et PM sont des ordres de grandeur indicatifs (±20–30 %) selon le moteur et le post-traitement.

AVIATION — Long-courrier — référence vol Paris–New York

Technologie / Architecture	Carburant	η	CO ₂ ajouté à l'atm. g/MJ (a)	Séquest. biochar g/MJ (b)	Bilan net g/MJ	NOx mg/MJ (c)	PM mg/MJ (c)	Observations
Turbofan kéro classique	kero	37%	197	—	197	400±80	68±20	Référence mondiale — 100% fossile
Turbofan + SAF HEFA 50 %	saf	37%	98	—	98	395±80	54±15	50% fossile + 50% biogénique (neutre) — CO ₂ atm = part fossile seule
Turbofan + SAF HEFA 100 %	saf	37%	0	—	0	390±80	48±15	100% biogénique → CO ₂ atm = 0 (cycle court biomasse)
Turbofan CH ₄ GNL fossile	ch4	44%	125	—	125	200±40	5±2	–37 % CO ₂ vs kéro ≡ ~46,5 % SAF (voir §Notes)
Turbofan bioCH ₄ 50 % + biochar	ch4	44%	63	-34	28	200±40	5±2	50% fossile seulement contribue à l'atm. Crédit biochar séparé.
Turbofan bioCH ₄ 100 % + biochar	ch4	44%	0	-68	-68	200±40	5±2	CO ₂ atm = 0 (100% biogénique) + séquestration biochar → bilan négatif

VOITURE — Rex seul — comparaison carburant (voir note ÉREV §Notes)

Technologie / Architecture	Carburant	η	CO ₂ ajouté à l'atm. g/MJ (a)	Séquest. biochar g/MJ (b)	Bilan net g/MJ	NOx mg/MJ (c)	PM mg/MJ (c)	Observations
Essence thermique classique	essence	25%	287	—	287	700±100	32±8	Marché actuel moyen — 100% fossile
Hybride standard (HEV)	essence	32%	224	—	224	560±80	25±6	Toyota, Honda — 100% fossile
Horse Renault hybride mild $\angle$	essence	38%	189	—	189	315±50	16±5	Exception — rendement exceptionnel non généralisable
ÉREV Rex CH ₄ fossile	ch4	48%	115	—	115	100±20	2±1	Rex seul — 100% fossile
ÉREV Rex bioCH ₄ 50 % + biochar	ch4	48%	57	-31	26	100±20	2±1	50% fossile seulement. Crédit biochar séparé.
ÉREV Rex bioCH ₄ 100 % + biochar	ch4	48%	0	-62	-62	100±20	2±1	CO ₂ atm = 0 (biogénique) + biochar → bilan négatif
BEV mix élec France 2026	Électricité	90%	15	—	15	0	0	Référence électrique — mix FR ~50 gCO ₂ /kWh

CAMION LOURD — Poids lourd > 26 t — longue distance

Technologie / Architecture	Carburant	η	CO ₂ ajouté à l'atm. g/MJ (a)	Séquest. biochar g/MJ (b)	Bilan net g/MJ	NOx mg/MJ (c)	PM mg/MJ (c)	Observations
----------------------------	-----------	--------	--	---------------------------	----------------	---------------	--------------	--------------

Diesel Euro VI	diesel	42%	174	—	174	190±40	7±2	Référence — 100% fossile
GNL fossile	ch4	44%	125	—	125	110±25	2±1	–28 % CO ₂ vs diesel — 100% fossile
BioGNL 50 % + biochar	ch4	44%	63	-34	28	110±25	2±1	50% fossile seulement. Crédit biochar séparé.
BioGNL 100 % + biochar	ch4	44%	0	-68	-68	110±25	2±1	CO ₂ atm = 0 (biogénique) + biochar → bilan négatif
H ₂ FCEV pile à combustible	h2	55%	0	—	0	9±5	0	Zéro CO ₂ combustion — pénalité logistique élevée

MARITIME — Navire de commerce international

Technologie / Architecture	Carburant	η	CO ₂ ajouté à l'atm. g/MJ (a)	Séquest. biochar g/MJ (b)	Bilan net g/MJ	NOx mg/MJ (c)	PM mg/MJ (c)	Observations
HFO diesel 2 temps lent	hfo	52%	151	—	151	1730±200	231±50	Référence — le plus polluant des transports
GNL dual-fuel fossile	ch4	50%	110	—	110	600±100	20±5	–27 % CO ₂ vs HFO — 100% fossile
BioGNL 50 % + biochar	ch4	50%	55	-30	25	600±100	20±5	50% fossile seulement. Crédit biochar séparé.
BioGNL 100 % + biochar	ch4	50%	0	-60	-60	600±100	20±5	CO ₂ atm = 0 (biogénique) +

								biochar → bilan négatif
Méthanol dual-fuel	methanol	40%	173	—	173	700±100	13±4	Plus émetteur CO ₂ que GNL fossile à η inférieur
NH ₃ moteur thermique	nh3	40%	0	—	0	1000±200	0	Zéro CO ₂ combustion — NOx fuel-NOx élevés + slip NH ₃ toxique

3 — LOGISTIQUE, TRANSPORT ET CONDITIONNEMENT DES CARBURANTS

La pénalité énergétique de conditionnement est souvent ignorée des comparatifs. Elle pénalise fortement l'H₂ (~45 % PCI perdu en liquéfaction seule, ~15 % en compression 700 bar) et dans une moindre mesure NH₃ (~32 %) et méthanol (~25 %). Le CH₄ GNL présente parmi les alternatives aux liquides conventionnels un compromis particulièrement favorable.

Carburant	Transport camion	Pénalité énergie chaîne	PCI vol MJ/L	Aviation	Voiture/Camion	Maritime	Verdict
Kérosène/Diesel/Essence	Citerne standard	~0,3 %	34–36	✓Existante	✓Existante	✓Existante	Référence
SAF HEFA	Citerne (drop-in)	~2–4 %	33–34	✓Drop-in	✓Drop-in	—	Drop-in — feedstock limité
CH ₄ GNL –162°C	Camion cryo isolé	~2 %	21,1	✂ Hubs à créer	✓~10 stations FR	✓Maritime existant	Adaptation modérée
CH ₄ GNV 250 bar	Tube trailer acier	~1 %	9,4	— (trop lourd)	✓~500 stations FR	— (volume insuf.)	Voiture/camion ✓

H ₂ liquide -253°C	Camion LH ₂ spécial	~45 %	8,5	Pénalité x4 vs GNL	Très élevée	Quasi inexistante	Pénalité énergétique très élevée
H ₂ gaz 700 bar	Tube trailer 700 bar	~15 %	4,8	Volume x7	Station ~2–3 M€	Quasi inexistante	Volume très défavorable
NH ₃	Camion-citerne chimique	~32 %	12,7	— NOx/toxicité	— toxicité	↘ En test IMO	NOx + toxicité — usage très contraint
Méthanol	Camion-citerne standard	~25 %	15,7	—	—	↘ En déploiement	CO ₂ élevé à faible η — intérêt soufre ECA

4 — DOMAINES D'OPTIMUM : CE QUE CETTE ANALYSE DÉMONTRE ET CE QU'ELLE NE DÉMONTRE PAS

Cette comparaison de carburants ne démontre pas qu'un vecteur unique doit remplacer tous les autres. Elle montre que les propriétés physiques, les rendements, les contraintes de stockage et les infrastructures conduisent à des optimums différents selon les usages.

Usage	Solution favorable	Raison principale	Limite ou condition	Réf. Résilience
Automobile urbaine (< 50 km/j)	BEV	Rendement 90 % · zéro émission locale	Infra charge · batterie 80 kWh	BEV référence électrique
Automobile polyvalente	ÉREV bio-CH ₄	Batterie 25 kWh (urbain) + Rex CH ₄ (LD) Bilan négatif possible	Déploiement bioCH ₄ progressif	ÉREV V2.2 — Corpus V11
Camion lourd longue distance	BioGNL / BioGNV	PCI vol 21 MJ/L · même véhicule fossile→bio Bilan négatif	Stations GNL longue distance (~10 FR)	Camion ÉREV Rex V11

Aviation longue distance	CH ₄ GNL / bioCH ₄	PCI vol 61 % kéro · réservoirs gérables (+36 %) -90 % PM/contrails	Réservoirs cryo · certification EASA	Note Aviation BioGNL V11
Maritime international	BioGNL dual-fuel	Infra portuaire LNG existante · -91 % PM Bilan négatif possible	GNL dual-fuel · qualification IMO	Synthèse Carburants V1
H₂	Usages industriels chimie / FCEV spécifiques	Propriété réductrice irremplaçable en chimie	PCI vol très défavorable pour distribution	Hors périmètre Résilience
NH₃	Cas maritimes sous contraintes ECA	Zéro CO ₂ combustion	NOx élevés · toxicité · slip	Usage très contraint
SAF	Compatibilité flotte existante (drop-in)	Aucune modification avion ni infrastructure	Feedstock limité (~6 Mt/an) · coût ×3–5	Solution transition courte durée

5 — NOTES MÉTHODOLOGIQUES

(a) CO₂ ajouté à l'atmosphère — définition et périmètre

- Définition : cette colonne représente uniquement le CO₂ d'origine fossile émis lors de la combustion, rapporté au MJ utile après rendement η . Formule : $\text{kg CO}_2/\text{kg carburant} \times \text{fraction fossile} / \text{PCI (MJ/kg)} / \eta \times 1\,000$.
- CO₂ biogénique : le CO₂ émis par la combustion d'un carburant biogénique (SAF, bioCH₄) a été prélevé sur l'atmosphère lors de la croissance de la biomasse. Le cycle est fermé — la concentration atmosphérique nette ne change pas. Cette fraction n'apparaît donc pas dans la colonne CO₂ ajouté à l'atm.
- Exemple SAF HEFA 50 % (aviation) : CO₂ physique de combustion = 195 g/MJ (identique au kérosène, même molécule). Dont 50 % biogénique (neutre) + 50 % fossile (atmosphérique) → CO₂ ajouté à l'atm. = 98 g/MJ. La V4 affichait 195 — c'était le CO₂ physique total sans distinction, valeur corrigée en V5.
- Exemple bioCH₄ 100 % : CO₂ physique de combustion = 125 g/MJ (même molécule CH₄ fossile ou bio). Dont 100 % biogénique → CO₂ ajouté à l'atm. = 0 g/MJ. Le crédit biochar s'ajoute ensuite en colonne séparée → bilan net négatif.

Cette distinction est fondamentale pour la crédibilité du document face à des interlocuteurs techniques (DGEC, ADEME) : confondre CO₂ physique de combustion et CO₂ net atmosphérique conduit à sous-estimer l'avantage du SAF et du bioCH₄.

Note ÉREV — comparaison carburant vs bilan véhicule profil mixte

- Les valeurs de la section VOITURE représentent l'intensité carbone du Rex (moteur thermique) seul, en mode fonctionnement thermique pur. C'est le périmètre correct pour comparer les carburants entre eux.
- Bilan réel du véhicule sur profil 77 % urbain (électrique) + 23 % longue distance (Rex) : le CO₂ moyen pondéré est environ 3× inférieur aux valeurs Rex seul. Exemple : ÉREV Rex CH₄ fossile = 115 g/MJ Rex seul → ~38 g/MJ sur profil mixte (77 % × 15 g/MJ élec + 23 % × 115 g/MJ Rex). Ce bilan véhicule fait l'objet du Bilan Environnemental Véhicules V1 — Résilience V11.

Un tableau séparé de comparaison véhicules sur usage réel (g CO₂/km, profil mixte) est prévu en V6 du Comparatif. Les deux périmètres sont nécessaires et complémentaires.

(b) Séquestration biochar — hypothèse industrielle mesurable

- Crédit retenu : -1,5 kg CO₂/kg bioCH₄ (hypothèse conservatrice). Calcul : ~0,3–0,5 kg biochar/kg bioCH₄ × 2,5–3,1 t CO₂eq/t biochar certifié EBC. Source : Gisement National Net V3 — Résilience V11.
- Ce crédit n'est pas une propriété intrinsèque du biométhane — il résulte de la combinaison d'une production biogénique ET d'une séquestration durable via le biochar. Il est conditionné à : (1) bioCH₄ issu de pyrogazéification ≥ 700°C avec biochar certifié EBC H/Corg ≤ 0,4 ; (2) fuites méthane ≤ 1 % chaîne complète ; (3) biochar appliqué en sol agricole avec suivi 100 ans.
- Validation en cours : sites pilotes GRDF (Novéa/Gironde, Charwood/Morbihan, Elvéa+LERMAB/Vosges — lauréats janvier 2026, €400k chacun). Ces trois sites fournissent la validation Phase 0 du ratio biochar/biométhane.

(c) NOx et PM — ordres de grandeur indicatifs

- Les valeurs NOx et PM sont des ordres de grandeur calculés à partir d'émissions spécifiques par MJ de carburant divisées par η . Fourchettes ±20–30 % selon moteur, stratégie de combustion et post-traitement. Non certifiés par homologation.
- Réductions structurelles liées à la chimie du méthane (indépendantes du post-traitement) : zéro soufre → zéro SO₂ ; température de flamme inférieure → réduction NOx thermiques (mécanisme Zeldovich).

Pour publication formelle (DGEC, ADEME) : remplacer par mesures certifiées banc d'essai ou données homologation EASA/Euro VI. Les ordres de grandeur sont cohérents avec IMO GHG Study 2020, JEC Well-to-Wheel v5 et IATA Fuel Study 2022.

Métriques CO₂ aviation — 35 % vs 46,5 % SAF équivalent

- ① Métrique chimique (g CO₂/MJ utile) : CH₄ fossile → 125 g/MJ ajoutés à l'atm. vs kérosène 197 g/MJ = -37 %. Équivaut à ~35 % de SAF HEFA — comparaison carburant-à-carburant, indépendante de la masse embarquée.
- ② Métrique opérationnelle (t CO₂/vol) : l'avion GNL emporte 89 t de carburant en moins (PCI +16 %). L'équivalence monte à ~46,5 % de SAF. Formule : $995 \times (1 - X \times 0,80) = 625 \text{ t} \rightarrow X = 46,5 \%$.

Les deux sont corrects dans leur contexte. Le 35 % compare les carburants. Le 46,5 % compare l'impact opérationnel d'un vol. Source : Aviation BioGNL Synthèse V11.

Documents Programme Résilience V11 : Gisement National Net V3 · Note Aviation BioGNL V11 (mai 2026) · Segment 4 Long-Courrier V6 · Corpus ÉREV V3 Final · Bilan Environnemental Véhicules V1 (août 2026) · Note Architecture Juridique CDR V5 · Comparatif Multi-Secteur V1–V4. Sources externes : IPCC AR6 (GWP100) · NIST Methane Properties · IATA Long Range Fuel Study 2022 · IMO GHG Study 2020 · ADEME ACV véhicules 2024 · JEC Well-to-Wheel v5 · EBC/Puro.earth · CRCF UE 2024/3012 · EASA CS-25.