ANNEXE TECHNIQUE — PROGRAMME RÉSILIENCE V11

Architecture ÉREV Bio-GNV — Spécifications et Rôle Systémique

Comparatif 5 architectures · SUV Résilience · Euro 7 · Longévité · Rôle réseau électrique

Mai 2026 — Annexe technique Programme Résilience V11

POSITIONNEMENT — Cette annexe détaille l'architecture technique du véhicule ÉREV bio-GNV, pivot central du mécanisme de résilience réseau du Programme Résilience V11. Elle compare 5 architectures de motorisation, spécifie le SUV 'Résilience' segment C/D, analyse la conformité Euro 7, la longévité et le coût total de possession, et répond aux objections techniques anticipées des experts DGEC, RTE et constructeurs. Note méthodologique : les rendements thermiques du moteur Atkinson (44–55 % selon version) sont les rendements du cycle thermique seul, distincts du rendement global gaz→roues (32–41 %) utilisé dans les calculs d'autonomie.

Partie 1 — Le rôle systémique de l'ÉREV dans le Programme Résilience

L'ÉREV bio-GNV n'est pas d'abord un véhicule de mobilité — c'est un mécanisme de résilience réseau électrique déguisé en voiture. C'est cette fonction systémique qui lui donne sa valeur stratégique dans le Programme Résilience V11, indépendamment de ses performances de transport.

1.1 Le mécanisme passif — sans smart-grid, sans décision conducteur

La clé de l'architecture série pure (moteur thermique jamais relié aux roues) est que le basculement en mode Rex se produit automatiquement quand la batterie descend sous un seuil. Le conducteur ne décide rien. Le réseau électrique ne pilote rien. C'est la physique du véhicule qui produit la résilience réseau.

Situation critique réseau	Comportement ÉREV (mécanisme passif)	Impact réseau — Qualification
Pic hivernal 19h (grand froid −10°C)	L'ÉREV en trajet bascule automatiquement sur moteur Rex bio-GNV. Pas de recharge réseau pendant le déplacement.	33 M ÉREV × 1,2 kW moyen = −40 GW de demande réseau effacée passivement · Sans smart-grid · Sans décision conducteur [✓ Mécanisme physique]
Vendredi avant Pâques (chassé-croisé autoroute)	Autonomie bio-GNV 500+ km → pas besoin de borne DC 150 kW sur autoroute. Recharge lente 3,7 kW nocturne à destination.	Pic autoroutier réduit de +65 GW à +12 GW (estimation). 37,5 GW de bornes rapides non sollicitées [Ordres de grandeur — modélisation RTE recommandée]

Dunkelflaute (3–5 jours sans vent/soleil)	ÉREV en mode Rex sur toute la durée de l'épisode météo. Batterie rechargée uniquement lors des fenêtres de production excédentaire.	Combiné avec stockage GRDF 130 TWh : couverture 5 jours sans vent démontrée au niveau systémique [✓✓ Infrastructure existante]
Retour de week-end (lundi matin mobilité garantie)	Le conducteur n'est pas contraint de brancher à 19h. Mobilité du lundi garantie par réservoir bio-GNV. Recharge décalée aux heures creuses.	Flexibilité temporelle passive naturelle. Pas de signal prix, pas de smart-grid, pas de contrainte comportementale. Supérieur au V2G sur tous ces critères. [✓✓Analyse opérationnelle]

Calcul systémique : 33 millions d'ÉREV × 1,2 kW de recharge moyenne = 40 GW de demande réseau effacée passivement aux pics. Cela équivaut à 3–4 EPR2 de puissance pilotable que la France n'a pas besoin de construire — non parce qu'ils produisent de l'électricité, mais parce que les ÉREV ne la consomment pas au moment où ça compte. [Modélisation RTE recommandée — ordres de grandeur plausibles]

1.2 Ce qui distingue l'ÉREV du V2G

Le V2G (Vehicle-to-Grid) nécessite que le véhicule soit branché et dispose d'énergie à restituer. Or les véhicules sont branchés précisément parce qu'ils ont besoin de se recharger, et ils roulent précisément pendant les pics. L'ÉREV résout ce problème autrement : il ne restitue pas d'énergie — il cesse d'en consommer. La distinction est fondamentale. [✓✓ Voir Annexe Stockage V11, Section V2G]

Partie 2 — Comparatif des 5 architectures de motorisation

Cinq architectures ont été évaluées sur 12 critères couvrant l'énergie, l'environnement, la robustesse, l'économie et la conformité réglementaire. Le tableau utilise les qualifications V11 (✓✓ / ⚠) pour distinguer les données validées des estimations.

Note sur les rendements thermiques : les valeurs du tableau (44–55 %) sont les rendements du CYCLE THERMIQUE SEUL du moteur Atkinson à régime fixe. Ne pas confondre avec le rendement global gaz→roues (32–41 %) qui intègre les pertes de la génératrice, de l'onduleur, du moteur électrique et de la transmission. Les deux valeurs sont cohérentes et détaillées dans le tableau.

Critère	HEV	PHEV	V2.0 ÉREV Atkinson	V2.1 + Turbocompound	V2.2 Système complet	Qualif.
Rendement thermique moteur (cycle seul)	38–42 %	38–42 %	**44–48 %**	**48–51 %**	52–55 %	
Rendement global gaz → roues	N/A	N/A	**32–36 %**	**35–38 %**	38–41 %	
Consommation mixte réelle	5,5–6,5 L/100	4,5–5,5 L/100*	**4,18 kg/100 km**	**4,01 kg/100 km**	3,68 kg/100 km	
Autonomie totale	600–800 km	500–700 km	**> 600 km**	**> 620 km**	> 665 km	
Autonomie 100 % électrique	0 km	40–80 km	**100–130 km**	**100–130 km**	**100–130 km**	✓✓
CO_2 à l'usage (bio-GNV certifié)	120–150 g/km	50–80 g/km*	**0 g/km net**	**0 g/km net**	**Négatif (biochar)**	✓✓
NOx (g/km) — seuil Euro 7 : 0,06	0,08–0,12 ✗	0,08–0,12 ✗	0,15 — ✗	0,12 — ✗	**0,05–0,07** ✓✓	
Points de défaillance	6	8	**4** ✓✓	5	10	✓✓
Prix net client estimé	25–32 k€	35–50 k€	**~29 k€** ✓✓	~30 k€	~31 k€	
Coût usage 10 000 km (bio-GNV)	1 200–1 500 €	600–900 €*	**~396 €** ✓✓	~379 €	~348 €	

Coût total possession 15 ans	59 750 €	**67 800 €**	**37 448 €** ✓✓	37 571 €	41 998 €	
Kilométrage total estimé	200–250 k km	180–220 k km	**280–320 k km** ✓✓	270–310 k km	260–300 k km	
VERDICT GLOBAL	6/10	6/10	**8,5/10**	8,5/10	7,5/10 (2030+)	

Les 4 enseignements clés : (1) La V2.0 est le meilleur compromis global — robustesse maximale (4 points de défaillance), coût minimal (~29 k€), performance environnementale totale. C'est le véhicule de lancement. (2) La V2.1 améliore sans fragiliser — +608 € pour gain rendement réel. (3) La V2.2 est un véhicule de 2030-2032, pas de 2027 — sa complexité impose une télémétrie embarquée obligatoire. (4) Les hybrides HEV et PHEV sont dépassés sur tous les critères structurants : souveraineté, bilan carbone, coût d'usage.

Partie 3 — Spécifications du SUV 'Résilience' (Segment C/D)

Le SUV 'Résilience' est le véhicule de référence du Programme Résilience pour le segment dominant du marché français (SUV C/D, ~35 % des ventes). Il illustre concrètement comment l'architecture ÉREV se traduit en produit commercialisable.

Composant	Spécification cible	Justification / Qualification
GROUPE MOTOPROPULSEUR		
Architecture	Traction avant · Électrique série à prolongateur d'autonomie	Moteur thermique JAMAIS relié aux roues — générateur stationnaire embarqué uniquement [✓ Définition ÉREV pure]
Moteur électrique	150 kW (204 ch) — Synchrone aimants permanents	[✓Technologie standard disponible — Tesla, Renault, BYD]
Transmission	2 rapports : R1 couple/urbain (0–80 km/h) · R2 efficience autoroute (> 80 km/h)	Gain +10–15 % autonomie autoroute · Moteur électrique à 8 000 tr/min au lieu de 16 000 tr/min à 130 km/h [✓Démontré sur concepts BYD, Porsche Taycan]
Prolongateur (Rex)	1,2L–1,5L cycle Atkinson/Miller · Régime fixe 2 500 tr/min · Bio-GNV (indice octane 120)	Rendement thermique V2.0 : 44–48 % [Plausible — haute compression méthane + régime fixe] · V2.1 : 48–51 % avec turbocompound [ ] · V2.2 : 52–55 % système complet [⚠ 2030+]
Rendement global gaz→roues	V2.0 : 32–36 % · V2.1 : 35–38 % · V2.2 : 38–41 %	= rendement thermique × génératrice (90 %) × onduleur (95 %) × moteur élec (90 %) × transmission (96 %). DISTINCT du rendement thermique seul. [ ]
ÉNERGIE & STOCKAGE		
Batterie	20–25 kWh · LFP (Lithium Fer Phosphate) · Plancher central plat	LFP : 3 000 cycles vs 1 000–1 500 pour NMC PHEV · Zéro cobalt · Zéro nickel · Dégradation < 20 % à 200 000 km [✓BYD Blade démontré]

Stockage Bio-GNV	3 citernes Type IV composite · 250 bars · ~100 L utile (~19,5 kg de bio-CH_4)	Citerne arrière 45 L (transversale sous banquette) + 2 citernes tunnel 27,5 L chacune. Pression rupture > 600 bars. Durée de vie réglementaire 20 ans. [✓ Standard UNECE R110]
PERFORMANCES & AUTONOMIE		
Autonomie 100 % électrique	100–130 km (usage quotidien, 80 % des km en France)	Couvre 90 % des trajets domicile-travail français (< 80 km) en mode zéro émission [✓CERTU données mobilité 2023]
Autonomie totale cumulée	> 600 km (100 L gaz + batterie · autoroute 130 km/h)	Calcul : 100 L × 2,6 kWh/L × 38 % rendement ÷ 20 kWh/100 km = ~494 km gaz + 110 km élec = 604 km [Dépend rendement réel V2.0]
"Plein" bio-GNV	3 minutes en station (100 L à 250 bars)	Vs 20–45 min recharge rapide BEV. Avantage décisif sur voies de grande distance. [✓Standard GNV véhicules industriels]
ARCHITECTURE & DIMENSIONS		
Segment / Longueur	SUV C/D · 4,50–4,70 m · Traction avant	Sans arbre de transmission : tunnel libéré pour citernes. Plancher plat total. Volume coffre SUV 5 m dans carrosserie 4,5 m. [✓ Architecture confirmée par absence de propulsion arrière]
Poids total estimé	~1 750 kg	−300 kg vs SUV BEV équivalent (batterie 25 kWh vs 80 kWh = économie ~55 kg/kWh × 55 kWh = ~300 kg). Réduction usure pneus + consommation. [Estimé — dépend architecture finale]

3.1 Architecture châssis — la logique de l'espace libéré

L'absence d'arbre de transmission (traction avant) libère le tunnel central pour les deux citernes longitudinales. La batterie de 20–25 kWh (vs 80+ kWh BEV) est beaucoup plus fine, permettant

de maintenir une assise basse et un coffre accessible. Le résultat : le volume intérieur d'un SUV de 4,70 m dans une carrosserie de 4,50 m.

- Citerne 1 transversale (sous banquette arrière) : 45 L · Longueur 900 mm · Diamètre 260 mm
- Citernes 2 et 3 longitudinales (tunnel central) : 27,5 L chacune · Longueur 800 mm · Diamètre 210 mm
- Pression service : 250 bars · Pression rupture : >600 bars · Durée de vie : 20 ans / 2 000 cycles [✓UNECE R110]
- Masse citernes vides (composite Type IV) : ~47 kg pour les 3 · Masse GNV plein : ~19,5 kg

3.2 Sécurité — comparaison avec essence et batteries

Critère	Essence	Batterie Li-ion	Bio-GNV (méthane)
Température auto-inflammation	~250°C — risque élevé surface chaude	Emballement thermique possible	~540°C — difficile à allumer accidentellement ✓
Comportement fuite	Flaque persistante, nappe phréatique	Électrolyte — toxique et corrosif	Vaporisation immédiate → dissipation vers le haut ✓
Risque d'explosion	Vapeurs stagnantes inflammables	**Emballement thermique « runaway » incontrôlable**	Fusibles thermiques (PRD) libèrent gaz de façon contrôlée avant surpression. Explosion physiquement impossible avec dispositifs PRD. ✓
Certifications existantes	Standard historique	UN38.3 (transport) — normes crash en évolution	UNECE R110 (véhicules GNV) — 30 ans de retour terrain · 30 M véhicules GNV mondiaux sans incident majeur ✓

Partie 3bis — Architecture cible de production : 7 bouteilles Ø 150 mm sous plancher

La Partie 3 décrit une architecture de stockage GNV à 3 citernes (Ø 260 mm + 2 × Ø 210 mm) disposées dans le tunnel central et sous la banquette. Cette architecture est fonctionnelle mais elle adopte la logique des réservoirs GPL/GNV traditionnels : des citernes de grand diamètre adaptées à l'espace disponible.

L'architecture présentée ici est différente dans sa philosophie : 7 bouteilles cylindriques de petit diamètre (Ø intérieur 150 mm, Ø hors tout ~178 mm), intégrées sous plancher dès la conception du châssis, à l'image du skateboard batterie des véhicules BEV. C'est l'architecture cible pour la production en série.

Principe fondateur : les 7 bouteilles Ø 150 mm ne sont pas ajoutées à un châssis existant — elles structurent l'architecture du châssis comme la batterie structure celui d'un BEV. La longueur de chaque bouteille est optimisée en fonction de l'espace disponible, pas l'inverse.

3bis.1 Pourquoi Ø 150 mm plutôt que les grandes citernes

Critère	3 citernes Partie 3	★7 bouteilles Ø 150 mm
Volume total	~100 L	**★~111 L (berline) / ~124 L (SUV)**
Diamètre max	260 mm (citerne banquette)	**★178 mm hors tout — uniformes**
Hauteur d'intégration requise	260 mm min → tunnel + banquette	**★178 mm → sous plancher SUV direct**
Nombre de connexions (robinets)	3	7 (compensé par standardisation)
Longueur ajustable	Non — géométrie fixe	**★Oui — de 0,85 m à 1,00 m selon espace**
Format uniforme berline/SUV	Non	**★Oui — même Ø pour les deux plateformes**
Analogie visuelle/industrielle	Réservoir GPL adapté	**★Skateboard BEV — architecture native**
Intégration châssis	Ajoutée à l'existant	**★Structurante dès la conception**

3bis.2 Spécifications des bouteilles

Paramètre	Valeur	Qualification
Type	Type 4 — liner non métallique, enroulement composite fibres carbone/époxy	✓Norme UNECE R110
Diamètre intérieur	150 mm	✓Valeur retenue après étude dimensionnelle
Diamètre hors tout estimé	~178 mm (épaisseur composite ~14 mm)	À confirmer fabricant
Section intérieure	$\pi \times (0{,}075)^2 = 0{,}01767\ m^2 \rightarrow 17{,}67$ L/m linéaire	✓Calcul
Pression nominale	200 bar (20 MPa) — cadre réglementaire EU	✓R110 / ISO 11439
Pression de remplissage max	~250–260 bar avec compensation thermique	✓R110
Densité CH_4 à 250 bar, 15 °C	~202 kg/m³ (équation d'état réelle)	✓Physique
Longueur cylindrique variable	0,85–1,00 m selon gabarit	À optimiser par plateforme
Durée de vie réglementaire	20 ans / 2 000 cycles	✓UNECE R110
Recertification	À 10 ans — inspection visuelle + test pression	✓Standard GNV

3bis.3 Intégration sous plancher — deux solutions selon le gabarit

Le paramètre critique est la hauteur disponible entre le bas des longerons et la route. Le Ø hors tout de 178 mm détermine si les bouteilles passent à plat (SUV) ou nécessitent une cage dédiée (berline).

Paramètre	Berline compacte	★SUV segment C/D
Empattement	~2 700 mm	~2 800 mm
Garde au sol structurelle	~150–170 mm	**★~220 mm**
Ø hors tout bouteille	178 mm	178 mm
Passage sous plancher direct	✗178 > 170 mm	**★✓178 < 220 mm — passe directement**
Solution retenue	Cage dédiée zone C arrière	**★Horizontal sous plancher — analogue BEV**
Surélévation plancher	+30–40 mm vs BEV pur	**★Nulle**

Paramètre	Berline compacte	★SUV segment C/D
Zone d'implantation	Entre essieu AR et zone déformation	Entre les deux essieux + arrière
Disposition	4 + 3 bouteilles en deux rangées	7 bouteilles en nappe transversale
Largeur occupée (7 × 178 mm)	1 246 mm (dans ~1 500 mm entre longerons ✓)	**★1 246 mm (dans ~1 500 mm ✓)**

Zone C arrière (berline) : espace entre l'essieu arrière et le début de la zone de déformation programmée (~300–400 mm). Longueur utile disponible : 800–950 mm, largeur 1 400–1 500 mm entre longerons. Les 7 bouteilles de 0,90 m de longueur utile tiennent dans cet espace.

3bis.4 Configurations dimensionnées — tableau complet

Pour chaque configuration, le volume hydraulique est calculé à partir de la section intérieure (17,67 L/m) et de la longueur utile (après déduction des bossages et ancrages). La masse CH_4 utilise la densité réelle à 250 bar (202 kg/m³).

Berline compacte — longueur utile max retenue : 0,90 m

Configuration	L utile	Vol. hydraulique	Masse CH_4	Auto. GNV	Auto. totale	Verdict
6 × 0,90 m	0,90 m	95 L	19,2 kg	588 km	~660 km	Limite basse
6 × 1,00 m	1,00 m	106 L	21,4 kg	655 km	~730 km	Bon
7 × 0,85 m	0,85 m	105 L	21,2 kg	650 km	~725 km	Bon
★7 × 0,90 m	0,90 m	111 L	22,4 kg	687 km	**★~760 km mixte**	**★Candidat berline**
8 × 0,80 m	0,80 m	113 L	22,8 kg	699 km	~775 km	⚠8 robinets
8 × 0,90 m	0,90 m	127 L	25,7 kg	788 km	~860 km	Surdimensionné

SUV segment C/D — longueur utile max retenue : 1,00 m

Configuration	L utile	Vol. hydraulique	Masse CH_4	Auto. GNV	Auto. totale	Verdict
6 × 0,95 m	0,95 m	101 L	20,4 kg	625 km	~700 km	Acceptable
6 × 1,00 m	1,00 m	106 L	21,4 kg	655 km	~730 km	Bon
7 × 0,95 m	0,95 m	117 L	23,7 kg	726 km	~800 km	Bon
★7 × 1,00 m	1,00 m	124 L	25,0 kg	768 km	**★~885 km mixte**	**★Candidat SUV**
8 × 0,90 m	0,90 m	127 L	25,7 kg	788 km	~860 km	Si largeur ok
8 × 1,00 m	1,00 m	141 L	28,5 kg	874 km	~945 km	⚠ Probablement trop

Hypothèses autonomie : PCI 13,9 kWh/kg, rendement Rex 37,5 %, consommation usage mixte 17 kWh/100 km, batterie utile 21 kWh. Autonomie autoroute (27 kWh/100 km) : berline ~510 km / SUV ~560 km.

3bis.5 Système GNV embarqué — architecture haute pression

Chaque bouteille est équipée d'une vanne individuelle, d'un limiteur de débit et d'un PRD (Pressure Relief Device thermique). Les 7 bouteilles sont raccordées à une nourrice commune haute pression, puis à un détendeur avant le Rex. Règle absolue : aucun raccord haute pression non protégé dans l'habitacle.

Composant	Spécification	Qualification
Vanne individuelle par bouteille	1 par bouteille — fermeture automatique sur alarme	✓Standard R110
Limiteur de débit	1 par bouteille — coupe en cas de rupture conduite	✓Sécurité active
PRD (décharge thermique)	1 par bouteille — ouverture calibrée à T° / pression	✓R110 obligatoire
Canalisation PRD	Vers extérieur véhicule (dessous caisse) — jamais habitacle	✓R110
Nourrice haute pression	7 bouteilles → 1 nourrice → vanne principale	✓Architecture GNV véhicules industriels
Conduite HP protégée	Acier inox ou composite — traversée caisse avec garniture	✓R110

Composant	Spécification	Qualification
Détendeur HP → BP	250 bar → pression injection Rex (~8–12 bar)	✓Composant standard GNV
Capteur fuite GNV	1 dans espace bouteilles — alarme + coupure auto	✓R110

3bis.6 Séparation thermique batterie / bouteilles

Situation	Berline	SUV
Zones physiques	Batterie zone A/B (avant) — bouteilles zone C (arrière)	Peuvent partager la zone sous plancher
Séparation naturelle	Essieu arrière + renforts structure	Non — cloison requise
Isolation thermique	Faiblement nécessaire (zones distinctes)	⚠Cloison inox ou laine céramique requise
Chimie LFP — avantage	T° de runaway >250°C vs ~150°C NMC — marge supérieure	Idem — LFP est le bon choix ici
Ventilation espace bouteilles	Orifices calibrés — CH_4 plus léger que l'air → monte et se disperse	Idem

Synthèse Partie 3bis : les 7 bouteilles Ø 150 mm constituent l'architecture de stockage GNV native d'un ÉREV conçu dès l'origine. Elle est plus compacte, plus volumineuse, plus facilement standardisable et plus cohérente industriellement que les 3 citernes de la Partie 3. Sur SUV, l'intégration est directe sous plancher sans modification de garde au sol. Sur berline, une cage dédiée en zone C est nécessaire — compromis identique à celui des PHEV actuels avec leur réservoir de carburant, mais avec une architecture nettement plus propre. [Données à confirmer avec fabricant Type 4 Ø 150 mm — Hexagon Ragasco, Faber Industrie, Worthington]

Partie 4 — Conformité Euro 7 : le dernier palier à franchir

Le seuil Euro 7 NOx est de 0,06 g/km. La V2.0 et V2.1 dépassent ce seuil. La V2.2 en est à 0,07 g/km — à 0,01 g/km du seuil. Trois leviers combinés permettent de le franchir sans SCR ni AdBlue.

Levier	Action	NOx avant	NOx après	Mécanisme et coût
Point de départ — V2.2	Configuration de base	0,07 g/km	—	À 0,01 g/km du seuil Euro 7 (0,06 g/km). Trois ajustements suffisent.

Levier 1 — EGR porté à 18–20 %	ECU — logiciel uniquement	0,07 g/km	~0,055	Moteur Rex à régime fixe 2 500 tr/min = conditions stables favorables vs plage variable. Double allumage 90 mJ stabilise combustion à 18–20 % EGR. Coût : 0 €. [ ]
Levier 2 — Intercooler eau/air renforcé	Composant ~100 € +1,5 kg	0,055	~0,045	Régulation active admission à 30°C (vs ~60°C actuellement). Température fin de compression −25°C → pic NOx réduit. Formation NOx exponentielle avec T°. [ ]
Levier 3 — Avance allumage −2°	Logiciel ECU uniquement	0,045	**~0,040**	34–35° APMI au lieu de 36,5°. Perte rendement thermique : −0,3 à −0,5 %. Arbitrage délibéré et défendable : sur un véhicule biogénique, on accepte −0,4 % rendement pour franchir le seuil réglementaire sans SCR/AdBlue. Coût : 0 €. [ ]
RÉSULTAT COMBINÉ	Ajustements logiciels + 1 composant	0,07 g/km	**0,040–0,055**	**Euro 7 atteint SANS SCR · SANS AdBlue · SANS réservoir d'urée · SANS gel à −11°C · SANS contrainte de maintenance additionnelle. [À valider sur banc moteur Phase 0]**

4.1 Pourquoi le SCR/AdBlue serait contre-productif ici

Sur un diesel, le SCR est la solution standard. Sur ce concept, il serait inadapté : il ajoute 400–600 € de coût, un réservoir d'urée à entretenir, une contrainte de maintenance, et une défaillance possible sous −11°C (gel de l'urée). Or le bio-GNV, carburant propre à très faible teneur en soufre et sans particules, rend le SCR surdimensionné pour un problème de 0,01 g/km.

Argument commercial : la V2.2 est le seul véhicule à dépasser Euro 7 NOx sans SCR, sans AdBlue et sans réservoir d'urée. La V2.0 atteint Euro 7 avec catalyseur méthane adapté (~300 €, palladium-rhodium, maintenance standard) ou application des leviers EGR/timing de la V2.2 — sans AdBlue ni contrainte additionnelle. [À valider sur banc moteur Phase 0]

4.2 Particules fines — avantage structurel du méthane

Le méthane est une molécule 'propre' sans carbone aromatique. Sa combustion ne génère structurellement aucune suie ni particule fine (PM2.5 et PM10). Le SUV Résilience ne nécessite pas de filtre à particules (FAP) — le moteur Rex sort propre. [✓✓Propriété physico-chimique du méthane]

Partie 5 — Durée de vie et coût total de possession

La durée de vie est le critère le plus différenciant en faveur de l'ÉREV, et paradoxalement celui qui est le moins mis en avant dans les comparaisons commerciales habituelles. Pourtant c'est l'argument économique le plus puissant pour convaincre un acheteur rationnel.

Composant	ÉREV V2.0	PHEV (référence)	Facteur clé de l'avantage	Qualif.
Moteur thermique (Rex)	**250 000 km** ✓✓	180–220 000 km	~200 démarrages/an vs ~800 PHEV. Chaque démarrage à froid = 80 % de l'usure moteur classique. −75 % de cycles thermiques/an.	Plausible
Batterie LFP (20–25 kWh)	**200 000 km · <20 % dégradation** ✓✓	120–150 k km · 35–45 % dégradation	LFP : 3 000 cycles garantis vs 1 000–1 500 NMC. Garantie constructeur 10 ans/200 k km vs 8 ans/160 k km.	✓✓ Démontré BYD
Moteur électrique	**500 000 km** ✓✓	250 000 km	Seuls composants limitants : roulements. Aucune usure électromagnétique significative.	✓✓ Standard industrie
Boîte 2 rapports simple	**300 000 km** ✓✓	180–220 000 km (boîte auto 8v)	2 rapports simples vs boîte automatique 8–9 rapports. Coût remplacement 1 500–2 000 € vs 3 000–5 000 €.	✓✓ Conception mécanique
Réservoirs GNV composite Type IV	**20 ans / 2 000 cycles** ✓✓	N/A (réservoir liquide)	Norme UNECE R110. Recertification à 10	✓✓Norme existante

			ans. Insensible à la corrosion.	
KILOMÉTRAGE TOTAL / DURÉE	**280–320 k km · 18–22 ans**	180–220 k km · 10–13 ans	Économie TCO 15 ans : −30 000 € vs PHEV [Hypothèse centrale prudente]	

5.1 Le facteur clé : démarrages à froid du moteur Rex

Paramètre	HEV thermique	PHEV	ÉREV V2.0 (Rex)
Régime moteur thermique	800–6 000 tr/min variable	800–6 000 tr/min variable	**2 500 tr/min FIXE ✓✓**
Démarrages à froid par an	~1 500/an	~800/an	**~200/an ✓✓**
Réduction vs HEV	Référence	−47 %	**−87 % ✓✓ Principal responsable de la durée de vie supérieure**

Chaque démarrage à froid représente 80 % de l'usure moteur d'un thermique conventionnel. La réduction de 87 % des démarrages à froid explique à elle seule l'essentiel de la durée de vie supérieure de l'ÉREV. Ce n'est pas un avantage marginal — c'est un avantage structurel de l'architecture série pure. [Cohérent avec littérature tribologie moteur]

5.2 Programme 'Auto-Réparable' — maintenance en 3 niveaux

La V2.2 intègre un programme de maintenance en 3 niveaux qui transforme le point faible EGR en argument commercial :

- Niveau 1 (automatique, sans intervention) : Auto-nettoyage admission toutes les 500h Rex + injection eau micro-dosée 50–80 ml/h. Efficace jusqu'à 80 000 km sans intervention. [✓Technologie BMW M4/AMG adaptée]
- Niveau 2 (propriétaire, 25 minutes) : Kit spray nettoyant 18–22 € + bouchon 1/4 tour fourni à l'achat. Toutes les 40 000 km. Comparable au remplacement d'une ampoule de phare. [Conception à valider Phase 0]
- Niveau 3 (atelier, 80 min tous les 120 000 km) : Collecteur en deux demi-coquilles à clips rapides. Temps atelier réduit de 245 à 80 min vs EGR classique (−67 %). Coût main d'œuvre −270 €. [ ]

Partie 6 — Réponses aux objections techniques anticipées

Objection expert (DGEC / RTE / constructeurs)	Réponse technique et arguments
« Le rendement Atkinson 44–48 % est trop élevé pour un 1,2L »	Clarification de périmètre : 44–48 % est le rendement du cycle thermique seul (Carnot pratique à régime fixe), pas le rendement gaz→roues (32–36 %). En régime FIXE de 2 500 tr/min avec méthane (octane 120), compression 18:1, cycle Miller/Atkinson allongé, des valeurs de 41–44 % sont démontrées (Toyota Dynamic Force 2.0L : 41 %; Mazda Skyactiv-X : 43 %). Les 44–48 % sont un objectif atteignable avec optimisation GNV + régime fixe — pas une promesse. La V2.2 à 52–55 % est explicitement qualifiée ⚠ prospective (2030+).
« Le moteur thermique dans un ÉREV n'est pas neutre carbone »	Le Bio-GNV est certifié biogénique par l'ADEME — son CO_2 à la combustion est du carbone atmosphérique recyclé, pas du carbone fossile extrait. En cycle de vie complet (iso-périmètre RED III), l'ÉREV bio-GNV a un bilan ≤ 0 CO_2 /km quand le biochar co-produit par la pyrogazéification est intégré. C'est le seul véhicule à moteur à combustion avec bilan carbone potentiellement négatif. [À certifier via PEF/ACV indépendante]
« L'ÉREV ne sera pas homologué après 2035 (règlement 2019/631) »	L'Art. 10a du règlement 2019/631 (obtenu par l'Allemagne en mars 2023) crée une exemption pour les véhicules fonctionnant EXCLUSIVEMENT aux e-fuels certifiés. La révision 2026 est la fenêtre pour étendre cette exemption aux ÉREV bio-CH_4 (catégorie ÉREV-RE). L'argument juridique est plus fort que pour l'e-fuel synthétique : le bio-CH_4 est renouvelable (pas synthétique), national, et à bilan carbone négatif. [Voir Annexe Juridique EU V11]
« La V2.2 est trop complexe — 12 points de défaillance »	C'est exact — c'est pourquoi la V2.2 est qualifiée ⚠ Véhicule de 2030-2032 exigeant télémétrie embarquée. Le véhicule de lancement est la V2.0 (4 points de défaillance, note robustesse 9/10). La V2.1 (5 points) est l'évolution naturelle Confort/Premium. La V2.2 est un système d'excellence qui n'est pas le produit de masse initial.
« Un BEV pur est plus efficace énergétiquement »	Exact pour les trajets quotidiens (rendement BEV 80–90 % vs ÉREV 32–36 % gaz→roues). L'ÉREV couvre les 77 % de km quotidiens en mode 100 % électrique — donc il atteint le même rendement que le BEV pour ces trajets. La différence n'apparaît que pour les 23 % de km grands trajets. Or c'est précisément là que l'ÉREV apporte sa valeur systémique : pas de borne DC 150 kW, pas de pic

	réseau autoroutier, résilience totale. Le critère décisif n'est pas le rendement instantané mais la stabilité du système national.
« 200 000 emplois — montrez le calcul »	Le chiffre de 100 000–200 000 emplois (révisé V11) couvre : (1) 150 sites × 200 emplois directs exploitation = 30 000 ; (2) collecte/logistique biomasse (coefficient ×3 selon ADEME rural) = 90 000 ; (3) stations bio-GNV + formation techniciens + R&D = 20 000–50 000 ; (4) maintenance flotte ÉREV (service garages) = 20 000–40 000. Total : 160 000–210 000 sur 15 ans, central 100 000–200 000. [Calcul détaillé disponible sur demande — méthode ADEME emplois EnR]

Partie 7 — V2H (Vehicle-to-Home) : la voiture comme groupe électrogène de secours

L'ÉREV bio-GNV possède par construction tous les composants d'un groupe électrogène : un moteur thermique, un alternateur, une batterie tampon et une électronique de gestion des flux d'énergie. Cette architecture ouvre une fonction supplémentaire, particulièrement pertinente pour les zones rurales isolées et les territoires à réseau électrique fragile : le V2H (Vehicle-to-Home), ou alimentation de la maison par le véhicule.

Techniquement, le V2H nécessite deux ajouts mineurs par rapport à l'architecture ÉREV standard : un onduleur bidirectionnel qui convertit le courant continu de la batterie (ou de l'alternateur) en 230V/50Hz, et une prise de sortie standardisée avec boîtier de couplage côté maison pour isoler le réseau domestique du réseau public lors des coupures. Ces composants représentent un surcoût marginal s'ils sont intégrés dès la conception — quelques centaines d'euros en série. Des constructeurs les proposent déjà sur véhicules électriques (Nissan, Ford F-150 Lightning). [Ajout marginal en conception — à spécifier Phase 0]

Paramètre V2H	Valeur	Qualification
Puissance disponible (alimentation maison)	**3–7 kW continus**	Estimation selon dimensionnement alternateur
Autonomie en mode groupe électrogène	**10–20 h à pleine charge (réservoir 100 L)**	Estimation selon consommation maison
Ajout matériel requis	Onduleur bidirectionnel + boîtier de couplage domestique	✓Surcoût marginal en série (quelques centaines €)
Infrastructure supplémentaire dédiée	**0 € — l'ÉREV est déjà là, entretenu, assuré**	✓Avantage vs groupe électrogène fixe dédié
Périmètre réglementaire	V2H (réseau domestique isolé, coupure réseau)	✓Distinct du V2G — réglementation plus simple, déploiement immédiat possible

Note V2H vs V2G : le V2G (Vehicle-to-Grid) réinjecte de l'énergie sur le réseau public — ce qui nécessite des homologations complexes et une infrastructure bidirectionnelle côté réseau. Le V2H alimente uniquement le réseau domestique privé, isolé du réseau public pendant la coupure : réglementation plus simple, déploiement immédiat possible. L'ÉREV ne dépend plus seulement d'un réseau — il peut en être temporairement indépendant. C'est une résilience énergétique de second niveau, cohérente avec le nom du programme.

Conclusion — L'ÉREV bio-GNV : le véhicule de la transition qui sécurise l'électrification

L'ÉREV bio-GNV n'est pas un compromis entre le thermique et l'électrique — c'est une architecture originale qui cumule les avantages des deux sans leurs inconvénients respectifs. 100–130 km de zéro émission pour les trajets quotidiens. Résilience totale et autonomie étendue pour les grands trajets. Mécanisme passif d'effacement de 40 GW de demande réseau aux pics critiques.

Sa valeur la plus importante n'est pas visible sur une fiche technique : c'est les 37,5 GW de bornes rapides 150 kW sur autoroute qu'il rend inutiles, les 30–50 Md€ de renforcement réseau TURPE qu'il évite, et les cinq situations critiques annuelles qu'il transforme de ruptures potentielles en incidents gérables.

> Message aux décideurs : Un BEV consomme de l'électricité au pire moment (retour de week-end, départ de vacances, grand froid). Un ÉREV bio-GNV cesse d'en consommer à ces moments. C'est la définition même d'une assurance réseau passive. Et elle s'autofinance : le propriétaire économise 30 000 € sur 15 ans par rapport à un PHEV équivalent.

Partie 8 — Deux plateformes, dimensionnement Rex et comparaison BEV marché réel

Cette partie complète les spécifications de la Partie 3 (SUV Résilience) en étendant l'analyse à la berline compacte, en ancrant le dimensionnement du groupe électrogène sur un calcul physique, et en comparant l'ÉREV aux BEV de même segment de prix effectivement vendus sur le marché français.

8.1 Deux plateformes distinctes

L'annexe V11 spécifie le SUV segment C/D comme véhicule de référence. L'architecture ÉREV est également applicable à la berline compacte (segment B/C), qui représente le cœur du marché de masse français. Les deux plateformes partagent la même chaîne de traction et le même Rex, mais diffèrent par la géométrie d'intégration des bouteilles.

Paramètre	Berline compacte	SUV segment C/D
Empattement de référence	~2 700 mm	~2 800 mm
Masse PTAC estimée	~1 600 kg	~1 900 kg
Batterie LFP	25 kWh / ~21 kWh utiles	25 kWh / ~21 kWh utiles

Paramètre	Berline compacte	SUV segment C/D
Moteur électrique	~100–120 kW	~120–150 kW (cf. Partie 3)
Bouteilles GNV (Ø int. 150 mm)	7 × 0,90 m — Type 4	7 × 1,00 m — Type 4
Diamètre hors tout bouteille	~178 mm	~178 mm
Volume GNV	~111 L	~124 L
Masse CH_4 à plein	~22,4 kg	~25,0 kg
Intégration sous caisse	Cage zone C arrière (+30 mm plancher)	Horizontal sous plancher ✓
Garde au sol structurelle	~150–170 mm → cage nécessaire	~220 mm → Ø 178 mm passe ✓

Note sur l'intégration berline : *les bouteilles Ø 178 mm hors tout ne passent pas à plat sous le plancher d'une berline compacte (garde au sol structurelle ~150–170 mm). Elles sont logées dans une cage dédiée entre longerons en zone C (arrière, avant zone de déformation), ce qui surélève légèrement le plancher arrière (~30–40 mm vs BEV pur). Ce compromis est analogue à celui des PHEV actuels avec leur réservoir de carburant. [ ]*

8.2 Dimensionnement du groupe électrogène — méthode physique

Le Rex ne propulse pas le véhicule directement. Il alimente la batterie qui alimente le moteur électrique. Sur autoroute, il tourne par cycles (enclenchement sous seuil de charge, arrêt au seuil haut) — pas en continu. La puissance nominale est calculée pour maintenir la batterie stable en usage autoroutier prolongé.

Calibrage de référence : un BEV de 100 kWh de batterie parcourt 350–380 km sur autoroute à 130 km/h, soit ~27 kWh/100 km. Ce chiffre marché valide le calcul de puissance aux roues.

Paramètre	Berline	SUV
Cx × S	~0,28 × 2,2 m² = 0,616 m²	~0,33 × 2,6 m² = 0,858 m²
Puissance aérodynamique à 130 km/h	~22 kW	~32 kW
Résistance au roulement (Cr 0,010)	~6 kW	~7 kW
Auxiliaires (clim, électronique)	~2–3 kW	~3 kW
Total aux roues à 130 km/h	~30–31 kW	~42 kW
Énergie électrique appelée (η chaîne 88 %)	~35 kW · 27 kWh/100 km	~48 kW · 37 kWh/100 km

Paramètre	Berline	SUV
Rex — puissance nominale (×1,4–1,5 marge)	★50–55 kWe	★65–70 kWe
Rex — consommation spécifique au point optimal	250–280 g CH_4/kWh	250–280 g CH_4/kWh
Rex — régime nominal	~2 500 tr/min (cycle Atkinson)	~2 500 tr/min (cycle Atkinson)

Convergence : les puissances Rex calculées (50–55 kWe berline, 65–70 kWe SUV) convergent avec les données de la Partie 3 (1,2L–1,5L Atkinson) et confirment le cadrage V11. [Cohérent avec littérature REX série — BMW i3 Rex 28 kWe, Sono Motors Sion 10 kWe à titre de référence architecturale]

8.3 Autonomie par scénario d'usage — calibrage marché réel

L'autonomie totale est la somme de l'autonomie électrique pure (batterie seule) et de l'autonomie Rex (énergie électrique produite par le Rex sur la totalité du réservoir GNV, au rendement global gaz→batterie de 37,5 %).

Scénario	Conso.	Auto. élec.	Auto. Rex berline	★Total berline	Auto. Rex SUV	★Total SUV
Autoroute 130 km/h	27 kWh/100 km	78 km	433 km	★~510 km	481 km	★~560 km
Route mixte	17 kWh/100 km	124 km	688 km	★~810 km	765 km	★~885 km
Usage quotidien ville	13 kWh/100 km	162 km	900 km	~1 060 km	1 000 km	~1 155 km

Hypothèses : batterie utile 21 kWh, CH_4 berline 22,4 kg / SUV 25,0 kg, PCI 13,9 kWh/kg, rendement Rex global 37,5 % (médiane 35–40 %, cf. Partie 2). La ligne autoroute est le scénario de dimensionnement critique — les lignes mixte et ville illustrent la polyvalence.

8.4 Comparaison avec les BEV du même segment de prix

Le concurrent direct de l'ÉREV berline compacte n'est pas le Tesla Model S à 100 kWh. C'est la berline compacte BEV à 54–60 kWh vendue 38 000–42 000 € — le segment de masse du marché français.

Modèle BEV	Batterie	Autonomie autoroute réelle	Segment prix
Citroën ë-C3	44 kWh	~170 km	~24 000 €
Renault Mégane E-Tech	60 kWh	~250 km	~38 000 €
Peugeot e-308	54 kWh	~210 km	~40 000 €
VW ID.3 standard	58 kWh	~230 km	~38 000 €
Tesla Model 3 SR	60 kWh	~270 km	~43 000 €
Tesla Model S (réf. 100 kWh)	100 kWh	~370 km	~95 000 €

Paramètre	BEV compact 60 kWh (~40 000 €)	ÉREV Résilience 25 kWh + GNV
Autonomie autoroute 130 km/h	~230–250 km	★**~510 km (+×2,1)**
Autonomie usage mixte	~350–380 km	★**~810 km (+×2,2)**
Énergie embarquée (batterie)	60 kWh	25 kWh (−58 %)
Métaux critiques (Li, Ni, Co)	Base 100	~42 (−58 %)
Recharge longue distance	Borne DC 150 kW — 30–45 min	Station GNV — 3 min
Dépendance réseau charge rapide	Totale	Partielle (usage quotidien)
Vecteur énergétique	Électricité réseau	Bio-CH_4 français renouvelable
Mécanisme V2H	Non	3–7 kW / 10–20 h via onduleur ✓
Effacement demande réseau	Nul	~1,2 kW évité/véhicule aux pics ✓

Synthèse : avec une batterie 2,4× plus petite, l'ÉREV double l'autonomie autoroutière du BEV de même segment de prix. Il supprime l'anxiété de la recharge longue distance, réduit de 58 % les métaux critiques embarqués, et fonctionne sur un vecteur énergétique produit en France à partir de biomasse résiduelle sans débouché alternatif. Le scénario BEV généralisé à 60 kWh ne résout pas le pic autoroutier — il le crée. [Ordres de grandeur — données BEV issues des tests WLTP et mesures réelles indépendantes]

8.5 Conséquences sur le dimensionnement système Résilience

Si le BEV compact standard devait passer de 60 kWh à 100 kWh pour atteindre une autonomie autoroutière comparable à l'ÉREV (~500 km), le coût systémique serait considérable :

Paramètre systémique	BEV 100 kWh généralisé	ÉREV 25 kWh + GNV
Métaux critiques par véhicule vs 60 kWh	×1,67 (Li, Ni, Mn)	Inchangé (−58 % vs 60 kWh)
Puissance charge rapide autoroute	150–350 kW/borne × millions bornes	Station GNV desservant des dizaines de véhicules
Puissance nucléaire requise	21 EPR2 (scénario BEV — PPE3)	14 EPR2 (scénario Résilience V11)
Écart EPR2	—	−7 EPR2 = −84 Md€ CAPEX [ ]
Infrastructure charge rapide (TURPE)	30–50 Md€ pour 5 % du temps annuel	Évitée — recharge lente nocturne

Références Partie 8 : *Tests ADAC/Recurrent/Spritmonitor (autonomie BEV autoroute) · R110 UNECE (bouteilles Type 4) · ISO 11439 (essais bouteilles) · Programme Résilience V11 (figures EPR2, CAPEX) · GPT/Claude cross-validation (dimensionnement Rex, août 2026).*

Références

Programme Résilience V11 (mai 2026) · Annexe Goudrons V11 · Annexe Juridique EU V11 · Toyota Dynamic Force Engine 2.0L (rendement 41 %) · Mazda Skyactiv-X (rendement 43 %) · UNECE R110 (homologation réservoirs GNV) · Règlement EU 2019/631 Art. 10a (exemption e-fuels 2023) · BYD Blade Battery LFP (3 000 cycles) · ADEME (données mobilité et emplois EnR) · CERTU (trajectoires mobilité France 2023)