

PANORAMA 2025 DES MOTEURS ÉLECTRIQUES — VE

Auteur : Léon Chelli – Rapport technique structuré

Partie I : Technologies actuelles	3
<i>A. Types de moteurs principaux</i>	3
1. Moteur synchrone à aimants permanents (PMSM – Permanent Magnet Synchronous Motor)	3
2. Moteur synchrone à rotor bobiné (WRSM– Wound Rotor Synchronous Motor)	4
3. Moteur asynchrone (IM – Induction Motor)	5
4. Moteur à commutation électronique (BLDC – Brushless DC Motor)	6
<i>B. Architecture et intégration dans le véhicule</i>	7
1. Localisation	7
2. Transmission et réduction	7
3. Refroidissement	8
<i>C. Avantages et inconvénients techniques et économiques</i>	9
II. Avancées récentes et nouvelles générations	11
<i>A. Intégration moteur-boîte : l'ère de l'e-axe</i>	11
<i>B. Moteurs à flux axial : nouvelle densité, nouvelles promesses</i>	11
Avantages clés :	11
Limites et défis actuels :	12
Acteurs et applications	12
Potentiel stratégique	12
exemples emblématiques de flux axial	12
<i>C. Moteurs à rotor bobiné nouvelle génération : WRSM optimisés</i>	13
Principe : une excitation contrôlée, sans aimants	13
Avancées récentes	13
Acteurs industriels & cas d'usage	14
Pourquoi ce retour en grâce ?	14
Le retour stratégique du rotor bobiné	14

<i>D. Technologies sans terres rares : entre souveraineté et stratégie technique</i>	15
Enjeu central : s’affranchir de la dépendance aux aimants	15
Approches technologiques principales	15
Acteurs industriels engagés	16
Dimensions stratégiques	16
<i>E. Innovations constructeurs : innovations, brevets et logiques industrielles</i>	16
Hyundai / Kia :	16
BMW – Maîtrise interne et rupture assumée	17
Renault–Valeo – L’option souveraine à grande échelle	17
Stellantis – Emotors et production de masse	17
Nidec – Modularité et production mondiale	17
BYD – Maîtrise complète de la chaîne de traction	17
XPeng – Expérimentation rapide, innovation software	18
Partie III – Technologies futures et ruptures possibles	19
<i>A – Supra-conductivité et moteurs cryogéniques</i>	19
<i>B – Moteurs à commutation par reluctance améliorée</i>	19
<i>C – Flux transversal / moteurs hybrides axial-radial</i>	19
<i>D – Nouveaux matériaux : nanocomposites, superalliages et allègement</i>	20
<i>E – Motorisation par roue (in-wheel motors)</i>	20
<i>Conclusion</i>	20
Partie V – Approche stratégique & industrielle	21
<i>A – Cartographie des acteurs majeurs</i>	21
Constructeurs automobiles	21
Équipementiers / Motoristes	21
<i>B – Filières d’approvisionnement critiques</i>	22
<i>C – Réindustrialisation & souveraineté</i>	22
<i>D - Scénarios d’évolution à 5–10 ans</i>	22
Conclusion générale – Le moteur électrique : enjeu stratégique de la mobilité décarbonée	24
Bibliographie	25
<i>Documents et publications techniques</i>	25
<i>Sources scientifiques et académiques</i>	25
<i>Sources web et portails spécialisés</i>	25
<i>Autres ressources citées ou illustratives</i>	25

A. TYPES DE MOTEURS PRINCIPAUX

La motorisation électrique pour véhicules s'est progressivement stabilisée autour de trois grandes familles technologiques, chacune ayant ses spécificités de conception, de performance et de coût.

1. MOTEUR SYNCHRONE À AIMANTS PERMANENTS (PMSM – PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR)

- ◇ Principe : rotor équipé d'aimants permanents (souvent en terres rares), tournant en synchronisme avec le champ magnétique du stator.
- ◇ Avantages :
 - ◇ Excellent rendement énergétique (jusqu'à 96 %)
 - ◇ Très bonne densité de puissance (compacité)
 - ◇ Fonctionnement silencieux et fluide
- ◇ Inconvénients :
 - ◇ Forte dépendance aux terres rares (néodyme, dysprosium)
 - ◇ Coût élevé en raison des aimants
 - ◇ Risque d'échauffement du rotor mal maîtrisé

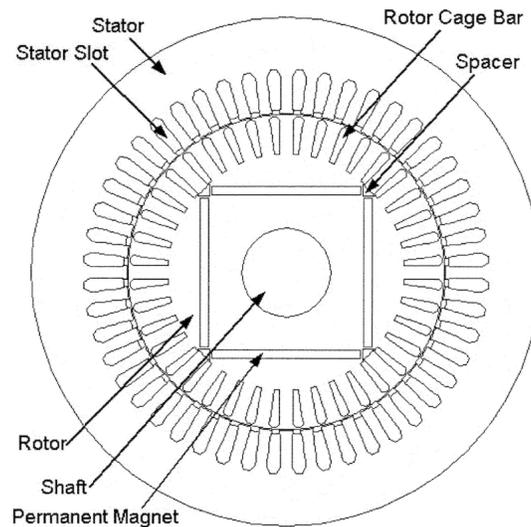
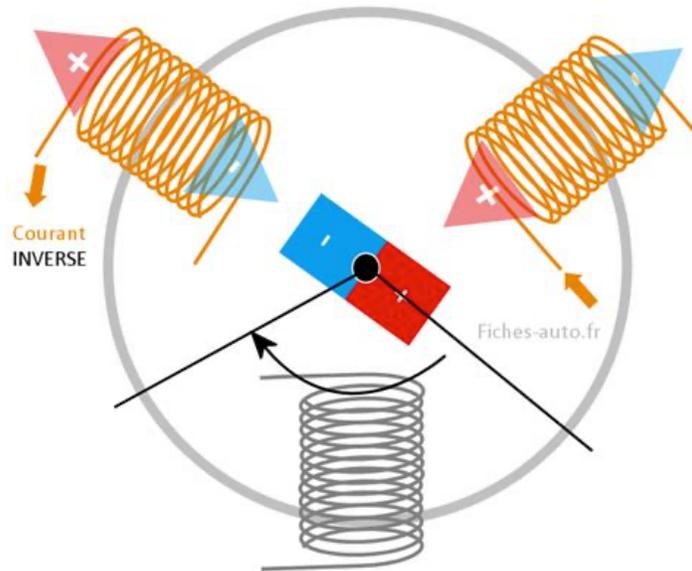


Illustration : Vue en coupe d'un moteur synchrone à aimants permanents, montrant la disposition des aimants sur le rotor et les enroulements du stator. Source :

([Source](#))



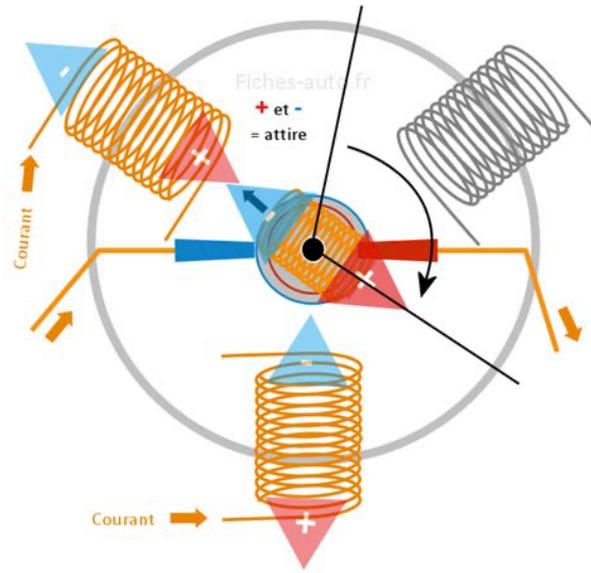
Description : Ce schéma illustre le principe de fonctionnement d'un moteur PMSM, mettant en évidence :

- ◇ Le rotor équipé d'aimants permanents.
- ◇ Les enroulements du stator alimentés en courant alternatif triphasé.
- ◇ La création d'un champ magnétique tournant dans le stator qui entraîne le rotor en synchronisme.

(Source)

2. MOTEUR SYNCHROME À ROTOR BOBINÉ (WRSM- WOUND ROTOR SYNCHRONOUS MOTOR)

- ◇ Principe : le rotor est alimenté par des bobines via des bagues collectrices ; champ magnétique contrôlable.
- ◇ Avantages :
 - ◇ Aucune terre rare
 - ◇ Contrôle fin du couple moteur
 - ◇ Rendement correct, même à charge partielle
- ◇ Inconvénients :
 - ◇ Architecture plus complexe (alimentation du rotor)
 - ◇ Moins répandu et plus lourd
 - ◇ Maintenance potentiellement plus exigeante



Description : Ce schéma illustre le principe de fonctionnement d'un moteur synchrone à rotor bobiné, mettant en évidence :

- ◇ Le rotor équipé d'enroulements alimentés en courant continu via des bagues collectrices.
- ◇ Les enroulements du stator alimentés en courant alternatif triphasé.
- ◇ La création d'un champ magnétique tournant dans le stator qui entraîne le rotor en synchronisme.

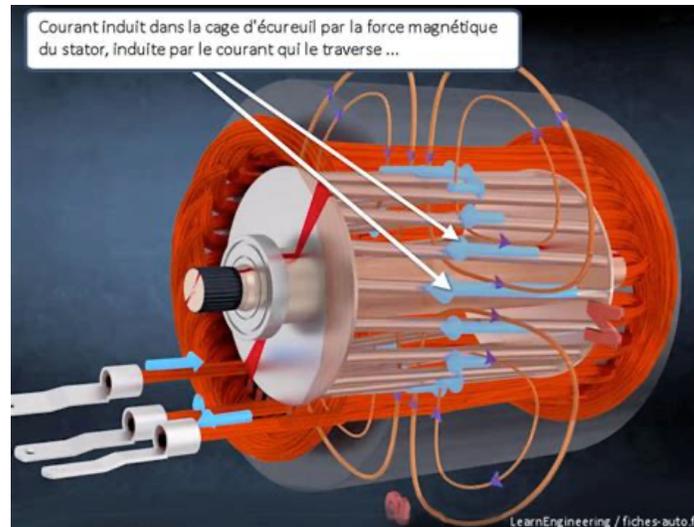
(Source)

3. MOTEUR ASYNCHRONE (IM – INDUCTION MOTOR)

- ◇ Principe : le champ magnétique du stator induit un courant dans le rotor, générant une force de rotation.
- ◇ Avantages :
 - ◇ Robuste et éprouvé
 - ◇ Moins cher à produire (pas d'aimants)
 - ◇ Très bonne tenue à la température
- ◇ Inconvénients :
 - ◇ Rendement inférieur (92 à 94 %)
 - ◇ Couple initial plus faible
 - ◇ Moins compact que les moteurs synchrones

Ce schéma (ci-après) illustre le principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone, mettant en évidence :

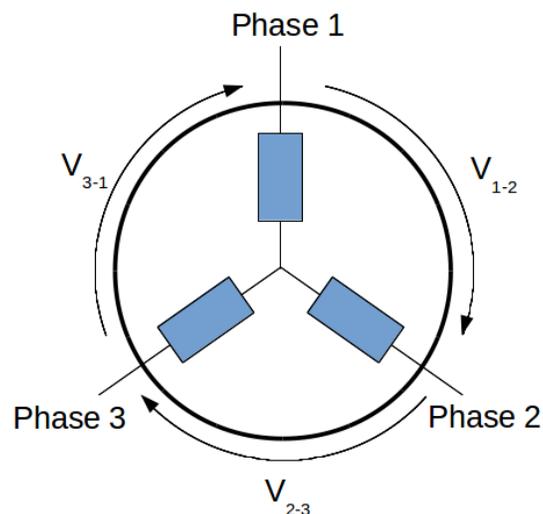
- ◇ Le stator alimenté en courant alternatif triphasé, générant un champ magnétique tournant.
- ◇ Le rotor en forme de cage d'écureuil, dans lequel des courants sont induits par le champ magnétique du stator.
- ◇ La rotation du rotor résultant de l'interaction entre le champ magnétique induit et le champ du stator.



(Source)

4. MOTEUR À COMMUTATION ÉLECTRONIQUE (BLDC – BRUSHLESS DC MOTOR)

- Principe : moteur à aimants permanents, contrôlé par onduleur (commande numérique du champ tournant).
- Avantages :
 - Compact, efficace pour les petites puissances
 - Faible entretien (absence de balais)
- Inconvénients :
 - Moins efficace à grande puissance
 - Bruits de commutation selon architecture
 - Utilisation marginale pour les VE routiers



Description : Ce schéma illustre le principe de commutation d'un moteur BLDC triphasé, mettant en évidence :

- ◇ Les trois phases du moteur (A, B, C).
- ◇ Les capteurs à effet Hall utilisés pour détecter la position du rotor.
- ◇ La séquence de commutation des transistors pour assurer la rotation du rotor.

(Source)

B. ARCHITECTURE ET INTÉGRATION DANS LE VÉHICULE

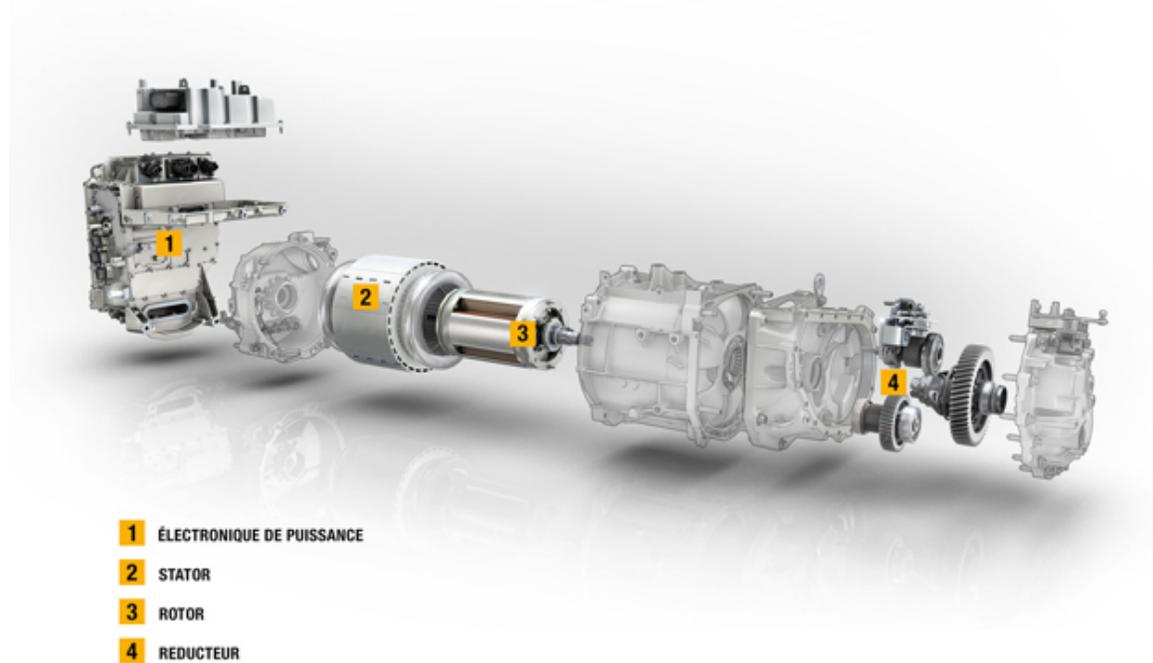
Le moteur n'est pas un élément isolé : il est intégré dans une chaîne cinématique complexe, dont la configuration influence directement les performances globales.

1. LOCALISATION

- ◇ Moteur central (souvent couplé à une boîte à réduction) : solution traditionnelle, bonne répartition des masses.
- ◇ Essieu moteur (e-axe) : intégration du moteur, de la boîte et de l'onduleur dans un seul module compact.
- ◇ Moteur-roue (in-wheel) : encore marginal, mais prometteur (ex : Protean Electric).

2. TRANSMISSION ET RÉDUCTION

- ◇ La boîte de réduction est souvent mono-vitesse, avec un ratio optimisé pour le couple initial.
- ◇ Les architectures bi-vitesse (ex : Porsche Taycan) améliorent l'efficacité à haute vitesse mais complexifient l'ensemble.



Ce schéma présente la conception intégrée du moteur électrique développé par Renault pour la Zoé R240. Il s'agit d'un moteur synchrone à rotor bobiné (WRSM), sans aimants permanents, couplé à :

- ◇ un réducteur mono-vitesse (single-speed gear reducer),
- ◇ un convertisseur de puissance intégré (onduleur),
- ◇ un système de refroidissement liquide,
- ◇ et un contrôleur de moteur positionné au-dessus.

L'ensemble est conçu pour maximiser la compacité et l'efficacité thermique, facilitant l'intégration dans le compartiment moteur avant du véhicule, tout en optimisant le rendement global.

Ce type d'architecture illustre la volonté de Renault de :

- ◇ minimiser les dépendances aux terres rares,
- ◇ réduire les coûts industriels,
- ◇ et simplifier la maintenance (moins d'éléments séparés à interfacer).

Il constitue un exemple concret de maîtrise verticale d'un groupe motopropulseur électrique, avec un excellent compromis encombrement/performance.

(Source)

3. REFROIDISSEMENT

- ◇ Les moteurs sont refroidis par air, huile ou liquide selon leur puissance et leur compacité.
- ◇ Le refroidissement du stator est prioritaire, mais celui du rotor devient critique à haute puissance.

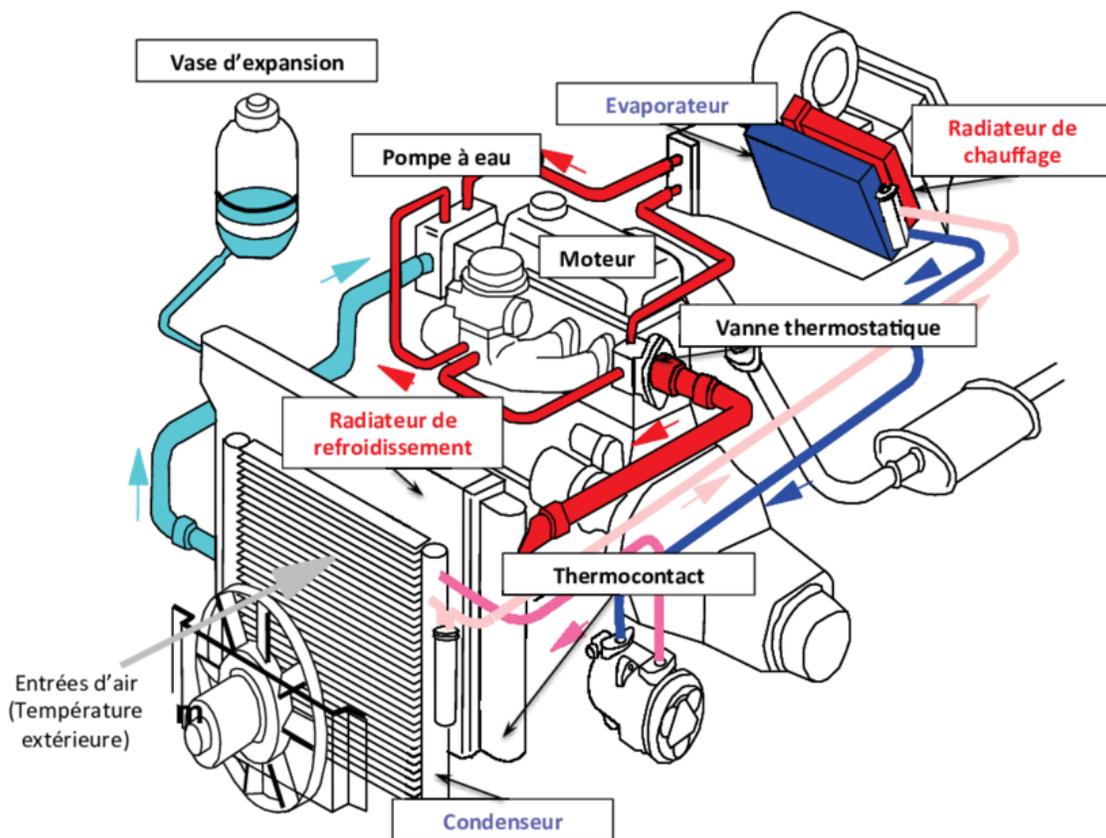


Illustration : Vue schématique d'un circuit de refroidissement moteur

Ce schéma présente une architecture typique de refroidissement liquide, appliquée à un moteur thermique ou électrique, en particulier dans les véhicules où la gestion thermique est critique (cas des moteurs à haute densité de puissance ou des systèmes électroniques embarqués).

On y distingue les éléments fondamentaux d'un circuit de refroidissement fermé, avec circulation forcée :

- ◇ Radiateur de refroidissement (échangeur principal) : dissipe la chaleur absorbée par le liquide de refroidissement.

- ◇ Pompe à eau : assure la circulation du fluide dans le circuit.
- ◇ Vanne thermostatique : régule la température de fonctionnement du moteur en dirigeant ou non le flux vers le radiateur.
- ◇ Thermocontact : déclenche le ventilateur lorsque la température dépasse un seuil défini.
- ◇ Condenseur, évaporateur et radiateur de chauffage : gèrent la récupération de chaleur pour le confort thermique de l'habitacle ou l'optimisation globale du système.
- ◇ Vase d'expansion : compense la dilatation du fluide liée à la température.

Bien que ce schéma ne soit pas spécifique aux moteurs électriques, il est parfaitement transposable aux groupes motopropulseurs VE utilisant le refroidissement liquide pour :

- ◇ le stator,
- ◇ le convertisseur (onduleur),
- ◇ ou même les batteries selon les configurations.

Il illustre avec clarté les principes universels de transfert thermique par liquide caloporteur dans l'automobile, dans une logique de robustesse, rendement et longévité.

(Source)

C. AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS TECHNIQUES ET ÉCONOMIQUES

Critère	PMSM	WRSM	IM	BLDC
Rendement	★★★★☆	★★★★☆	★★★☆☆	★★★★☆
Couple instantané	★★★★☆	★★★★☆	★★★☆☆	★★★★☆
Compacité	★★★★☆	★★★☆☆	★★★☆☆	★★★★☆
Coût	XX	X	✓	✓
Terres rares	XX	✓	✓	XX
Robustesse thermique	★★★☆☆	★★★☆☆	★★★★★	★★★★☆

Remarques :

Ce tableau met en évidence les compromis techniques et industriels propres à chaque grande famille de moteurs utilisés dans les véhicules électriques.

Il permet de comprendre les logiques de choix des constructeurs en fonction de leur stratégie produit, de leurs priorités industrielles ou de leur positionnement marché.

Le PMSM (moteur synchrone à aimants permanents) reste la technologie de référence en matière de rendement énergétique, de couple à bas régime et de compacité. Ces qualités en font le choix privilégié des marques premium ou à forte exigence d'autonomie.

Toutefois, sa forte dépendance aux terres rares et son coût élevé en limitent l'usage dans des gammes plus économiques.

Dans cette catégorie, certains constructeurs comme Hyundai optimisent leurs moteurs via des enroulements « hairpin » et un contrôle vectoriel fin.

D'autres, comme BMW, ont pris une voie originale : leur moteur de 5e génération (eDrive) est un moteur synchrone à rotor bobiné, sans terres rares, mais à haut rendement — une architecture proche du WRSM, combinant frugalité énergétique, pilotage précis et robustesse. Ce choix marque une rupture stratégique assumée, avec déjà des centaines de milliers d'unités produites sur les gammes i4, iX1, iX3, i7 ou encore la nouvelle Série 5.

Le WRSM (rotor bobiné), à la croisée des mondes, offre une alternative crédible sans aimants, avec une souplesse de pilotage du flux magnétique intéressante pour optimiser le rendement selon les plages

d'utilisation. Il constitue un bon compromis technico-industriel, mais reste plus complexe à refroidir et demande une gestion des collecteurs (ou bagues) plus contraignante en long terme. Outre BMW, Renault fait partie des pionniers de cette solution depuis la première Zoé.

Le moteur asynchrone, enfin, séduit par sa robustesse, son coût réduit et l'absence totale de dépendance aux matériaux critiques. Mais il souffre d'un rendement plus faible, en particulier à bas régime, ce qui le réserve aux architectures hybrides, aux essieux secondaires, ou aux constructeurs visant la durabilité à faible coût avant l'efficacité maximale.

Aucun moteur n'est idéal en soi : c'est l'arbitrage global entre rendement, coût, compacité, refroidissement, pilotage, souveraineté industrielle et stratégie d'usage qui dicte les choix d'architecture.

Mais au-delà de ces trois familles historiques, de nouvelles pistes émergent : moteurs à flux axial, architectures intégrées (e-axes), concepts hybrides axial-radial, ou encore moteurs à commutation de reluctance sans aimants ni balais.

Des acteurs comme YASA (racheté par Mercedes-AMG), Koenigsegg (Quark) ou Lucchi-Motor expérimentent déjà ces ruptures.

D'autres constructeurs, comme BYD (avec ses moteurs à aimants intérieurs) ou XPeng (qui expérimente des architectures à double rotor ou à commutation électronique), poursuivent une logique similaire : viser un rendement élevé sans sacrifier la robustesse ni multiplier les dépendances.

➡ C'est ce que nous explorerons dans la Partie II, dédiée aux avancées récentes et aux technologies de nouvelle génération.

II. AVANCÉES RÉCENTES ET NOUVELLES GÉNÉRATIONS

Loin de se stabiliser, le paysage technologique des moteurs pour véhicules électriques continue d'évoluer rapidement. Les grands constructeurs, soucieux d'efficacité énergétique, de compacité, de souveraineté industrielle ou de coûts, développent des architectures de plus en plus optimisées, souvent intégrées à d'autres éléments mécatroniques. Plusieurs tendances majeures émergent depuis 5 à 10 ans.

A. INTÉGRATION MOTEUR-BOÎTE : L'ÈRE DE L'E-AXLE

L'une des évolutions majeures dans la conception des groupes motopropulseurs pour véhicules électriques est la tendance à l'intégration fonctionnelle. Le concept de e-axle (ou "essieu électrique") désigne l'ensemble compact regroupant :

- ◇ le moteur électrique,
- ◇ la boîte de réduction (mono-vitesse dans la quasi-totalité des cas),
- ◇ l'onduleur (convertisseur AC/DC),
- ◇ parfois même le boîtier de commande (ECU),
- ◇ et dans certains cas, le différentiel.

L'objectif est double :

1. Réduire l'encombrement et le poids de la chaîne de traction.
2. Optimiser l'efficacité globale du système, en limitant les pertes mécaniques et électroniques.

Cette intégration permet aussi :

- ◇ une meilleure gestion thermique (refroidissement centralisé),
- ◇ une modularité industrielle accrue (produit préassemblé, plug & play),
- ◇ et une réduction des coûts de production, notamment en plateformes partagées.

Exemples concrets :

- ◇ BorgWarner, Valeo-Siemens eAutomotive ou GKN proposent déjà des e-axes à destination des constructeurs généralistes.
- ◇ Hyundai-Kia (E-GMP) a conçu son propre système intégré, permettant une compacité exceptionnelle (ex : moteur, réducteur et onduleur dans un seul bloc).
- ◇ ZF a récemment présenté un e-axe modulaire pour plateforme 800V, adapté aux véhicules lourds comme aux sportives compactes.

B. MOTEURS À FLUX AXIAL : NOUVELLE DENSITÉ, NOUVELLES PROMESSES

Les moteurs à flux axial (AFM, axial flux motors) représentent une rupture dans la conception des machines électriques. Contrairement aux moteurs à flux radial traditionnels (où le champ magnétique se propage perpendiculairement à l'axe de rotation), ici le flux magnétique circule parallèlement à l'axe, d'un disque à l'autre.

Cette architecture engendre plusieurs avantages mécaniques et thermiques majeurs :

AVANTAGES CLÉS :

- ◇ Couple très élevé à taille équivalente : le rayon du disque agit comme un bras de levier naturel ($T = F \times r$).
- ◇ Compacité latérale : moteur en forme de disque mince, facile à intégrer sur essieu, moyeu ou arrière de bloc propulseur.
- ◇ Refroidissement facilité : les faces externes étant planes, le flux d'air ou liquide est plus accessible.

- ◇ Réduction de masse : le moteur peut être plus léger pour une puissance équivalente.

LIMITES ET DÉFIS ACTUELS :

- ◇ Fabrication plus complexe : tolérances d'usinage serrées, alignement précis des disques magnétiques.
- ◇ Difficulté d'échelle : bien adaptés à des puissances moyennes, plus compliqués à étendre à haute puissance continue.
- ◇ Coût actuel plus élevé que les moteurs radiaux traditionnels (hors applications haut de gamme).

ACTEURS ET APPLICATIONS

- ◇ YASA (UK) – Racheté par Mercedes-AMG : équipe les hypercars AMG One, avec intégration prévue sur certaines futures plateformes du groupe Mercedes. Leur architecture "axial flux dual rotor" est très compacte.
- ◇ Koenigsegg – Le moteur Quark combine flux axial et radial : architecture hybride unique, pour maximiser densité de puissance et compacité.
- ◇ Lucchi-Motor (Italie) – Développe des machines ultra-fines à flux axial pour applications embarquées sur véhicules spéciaux ou urbains.
- ◇ Mahle – Travaille sur des moteurs à flux axial refroidis par huile, conçus pour la grande série.
- ◇ ZF et BorgWarner – Étudient leur intégration sur essieux arrière compacts pour SUV électriques ou plateformes sportives.
- ◇ Gogoro / Segway / moto urbaine chinoise – Premiers à avoir industrialisé le flux axial à petite échelle, côté deux-roues.

POTENTIEL STRATÉGIQUE

Les moteurs à flux axial pourraient devenir un standard pour les architectures e-axle, en particulier :

- ◇ pour les véhicules urbains, sportifs ou haut de gamme,
- ◇ ou comme moteurs secondaires (essieu arrière, booster EV, extension modulaire).

Mais leur adoption de masse reste freinée par la maturité industrielle, le coût, et l'équilibre puissance/refroidissement au-delà de certains seuils.

EXEMPLES EMBLÉMATIQUES DE FLUX AXIAL

YASA – LA VOIE MERCEDES-AMG

Le britannique YASA (acronyme de "Yokeless And Segmented Armature") a été racheté en 2021 par Mercedes-Benz, avec pour objectif de doter les futures AMG électriques d'une motorisation ultra-performante et compacte.

Leur moteur axial offre :

- ◇ un couple très élevé (jusqu'à 370 Nm pour 20 kg),
- ◇ une épaisseur de seulement 50 mm dans certaines configurations,
- ◇ une efficacité supérieure à 96 % dans une large plage de régime.

YASA développe désormais ses machines pour une industrialisation interne à Mercedes, notamment sur les plateformes MMA et AMG.EA.

KOENIGSEGG QUARK – LE MARIAGE AXIAL/RADIAL

Le constructeur suédois Koenigsegg a conçu un moteur unique baptisé Quark, combinant flux axial et radial dans une structure hybride innovante.

Objectif :

- ◇ Maximiser le couple tout en gardant une empreinte compacte,
- ◇ Réduire le poids au minimum pour intégrer le système dans leur véhicule hyper-léger Gemera.

Le Quark développe environ 250 kW et 600 Nm pour moins de 30 kg, un rapport puissance/poids exceptionnel, mais pour l'instant réservé à des véhicules d'exception.

MAHLE – VERS LA SÉRIE

L'équipementier allemand Mahle développe un moteur à flux axial refroidi par huile, destiné à une production de masse.

Leur solution vise à offrir une alternative au PMSM, avec une structure plus simple à refroidir et potentiellement moins dépendante aux terres rares. Mahle cible les flottes, SUV compacts et VE du segment B à D pour une intégration en e-axe.

LUCCHI-MOTOR – ULTRA-PLAT ET SPÉCIALISÉ

La PME italienne Lucchi-Motor conçoit des moteurs à flux axial extrêmement plats, destinés à des applications spécifiques : véhicules urbains, engins agricoles, robots autonomes.

Leur savoir-faire réside dans l'adaptation sur-mesure, souvent en basse tension, avec des performances notables sur de petits formats.

C. MOTEURS À ROTOR BOBINÉ NOUVELLE GÉNÉRATION : WRSM OPTIMISÉS

Longtemps considérés comme complexes, les moteurs synchrones à rotor bobiné (WRSM – Wound Rotor Synchronous Motor) connaissent un regain d'intérêt dans l'industrie automobile. Cette famille, déjà évoquée dans la Partie I, bénéficie désormais d'évolutions techniques majeures qui la rendent de plus en plus compétitive face aux PMSM et IM.

PRINCIPE : UNE EXCITATION CONTRÔLÉE, SANS AIMANTS

Contrairement aux PMSM, dont le champ magnétique est généré par des aimants permanents, le WRSM produit son champ rotorique via une excitation électrique, transmise généralement par balais ou bagues collectrices. Cette architecture permet :

- ◇ de moduler dynamiquement le champ (flux) selon les besoins,
- ◇ de s'affranchir totalement des terres rares.

AVANCÉES RÉCENTES

- ◇ Refroidissement du rotor : nouveaux circuits internes, gestion thermique optimisée pour soutenir des puissances continues élevées.
- ◇ Balais à faible usure / bagues sans entretien : innovations sur les matériaux de contact et les lubrifiants solides (graphite modifié, composites).
- ◇ Pilotage vectoriel fin : les dernières générations d'ECU permettent un contrôle actif du flux rotorique en temps réel, améliorant rendement et couple.
- ◇ Meilleure intégration avec les onduleurs modulaires (notamment dans les architectures 800V).

- ◇ Compacité améliorée grâce à des enroulements optimisés (ex. bobinage en vagues, slots transversaux).

ACTEURS INDUSTRIELS & CAS D'USAGE

BMW (EDRIVE 5E GÉNÉRATION)

Moteur synchrone à rotor bobiné, sans aimants.
Haut rendement, très faible dépendance aux matériaux critiques.
Production à grande échelle sur i4, i7, iX1...

RENAULT (2027)

Développement avec Valeo d'un moteur WRSM nouvelle génération, sans terres rares, avec refroidissement avancé et réducteur intégré.
Objectif : production de masse sur plateforme AmpR Medium.

HITACHI / NISSAN

Expérimentations WRSM pour véhicules utilitaires électriques, avec refroidissement par bain d'huile et gestion multi-modes (eco/sport/charge).

POURQUOI CE RETOUR EN GRÂCE ?

- ◇ Réduction des dépendances stratégiques (économie circulaire, souveraineté industrielle),
- ◇ Rendement désormais proche voire supérieur au PMSM sur certains cycles,
- ◇ Meilleure adaptation au pilotage logiciel avancé,
- ◇ Intégration facilitée dans des e-axes modulaires.

LE RETOUR STRATÉGIQUE DU ROTOR BOBINÉ

BMW – LE CHOIX DE L'INDÉPENDANCE

Avec sa 5e génération de groupe motopropulseur eDrive, BMW a abandonné les aimants permanents au profit d'un moteur synchrone à rotor bobiné, produit en série.
Ce moteur, intégré sur les iX1, i4, i5, i7, permet d'atteindre une très bonne efficacité, tout en supprimant la dépendance aux terres rares.
Il est reconnu pour sa fiabilité thermique et son pilotage très fluide.
Un pari réussi pour une solution premium mais souveraine.

RENAULT-VALEO (2027) – OBJECTIF GRANDE SÉRIE

Renault et Valeo développent un nouveau moteur synchrone excité, qui sera produit dès 2027 sur la plateforme AmpR Medium (ex-CMF-EV).
Refroidi à l'intérieur du rotor, il associe un stator compact, un rotor bobiné sans aimants et une transmission réduite intégrée.
Ce moteur, 100 % sans terres rares, vise un coût de revient compétitif pour les modèles du segment C, avec un rendement supérieur à 90 % dans les usages mixtes.

HITACHI / NISSAN – EN QUÊTE DE ROBUSTESSE

Moins médiatisés, les travaux d'Hitachi et Nissan sur le WRSM portent sur des applications utilitaires, avec des moteurs refroidis par bain d'huile, destinés à supporter des conditions de roulage sévères. Ces prototypes misent sur la durabilité plus que sur l'ultra-compacité, avec un fort couple disponible et une capacité d'adaptation logicielle aux usages commerciaux (éco, sport, charge, etc.).

STELLANTIS (VIA EMOTORS)

Le groupe Stellantis, via sa co-entreprise Emotors (Stellantis + Nidec), produit un moteur synchrone à excitation séparée sans aimants permanents pour ses véhicules électriques compacts et compacts premium (e-208, DS3, Jeep Avenger, etc.).

Ce moteur, baptisé M3, est fabriqué à Trémery (France), avec un objectif de 200 000 unités/an. Il combine rendement élevé, coût contenu et souveraineté technologique, s'inscrivant dans une stratégie européenne de réduction des dépendances.

D. TECHNOLOGIES SANS TERRES RARES : ENTRE SOUVERAINETÉ ET STRATÉGIE TECHNIQUE

ENJEU CENTRAL : S'AFFRANCHIR DE LA DÉPENDANCE AUX AIMANTS

Les terres rares (principalement le néodyme, le dysprosium et le terbium) sont essentielles à la fabrication des aimants permanents utilisés dans les moteurs PMSM. Or, leur extraction et leur raffinage sont largement dominés par la Chine, à plus de 85 %, ce qui pose :

- ◇ un risque géopolitique majeur,
- ◇ des problèmes environnementaux lourds (boue rouge, pollution des eaux),
- ◇ et un coût en hausse constante.

Dès lors, plusieurs constructeurs ont lancé des programmes moteurs alternatifs sans aimants permanents, reposant principalement sur des architectures à rotor bobiné ou asynchrones.

APPROCHES TECHNOLOGIQUES PRINCIPALES

ROTOR BOBINÉ (WRSM)

Comme vu précédemment, les moteurs WRSM (excitation séparée) permettent de supprimer totalement les aimants. C'est aujourd'hui la solution la plus mature pour allier :

- ◇ bon rendement,
- ◇ pilotage vectoriel évolué,
- ◇ et absence totale de terres rares.

Utilisé par : Renault (Valeo 2027), BMW (eDrive), Stellantis (Emotors), Nissan (expérimental).

MOTEUR ASYNCHRONE (À INDUCTION)

Autre solution éprouvée, l'IM ne nécessite aucun aimant. Son couple est induit par glissement, ce qui implique :

- ◇ une simplicité industrielle,
- ◇ une robustesse thermique,
- ◇ mais un rendement un peu inférieur aux WRSM ou PMSM.

Utilisé par : anciens modèles Tesla, certains véhicules commerciaux, et parfois en essieu secondaire dans des architectures bimoteurs.

MOTEURS À COMMUTATION ÉLECTRONIQUE OU À RELUCTANCE

Plus récemment, des moteurs à commutation électronique synchronisée (SRM) ou à reluctance améliorée sont testés.

Ces technologies ont l'avantage d'être sans aimants, très robustes, mais leur bruit électromagnétique et leur pilotage complexe freinent leur adoption.

En développement chez : Nidec, Lucchi-Motor, Mahle, certains laboratoires chinois.

ACTEURS INDUSTRIELS ENGAGÉS

- ◇ BMW a choisi le rotor bobiné pour toute sa gamme électrique, avec production maison.
- ◇ Renault développe un nouveau moteur WRSM avec Valeo, entièrement sans aimants.
- ◇ Stellantis, via Emotors, produit un moteur à excitation bobinée en France.
- ◇ BYD combine des moteurs à aimants internes optimisés avec une politique de recyclage actif des terres rares.
- ◇ XPeng explore les moteurs sans aimants pour ses plateformes urbaines.

DIMENSIONS STRATÉGIQUES

- ◇ Souveraineté industrielle : relocalisation de la production moteur (ex : Trémery chez Stellantis, Cléon chez Renault).
- ◇ Éco-conception : recyclabilité, limitation des matériaux critiques.
- ◇ Indépendance d'approvisionnement : réduction du levier géopolitique chinois.
- ◇ Équilibre rendement/coût : arbitrage entre performances dynamiques et robustesse technico-économique.

E. INNOVATIONS CONSTRUCTEURS : INNOVATIONS, BREVETS ET LOGIQUES INDUSTRIELLES

Pour comprendre la diversité des approches industrielles, cette section présente une sélection d'acteurs majeurs, chacun illustrant un choix technologique cohérent avec sa stratégie. Il ne s'agit pas d'une revue exhaustive, mais d'un panorama des technologies les plus représentatives ou singulières.

HYUNDAI / KIA :

Le groupe coréen a choisi une stratégie de moteur PMSM à haut rendement, basé sur :

- ◇ des aimants internes (IPMSM),
- ◇ un bobinage hairpin (en épingle), permettant :
- ◇ une densité de courant supérieure,
- ◇ un refroidissement plus efficace,
- ◇ et une réduction des pertes ohmiques¹.

Ces moteurs équipent les véhicules construits sur la plateforme E-GMP (Hyundai Ioniq 5/6, Kia EV6, Genesis GV60), qui fonctionne en 800V natif.

Les moteurs sont :

- ◇ intégrés dans un e-axe compact avec boîte mono-vitesse et onduleur intégré,
- ◇ refroidis par un circuit liquide unifié,

¹ Échauffement dû à la résistance électrique des enroulements

- ◇ et gérés par un logiciel propriétaire pour l'optimisation dynamique du rendement.

 Hyundai mise sur l'efficacité de masse, avec une verticalisation complète de la chaîne traction : moteur, convertisseur, batterie, plateforme.

BMW – MAÎTRISE INTERNE ET RUPTURE ASSUMÉE

BMW a adopté une stratégie claire : tous ses moteurs électriques de 5e génération (eDrive) sont des synchrones à rotor bobiné, donc sans terres rares.

Fabriqués en interne, ils équipent déjà les i4, iX1, i5, i7, avec :

- ◇ une grande compacité,
- ◇ un haut rendement sur cycle mixte,
- ◇ un pilotage vectoriel intégré,
- ◇ et une fiabilité thermique reconnue.

 BMW capitalise sur sa capacité à intégrer la chaîne complète, du moteur au logiciel.

RENAULT-VALEO – L'OPTION SOUVERAINE À GRANDE ÉCHELLE

Annoncé pour 2027, le moteur co-développé par Renault et Valeo sera un WRSM compact, à refroidissement rotorique actif, sans aimants.

Il équipera les véhicules sur la plateforme AmpR Medium. Renault vise un rendement supérieur à 90 %, avec :

- une architecture optimisée,
- un onduleur haute fréquence maison (Valeo E-Mobility),
- une intégration serrée avec l'e-axe.

 C'est une réponse française au défi de l'électrification souveraine.

STELLANTIS – EMOTORS ET PRODUCTION DE MASSE

Via sa coentreprise Emotors (avec Nidec), Stellantis produit déjà un moteur à excitation séparée (type WRSM), baptisé M3, à Trémery (France).

Il équipe les Peugeot e-208, DS3 E-Tense, Jeep Avenger, etc. Ce moteur sans terres rares atteint :

- ◇ 115 kW de puissance,
- ◇ Un excellent compromis rendement/coût,
- ◇ Une compatibilité native avec l'architecture 400V actuelle du groupe.

NIDEC – MODULARITÉ ET PRODUCTION MONDIALE

Nidec, équipementier japonais, propose une gamme complète de moteurs synchrones et asynchrones pour VE, avec :

- ◇ un fort accent sur la standardisation modulaire,
- ◇ des e-axes intégrés,
- ◇ et des technologies sans aimants en cours de pré-industrialisation.

Nidec fournit déjà PSA, Kia, Hyundai, et vise aussi les constructeurs chinois avec des plateformes légères adaptables.

BYD – MAÎTRISE COMPLÈTE DE LA CHAÎNE DE TRACTION

BYD produit en interne ses moteurs à aimants intérieurs (IPMSM), optimisés pour le rendement, mais avec une politique active de recyclage des terres rares.

Leur plateforme e-Platform 3.0 intègre :

- ◇ Moteur,
- ◇ Contrôleur,
- ◇ Boîte,
- ◇ Batterie 'Blade'², dans une logique "all in-house".

 *Objectif : performance, souveraineté technologique, et flexibilité d'architecture.*

XPENG – EXPÉRIMENTATION RAPIDE, INNOVATION SOFTWARE

XPeng développe ses propres architectures moteurs, avec des recherches avancées sur :

- ◇ des systèmes de commutation électronique sans aimants,
- ◇ des moteurs asynchrones secondaires pour optimiser le rendement en roulage stabilisé,
- ◇ une stratégie logicielle très poussée : pilotage adaptatif, recharge dynamique, reconfiguration des flux.

² La batterie Blade est une batterie LFP (lithium-fer-phosphate) développée par BYD. Elle adopte une architecture en cellules longues insérées directement dans le pack, sans modules intermédiaires.

Ce design améliore la densité volumique, la sécurité en cas de perforation, et la durabilité thermique, tout en réduisant les coûts.

PARTIE III – TECHNOLOGIES FUTURES ET RUPTURES POSSIBLES

Si les moteurs PMSM, WRSM et asynchrones dominent aujourd'hui la propulsion électrique automobile, plusieurs pistes technologiques avancées émergent dans les laboratoires, centres de R&D ou projets pilotes. Ces innovations visent à répondre à des limites bien identifiées : poids, rendement, matériaux critiques, densité de couple, ou intégration fonctionnelle.

A – SUPRA-CONDUCTIVITÉ ET MOTEURS CRYOGÉNIQUES

La supraconductivité offre, sur le papier, un rendement quasi parfait ($\approx 99,9\%$) en supprimant les pertes par résistance électrique. En théorie, cela permettrait :

- ◇ des moteurs ultra-compactes et puissants,
- ◇ un champ magnétique très intense,
- ◇ et un refroidissement optimisé par cryogénie.

Mais les contraintes restent lourdes :

- ◇ nécessité d'un refroidissement à l'azote liquide ou à l'hélium,
- ◇ coûts élevés,
- ◇ fiabilité incertaine pour l'automobile.

Application actuelle : réservée à l'aéronautique (Airbus, Safran), à l'industrie lourde ou aux projets de recherche (CEA, CNRS).

Aucun constructeur n'envisage à ce jour une industrialisation à court terme pour les véhicules légers.

B – MOTEURS À COMMUTATION PAR RELUCTANCE AMÉLIORÉE

Les moteurs à réluctance variable (SRM) génèrent leur couple non pas par induction ou aimants, mais par la différence d'opposition magnétique entre les dents du stator et du rotor. Ils sont :

- ◇ très robustes,
- ◇ sans aimants,
- ◇ et peu coûteux à produire.

Mais ils souffrent encore de :

- ◇ bruits acoustiques élevés,
- ◇ un pilotage complexe (demande une électronique de puissance très réactive),
- ◇ et une efficacité moyenne à bas régime.

En développement avancé chez Nidec, Zhejiang CRRC, et certains laboratoires en Chine et aux États-Unis.

Intérêt croissant en vue de motorisations secondaires, ou dans le low-cost robuste.

C – FLUX TRANSVERSAL / MOTEURS HYBRIDES AXIAL-RADIAL

Ces architectures peu conventionnelles visent à comprimer l'encombrement moteur tout en augmentant le couple instantané :

- ◇ le flux transversal dirige le champ magnétique perpendiculairement à la rotation, comme un peigne.
- ◇ les moteurs hybrides axial-radial combinent les deux configurations pour tirer parti de leur géométrie respective.

En développement chez Lucchi-Motor, certains centres universitaires, et start-up allemandes.

Frein principal : difficulté de fabrication, pertes transversales non maîtrisées, refroidissement non trivial.

D – NOUVEAUX MATÉRIAUX : NANOCOMPOSITES, SUPERALLIAGES ET ALLÈGEMENT

L'avenir du moteur électrique ne se joue pas uniquement dans son schéma magnétique, mais aussi dans ses matériaux constitutifs :

- ◇ Acier au silicium à grains orientés : réduit les pertes magnétiques.
- ◇ Composites à matrice céramique ou polymère : réduisent le poids et la résistance thermique.
- ◇ Aimants sans terres rares : ferrites optimisés, spinelles de substitution, solutions japonaises alternatives (Hitachi, Aichi Steel).

Plusieurs projets européens visent à créer une supply chain indépendante des terres rares via la recherche sur matériaux substitutifs.

Objectif : garder un haut rendement sans passer par des ressources critiques.

E – MOTORISATION PAR ROUE (IN-WHEEL MOTORS)

Le moteur-roue reste une sorte de mythe technique : chaque roue devient un moteur, supprimant toute transmission. Cela permettrait :

- ◇ une intégration maximale,
- ◇ une liberté architecturale totale (plateformes plates),
- ◇ des fonctions avancées (traction vectorielle indépendante, freinage régénératif optimisé).

Mais les limites sont encore fortes :

- ◇ augmentation du poids non suspendu (affecte le confort et la tenue de route),
- ◇ coût et complexité (refroidissement, câblage, maintenance),
- ◇ exposition accrue aux chocs et à la boue/saletés.

 *Déjà utilisé dans certains bus électriques, engins spécialisés, ou micro-urbains.*

 *Peu probable à court terme pour des véhicules particuliers classiques, sauf véhicules à très bas gabarit.*

CONCLUSION

Si l'industrie automobile repose encore largement sur des architectures éprouvées (PMSM, WRSM, asynchrones), l'éventail des technologies en gestation est riche, audacieux... mais souvent contraint par la réalité industrielle.

Certaines pistes, comme la réluctance améliorée ou les matériaux de substitution, pourraient s'imposer dès les prochaines années pour des usages ciblés. D'autres, comme la supraconductivité ou la motorisation par roue, relèvent encore de la prospective ou de la niche.

Ces ruptures montrent une chose : le moteur électrique du futur ne sera pas unique, mais adapté aux contextes d'usage, aux arbitrages industriels et aux exigences stratégiques. Autonomie, coût, rendement, souveraineté : chaque constructeur trace sa propre voie.

PARTIE V – APPROCHE STRATÉGIQUE & INDUSTRIELLE

L'innovation technologique dans les moteurs pour véhicules électriques ne peut être dissociée des dynamiques industrielles mondiales. Les choix de chaque constructeur sont le fruit de contraintes techniques, mais aussi de logiques de filière, enjeux de souveraineté et régulations environnementales. Cette partie vise à cartographier les grandes orientations en cours et à projeter les évolutions à moyen terme.

A – CARTOGRAPHIE DES ACTEURS MAJEURS

CONSTRUCTEURS AUTOMOBILES

Chaque constructeur combine des critères propres : coûts, performance, image de marque, dépendances, stratégie logique...

<i>Constructeur</i>	<i>Technologie moteur principale</i>	<i>Particularité stratégique</i>
BMW	Rotor bobiné (WRSM)	Haut rendement sans terres rares, production interne
Renault	WRSM (via Valeo)	Souveraineté, filière française, intégration e-axe
Stellantis	WRSM (via Emotors)	Coût contenu, production France, grande série
BYD	PMSM à aimants internes	Fabrication en interne, stratégie verticale
Hyundai-Kia	PMSM hairpin	Plateforme 800V, densité, production optimisée
XPeng	Asynchrone + expérimental	Innovation logicielle, commutation électronique
Lucid / Tesla	PMSM optimisés + moteur secondaire	Architecture bimoteur, optimisation logicielle

Ce tableau met en évidence la diversité des logiques industrielles : certains misent sur des technologies maîtrisées en interne (BMW, BYD, Hyundai), d'autres s'appuient sur des partenariats (Renault avec Valeo, Stellantis avec Nidec).

La verticalisation (BYD, Hyundai) s'oppose à des approches modulaires et co-développées.

Dans tous les cas, le moteur devient un levier de différenciation : performance, rendement, coûts... mais aussi image de marque, comme le prouve le choix de BMW de renoncer aux terres rares sur toute sa gamme.

ÉQUIPEMENTIERS / MOTORISTES

<i>Constructeur</i>	<i>Technologie moteur principale</i>	<i>Particularité stratégique</i>
Valeo	WRSM, onduleurs 800V	Cœur de gamme européen, partenariats stratégiques
Nidec	WRSM, IM, SRM	Standardisation, coentreprise avec Stellantis (Emotors)
Mahle	Flux axial, refroidissement huile	Recherche allègement et compacité
Lucchi-Motor	Flux axial / transversal	Ultra-compacts, véhicules spécifiques
YASA (Mercedes)	Flux axial haut rendement	Intégration AMG haut de gamme

Le rôle des équipementiers reste central dans la conception des moteurs nouvelle génération. Certains (Valeo, Mahle) développent des briques technologiques spécifiques (onduleurs, refroidissements, e-axes), tandis que d'autres (Nidec, YASA) ambitionnent de livrer des groupes motopropulseurs complets.

Ce tableau révèle aussi une tension stratégique : les motoristes européens cherchent à s'imposer face à la puissance d'intégration asiatique (BYD, Hyundai), tout en répondant aux attentes des constructeurs locaux en matière de souveraineté et performance.

B – FILIÈRES D'APPROVISIONNEMENT CRITIQUES

Les moteurs électriques reposent encore sur des chaînes d'approvisionnement sous tension :

- ◇ Cuivre : En hausse constante. Très sensible à la demande mondiale liée à la transition énergétique.
- ◇ Terres rares : Concentration extrême de la chaîne en Chine. Pressions géopolitiques croissantes.
- ◇ Aciers magnétiques (tôles) : Normes techniques exigeantes. Difficulté à produire localement.
- ◇ Isolants, résines, matériaux composites : Enjeu thermique et environnemental (recyclabilité, toxicité).

Tendance : Diversification des sources, montée en compétence des producteurs régionaux, projets européens de sécurisation des approvisionnements (Alliance européenne des matières premières, IPCEI...).

C – RÉINDUSTRIALISATION & SOUVERAINETÉ

La motorisation électrique devient un axe de réindustrialisation stratégique, à l'échelle nationale ou régionale. Plusieurs groupes relocalisent leur production moteur ou créent des coentreprises pour reprendre le contrôle de la chaîne de traction.

FRANCE :

- ◇ Trémery (Stellantis–Emotors) – production de moteurs WRSM M3
- ◇ Cléon (Renault–Valeo) – site historique reconverti pour l'électrique
- ◇ Soutien public via France Relance, ZFE et Pacte productif

ALLEMAGNE :

- ◇ Dingolfing (BMW) – moteurs eDrive 5e génération
- ◇ Kamenz (Mercedes / YASA) – intégration moteur axial AMG

CORÉE :

- ◇ Hyundai maîtrise toute la chaîne, du stator au convertisseur, sur ses sites de Ulsan et Asan.

CHINE :

- ◇ BYD, XPeng et NIO intègrent moteur, batterie et onduleur dans une logique de verticalisation complète, avec fabrication locale et brevets déposés.

Des alliances stratégiques se structurent : Renault–Valeo, Stellantis–Nidec, Volkswagen–Xpeng.

Elles répondent autant à une volonté d'innovation qu'aux régulations européennes à venir : mécanisme d'ajustement carbone aux frontières (CBAM), taxonomie verte, exigences de traçabilité des matériaux critiques.

D - SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION À 5–10 ANS

<i>Enjeu</i>	<i>Évolution probable</i>	<i>Horizon</i>
<i>Réduction des terres rares</i>	WRSM généralisés / ferrites optimisées	2025–2030
<i>Architecture intégrée e-axe</i>	Standardisation, compacité, coût réduit	2024–2028
<i>Modularité logicielle</i>	Pilotage adaptatif multi-usage	2025–2030
<i>Allègement</i>	Nouveaux composites, rotor creux	2026–2032
<i>Innovations de rupture</i>	Reluctance, cryogénie, flux transversal	>2030 (niches)

Ouverture : Si l'innovation technologique reste déterminante, c'est l'alignement entre filières, régulations, ressources et compétences locales qui définira les gagnants industriels de demain. Les moteurs de demain ne seront pas seulement plus performants, ils devront être plus souverains, plus durables, et plus intelligemment intégrés.

CONCLUSION GÉNÉRALE – LE MOTEUR ÉLECTRIQUE : ENJEU STRATÉGIQUE DE LA MOBILITÉ DÉCARBONÉE

Longtemps perçu comme un élément secondaire de la propulsion électrique, le moteur est devenu un marqueur de souveraineté industrielle, de différenciation technologique et d'intelligence d'intégration.

Ce dossier l'a montré : il n'existe pas de solution unique. Entre moteurs à aimants permanents, à rotor bobiné, asynchrones, ou à flux axial, chaque architecture répond à un compromis différent, entre :

- ◇ rendement énergétique,
- ◇ disponibilité des matériaux,
- ◇ contraintes d'intégration,
- ◇ choix géopolitiques,
- ◇ et stratégie produit.

La décennie 2025–2035 verra coexister plusieurs technologies, souvent complémentaires :

- ◇ le WRSM s'impose comme une réponse mature aux enjeux de dépendance,
- ◇ le PMSM optimisé reste dominant sur les segments compacts à haut rendement,
- ◇ les technologies de rupture (reluctance, transversal, cryogénie) progresseront dans des niches ciblées,
- ◇ et l'intégration logicielle deviendra une composante clé de la performance perçue.

Mais au-delà de la technique, c'est la maîtrise de la chaîne de traction dans son ensemble – moteur, onduleur, logiciel, refroidissement, recyclabilité – qui fera la différence. Le moteur électrique n'est plus un simple composant : il est le nouveau totem de l'excellence industrielle décarbonée.

BIBLIOGRAPHIE

DOCUMENTS ET PUBLICATIONS TECHNIQUES

- ◇ BMW Group – Technologie eDrive de 5e génération, documents presse et présentation technique (2023-2024)
- ◇ Renault Group / Valeo – Partenariat sur le moteur WRSM 200 kW (communiqués de presse et slides Renault-Nissan Alliance)
- ◇ YASA Motors – Axial Flux Motors for Performance Vehicles (white papers, site officiel)
- ◇ Koenigsegg – Quark Motor Specification & Design Rationale
- ◇ Hyundai Motor Group – E-GMP Platform Whitepaper (2022)
- ◇ Nidec – EV Traction Motor Strategy & Mass Production Targets, conférence EV Japan (2024)
- ◇ ZF Group – Electric Drive Modules Portfolio 2023
- ◇ Lucchi-Motor – Présentations salons et publications techniques (2023-2024)
- ◇ Stellantis / Emotors – Présentation usine Trémery & stratégie moteur France, sources presse

SOURCES SCIENTIFIQUES ET ACADÉMIQUES

- ◇ IEA – Global EV Outlook 2024, chapitre sur les motorisations et leurs évolutions
- ◇ ResearchGate – Schéma sur le refroidissement moteur (source schématique utilisée dans le dossier)
- ◇ IEEE Xplore – Comparative Study of PMSM vs. WRSM in Electric Vehicle Applications (2022)
- ◇ SAE International – Articles sur les flux axiaux, moteurs à reluctance et intégrations e-axe

SOURCES WEB ET PORTAILS SPÉCIALISÉS

- ◇ InsideEVs / Electrek – Actualités industrielles sur les moteurs eDrive, e-Axle et innovations constructeurs
- ◇ AutoTech Review – Dossiers techniques sur le flux axial et les architectures e-powertrain
- ◇ Green Car Congress – Articles de fond sur l'industrialisation des moteurs sans terres rares
- ◇ CleanTechnica – Actualités sur BYD, XPeng, NIO et leur stratégie d'intégration moteur/inverter/batterie

AUTRES RESSOURCES CITÉES OU ILLUSTRATIVES

- ◇ ResearchGate – Illustration du circuit de refroidissement
- ◇ Valeo Group – Détails techniques du moteur 2027 Renault-Valeo
- ◇ Protean Electric – Moteurs in-wheel
- ◇ Lucchi-Motor – Présentations moteurs compacts
- ◇ Fiches-auto.fr (utilisé ponctuellement pour des illustrations schématiques)