Cours CSE – Master 2 ETI

Commande des Systèmes Électriques

Dr Ghlam Karima

Année universitaire 2026-2027

Fiche programme de la matière

Intitulé de la matière	Commande des systèmes électriques (CSE)
Semestre	3
Unité d'enseignement	Fondamentale – Code : UEF 2.1.1
VHS	45 h (Cours : 1h30, TD : 1h30)
Crédits	4
Coefficient	2
Mode d'évaluation	Contrôle continu : 40 % ; Examen : 60 %

Objectifs de l'enseignement

— Apprendre à choisir les éléments de la commande et des actionneurs d'un système électrique.

— Aborder la commande de systèmes industriels tels que les pompes, les ponts roulants, les extracteurs, etc.

Connaissances préalables recommandées

Machines électriques, identification des systèmes, asservissement et régulation, etc.

Contenu de la matière

Chapitre 1 : Critères de choix d'un moteur électrique dans un environnement industriel

1.1 Moteurs électriques

— Utilisation des machines électriques de construction normale

— Moteurs de construction spécifique

1.2 Choix des moteurs en fonction :

— de l'environnement industriel

— de la puissance

— du régime de fonctionnement

Chapitre 2 : Commande électrique et automatisation des pompes, des ventilateurs et des compresseurs

2.1 Principes

2.2 Puissance en bout d'arbre

2.3 Démarrage des mécanismes à couple de ventilateurs

2.4 Commande électrique des ventilateurs

Chapitre 3 : Alimentation et automatisation des ascenseurs et des extracteurs

3.1 Principes

3.2 Précision du stationnement des systèmes de levage

3.3 Exigences dans les systèmes de commande des ascenseurs

3.4 Schémas types des commandes pour les ascenseurs

3.5 Automatisation des commandes de vitesse des ascenseurs

Chapitre 4 : Automatisation des ponts roulants

4.1 Principes

4.2 Charges des moteurs des mécanismes des ponts roulants

4.3 Systèmes de levage électromagnétique

4.4 Les systèmes de commande électriques des ponts roulants

4.5 Exigences des caractéristiques mécaniques des commandes électriques des ponts roulants

4.6 Automatisation des ponts roulants au moyen des convertisseurs à thyristors

4.7 Équipement des grands ponts roulants

4.8 Commande à distance des ponts roulants

4.9 Alimentation des ponts roulants

Table des matières

Fiche programme de la matière **1**

1 Plan du cours **4**

2 Domaine de puissance des motorisations électriques **4**
2.1 Étendue du domaine 4
2.2 Représentation graphique des ordres de grandeur 4
2.3 Exemples d'applications par niveau de puissance 5

3 Types de moteurs et domaines de puissance **6**
3.1 Classification simplifiée 6
3.2 Moteur à courant continu (CC) 6
3.3 Moteur asynchrone 7
3.4 Moteur synchrone triphasé 7
3.5 Moteur pas à pas 8
3.6 Moteur à réluctance variable 9
3.7 Moteur universel 10
3.8 Moteur couple 10
3.9 Moteur linéaire 11
3.10 Puissance massique des moteurs électriques 11
3.11 Limites de faisabilité des moteurs standards 13

4 Place de la force motrice électrique dans la consommation d'énergie **13**
4.1 Un levier majeur d'économie d'énergie 13
4.2 Chiffres clés 13
4.3 Conséquences et pistes d'action 14

1 Plan du cours

1.1 Domaine de puissance des motorisations électriques

1.2 Types de moteurs et domaines de puissance associés

1.3 Place de la force motrice électrique dans la consommation d'énergie

2 Domaine de puissance des motorisations électriques

2.1 Étendue du domaine

Les motorisations électriques couvrent près de **10 décades de puissance**, depuis quelques **milliwatts** jusqu'à plusieurs **centaines de mégawatts**. On les retrouve dans tous les secteurs d'activité : microsystèmes, horlogerie, électroménager, industrie, traction ferroviaire, propulsion navale, production d'énergie, etc.

2.2 Représentation graphique des ordres de grandeur

Le document de référence (page 1) présente un graphique fondamental :

— **Axe des ordonnées** : puissance de la machine et couple disponible pour une vitesse nominale fixée à **3000 tr/min**.

— **Axe des abscisses** : diamètre du rotor, proportionnel au couple délivré.

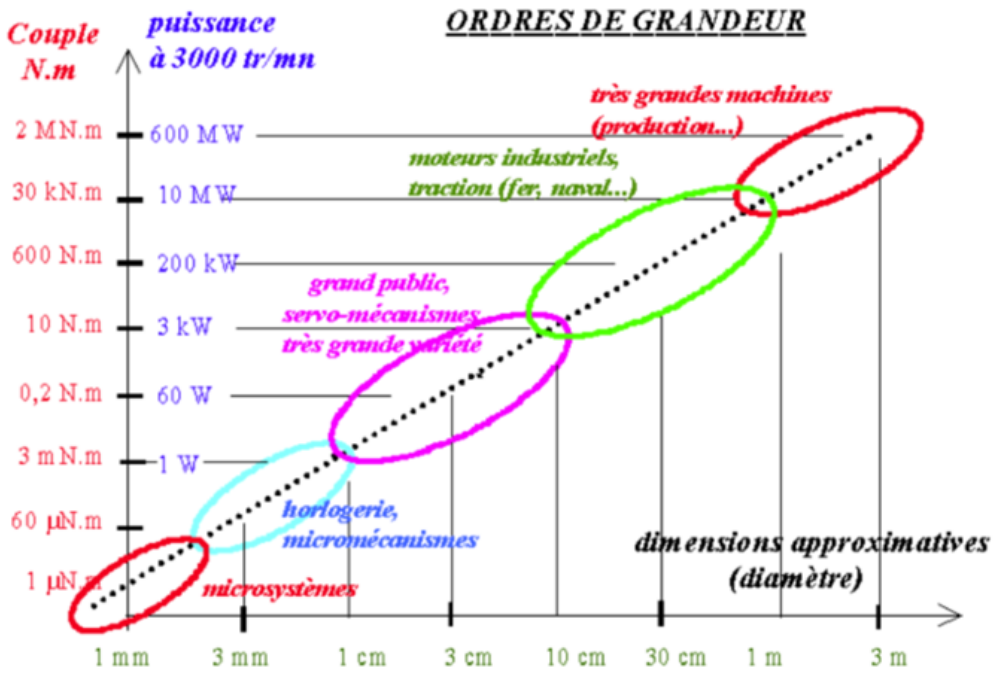


FIGURE 1 – Ordres de grandeur des motorisations électriques : puissance, couple à 3000 tr/min et diamètre du rotor.

On y distingue plusieurs zones :

— **Microsystèmes** : quelques mW à quelques W, diamètre < 1 mm.

— **Horlogerie, micromécanismes** : puissance de l'ordre du W, diamètre de quelques mm.

— **Grand public, servomécanismes, très grande variété** : de quelques watts à quelques kilowatts, diamètre de 1 cm à 10 cm.

— **Moteurs industriels, traction (fer, naval)** : de quelques kW à plusieurs MW, diamètre de 10 cm à 1 m.

— **Très grandes machines (production d'énergie)** : jusqu'à 600 MW et plus, diamètre $>$ 1 m.

2.3 Exemples d'applications par niveau de puissance

Puissance unitaire	**Applications typiques**
1 mW – 1 W	Horlogerie, mesure, microsystèmes
1 W – 1 kW	Périt-informatique, électroménager, manutention
1 kW – 1 MW	Agroalimentaire, aéronautique, transports, métallurgie
1 MW – 1 GW	Grande production, propulsion navale, traction ferroviaire

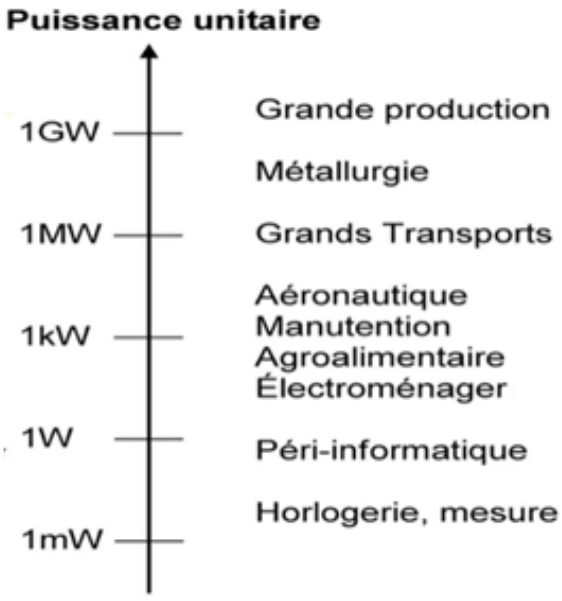


FIGURE 2 – Puissance unitaire des moteurs électriques et exemples d'applications.

Exemples concrets de propulsion navale (page 2) :

— **Paquebot « Le Normandie » (1935)** : alternateurs synchrones 4×33 MW – 6000 V, 81 Hz ; moteurs asynchrones puis synchrones 4×30 MW – 243 tr/min.

— **Paquebot « Queen Mary 2 » (2000)** : propulsion électrique, alternateurs 115 MW, moteurs 4×20 MW – Code Thyristors.



FIGURE 3 – Applications des moteurs électriques dans la propulsion navale : Le Normandie (1935) et Queen Mary 2 (2000).

Ces exemples illustrent la montée en puissance et l'évolution des technologies (de l'asynchrone au synchrone, puis à l'électronique de puissance).

3 Types de moteurs et domaines de puissance

3.1 Classification simplifiée

On peut classer les moteurs électriques en quatre grandes familles :

1. **Moteurs avec balais et collecteur** (ex. moteur à courant continu, moteur universel).
2. **Moteurs sans balai** (ex. moteur asynchrone, moteur synchrone à aimants permanents, moteur à réluctance variable).
3. **Moteurs spéciaux** (ex. moteur pas à pas, moteur couple).
4. **Moteurs linéaires** (dérivés des servomoteurs synchrones sans balais).

Les moteurs les plus répandus dans l'industrie sont le moteur asynchrone et le moteur synchrone.

3.2 Moteur à courant continu (CC)

— **Gamme de puissance** : 1 W à 10 MW.

— **Avantages** :

  — Installation facile.

  — Commande de vitesse dans une large gamme (variation de la tension d'alimentation).

  - Démarrage, arrêt, marche arrière et accélération rapides.
  - Couple de démarrage élevé.
  - Courbe couple-vitesse linéaire.
- **Inconvénients** : présence de balais et collecteur (usure, maintenance), coût initial parfois plus élevé que les systèmes C.A. pour certaines puissances.
- **Application typique** : servomoteur CC de 500 W (page 4).



FIGURE 4 – Servomoteur à courant continu de 500 W.

3.3 Moteur asynchrone

- **Gamme de puissance** :
  - Monophasé : 100 W – 1 kW.
  - Triphasé : 1 kW – 20 MW.
- **Caractéristiques** :
  - Cheville ouvrière de l'industrie : **80 % de la force motrice** produite.
  - Fiabilité, robustesse, maintenance réduite, rendement élevé.
  - Peut démarrer et fonctionner à vitesse constante directement sur le réseau (ex. Sonelgaz en Algérie).
  - Associé à un variateur électronique de fréquence, il accède aux applications à vitesse variable.
- **Application typique** : moteur asynchrone de quelques kilowatts (page 4).

3.4 Moteur synchrone triphasé

- **Gamme de puissance** :
  - À aimants permanents (servomoteur) : 100 W – 50 kW.
  - À rotor bobiné : 5 kW – 50 MW.
- **Caractéristiques** :
  - Très utilisé pour les fortes puissances (> quelques MW), à vitesse fixe ou variable.
  - Très bon rendement.



FIGURE 5 – Moteur asynchrone de quelques kilowatts.

  - Version servomoteur à aimants permanents : applications « haut de gamme » à couple massique et dynamique élevés (robotique, machine-outil).
  - Utilisé comme **alternateur** dans les centrales électriques : puissances unitaires jusqu'à **1 GW**.
- **Application typique** : servomoteur synchrone d'une dizaine de kilowatts (page 5).



FIGURE 6 – Servomoteur synchrone d'une dizaine de kilowatts.

3.5 Moteur pas à pas

- **Gamme de puissance** : 5 W – 500 W.
- **Caractéristiques** :
  - Montée en puissance rapide sur le marché industriel.
  - Associé aux processeurs des machines-outils à commande numérique et à tous les dispositifs nécessitant un positionnement précis.
  - Constitution simple, mais nécessite une électronique de commande et d'alimentation.
- **Application typique** : moteur pas à pas 12 V, couple de maintien 30 N·cm, angle de pas 1,8° (page 5).

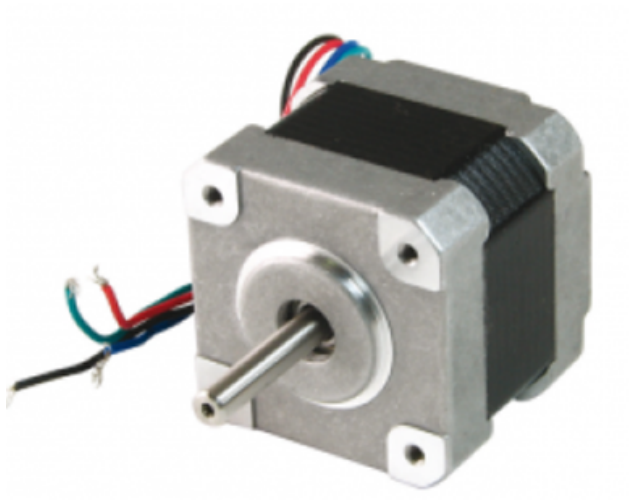


FIGURE 7 – Moteur pas à pas 12 V, couple de maintien 30 N·cm, angle de pas 1,8°.

3.6 Moteur à réluctance variable

— **Gamme de puissance** : 100 W – 300 kW.
— **Caractéristiques** :
  — Pas d'aimant ni de bobinage sur le rotor.
  — Absence de terres rares → indépendance vis-à-vis de la Chine (90 % de la production mondiale).
  — Robuste et résistant à la chaleur.
  — Longtemps difficile à miniaturiser pour l'embarqué ; aujourd'hui adapté au véhicule électrique (puissances de l'ordre de la centaine de kW).
  — Densité de puissance 20 à 40 % supérieure à celle d'un moteur asynchrone, meilleur rendement.
— **Application typique** : moteur à réluctance variable d'une dizaine de kilowatts (page 6).



FIGURE 8 – Moteur à réluctance variable d'une dizaine de kilowatts.

3.7 Moteur universel

— **Gamme de puissance** : 100 W – 1 kW.

— **Caractéristiques** :

  — Moteur à « courant continu » prévu pour fonctionner en courant alternatif monophasé (mais fonctionnerait mieux en continu).

  — Très utilisé dans la vie domestique : moulins à café, mélangeurs, mixeurs, robots ménagers, foreuses, ponceuses, scies sauteuses, petits ventilateurs, sèche-cheveux, aspirateurs.

  — La vitesse chute très vite lorsqu'un couple important est demandé.

— **Application typique** : moteur de lave-linge de quelques centaines de watts (page 6).



FIGURE 9 – Moteur universel de lave-linge de quelques centaines de watts.

3.8 Moteur couple

— **Caractéristiques** :

  — Plage : 10 N·m à 20 000 N·m (en continu) – 0 à 4000 tr/min – 1 kW à 300 kW.

  — Utilisé dans les applications à faible vitesse de rotation, généralement en prise directe sans réducteur.

  — Catégorie spéciale de servomoteurs sans balais à aimants permanents (moteurs synchrones à aimants permanents).

  — Charge directement montée sur le rotor → solution pour entraînement direct.

  — Grand nombre de pôles → couples élevés à faibles vitesses.

  — Design compact, large arbre creux, « sans châssis » (pas d'habillage, roulements ou codeur de position).

  — Dimensionnement basé exclusivement sur le couple (et non sur la puissance).

— **Application typique** : moteur couple pour entraînement direct (page 7).

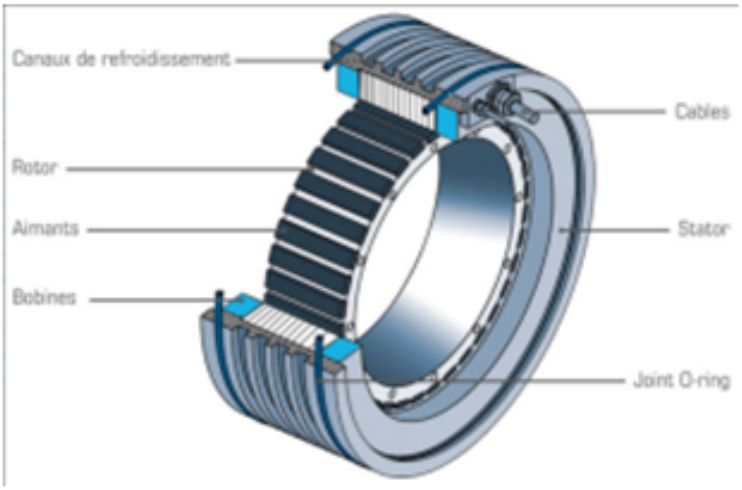


FIGURE 10 – Structure d'un moteur couple : rotor, aimants, bobines, canaux de refroidissement.

3.9 Moteur linéaire

— **Caractéristiques** :
  — Effort : 0 à 8000 N – course jusqu'à 4 m – vitesse jusqu'à 20 m/s.
  — Catégorie spéciale de servomoteurs synchrones sans balais.
  — Fonctionnement identique au moteur couple, mais ouvert et déroulé à plat.
  — Interaction électromagnétique entre un ensemble primaire (bobines) et un ensemble secondaire (aimants permanents) → énergie mécanique linéaire.
  — Dimensionnement basé sur la force, non sur la puissance.
  — Partie mobile directement fixée à la charge → économie de place, simplification du design, élimination du jeu mécanique, suppression des sources de panne (courroies, vis à billes).
  — Meilleure répétabilité de position et précision sur une course illimitée, à haute vitesse.

— **Application typique** : moteur linéaire fer LMA – ETEL (page 8).

3.10 Puissance massique des moteurs électriques

La puissance massique (W/kg) est obtenue en divisant la puissance utile nominale par la masse du moteur. Pour une technologie donnée, plus la puissance augmente, meilleur est ce rapport.

Exemples pour le TGV :

— Sud Est 1re génération (1978-85, MCC) : 350 W/kg

— Atlantique (1988-92, MS rotor bobiné) : 760 W/kg

— TGV Est 2007 (MAS) : 800 W/kg

— Automotrice à grande vitesse (MS à aimants) : 1000 W/kg

Pour une voiture électrique : 500 à 1000 W/kg.

Moteur synchrone :

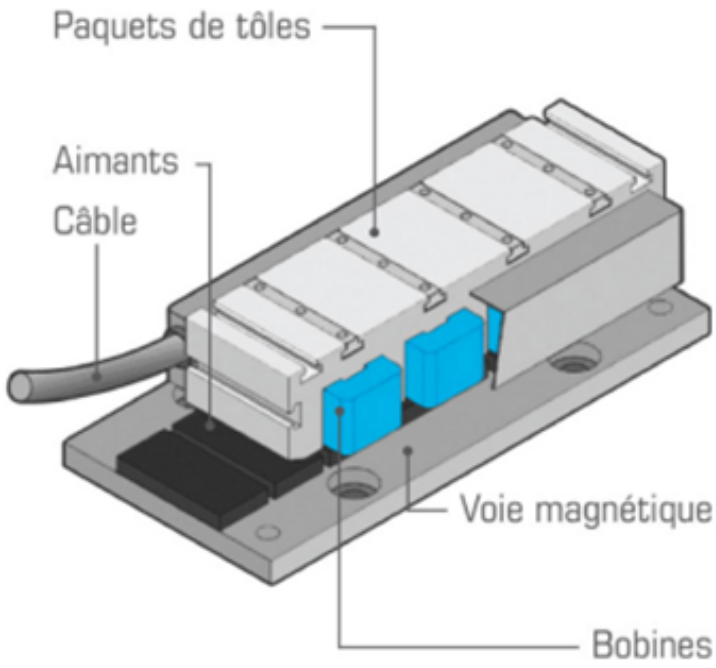


FIGURE 11 – Schéma de principe d'un moteur linéaire : paquets de tôles, aimants, bobines, voie magnétique.

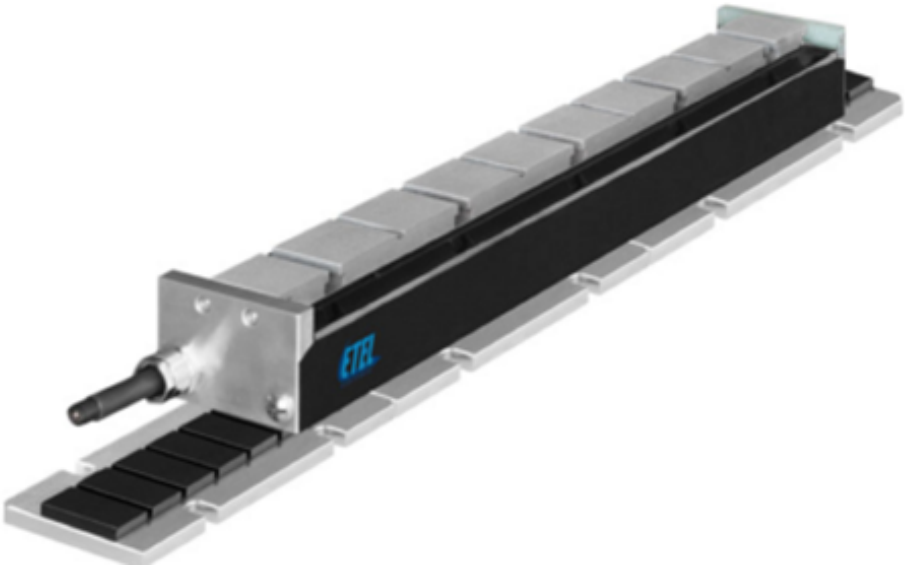


FIGURE 12 – Moteur linéaire fer LMA – ETEL.

— 100 W/kg pour 3 kW
— 1000 W/kg pour 300 kW

Moteur asynchrone :

— 95 W/kg pour 3 kW
— 270 W/kg pour 200 kW
— 350 W/kg pour 900 kW

Moteur à réluctance variable : 275 W/kg pour 125 kW.

Comparaison : un bon cycliste développe environ **3 W/kg** (200 W en moyenne à 90 tr/min, couple de 20 N·m).



FIGURE 13 – Un cycliste en effort : comparaison de puissance massique (environ 3 W/kg).

3.11 Limites de faisabilité des moteurs standards

Le graphique de la page 10 (issu de « Entraînements électriques à vitesse variable », Jean Bonal, Tech&Doc Lavoisier, 1997) trace les limites de faisabilité des moteurs synchrones, asynchrones et à courant continu en fonction de la puissance (MW) et de la vitesse de rotation (tr/min).

On observe :

- **Moteur à courant continu** : limité aux faibles puissances et vitesses élevées.
- **Moteur asynchrone** : domaine étendu, surtout aux puissances moyennes et élevées.
- **Moteur synchrone à rotor bobiné** : fortes puissances, vitesses modérées.
- **Moteur synchrone à aimants** : puissances moyennes à élevées, vitesses élevées.

Ces courbes permettent de choisir le type de moteur le plus adapté à un cahier des charges donné (puissance, vitesse, couple).

4 Place de la force motrice électrique dans la consommation d'énergie

4.1 Un levier majeur d'économie d'énergie

Les moteurs électriques représentent une part prépondérante de la consommation électrique mondiale. Leur optimisation est donc un enjeu énergétique et environnemental majeur.

4.2 Chiffres clés

À l'échelle nationale (Algérie) :

- Sonelgaz confirme des pics de consommation de **19–20 GW** lors des étés récents.
- Le Bilan énergétique national (Ministère de l'Énergie) indique que la consommation industrielle représente **20–30 %** de la consommation finale d'électricité selon les années.

À l'échelle internationale :

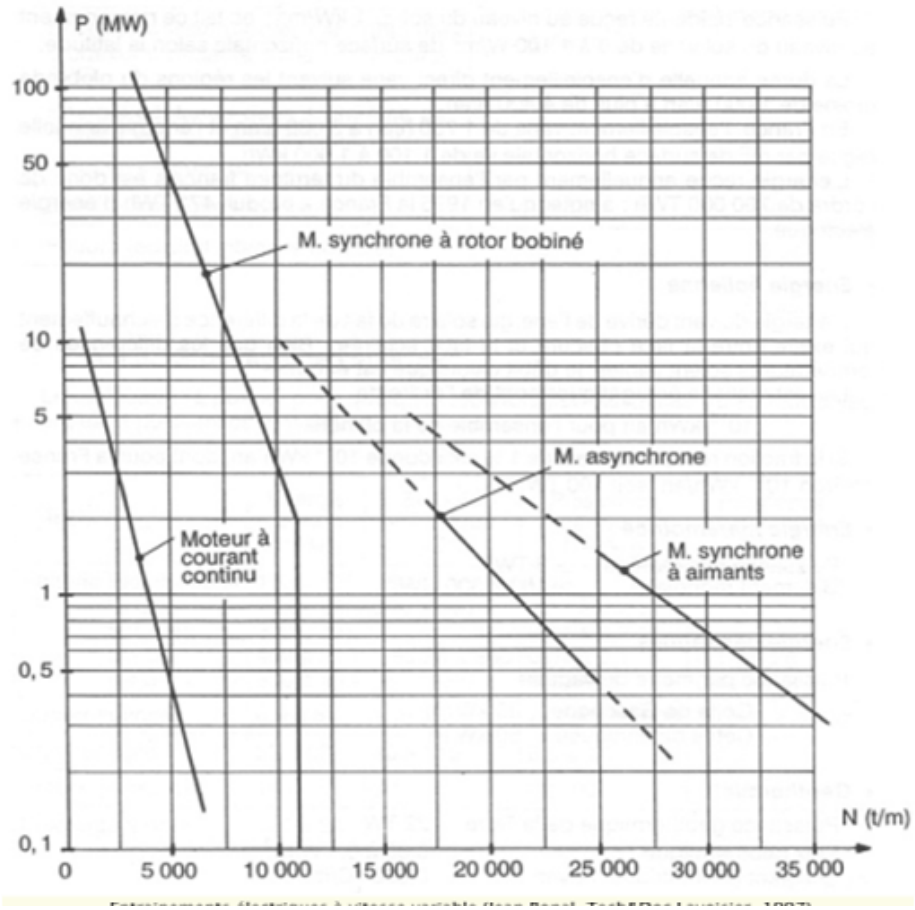


FIGURE 14 – Limites de faisabilité des moteurs synchrones, asynchrones et à courant continu en fonction de la puissance et de la vitesse.

- Les plateformes et rapports de l'**IEA** / **IEA-4E** montrent que les systèmes entraînés par moteurs (pompes, ventilateurs, compresseurs, etc.) représentent une part très élevée de la consommation électrique.
- Chiffres cités dans la littérature : **50 %** de la consommation électrique mondiale est liée aux moteurs/systèmes motorisés.
- Dans l'industrie, la part des moteurs peut atteindre **60–70 %**.
- Ces valeurs varient selon le pays et la structure industrielle.

4.3 Conséquences et pistes d'action

- **Enjeu** : réduire la consommation des systèmes motorisés par :
  - L'utilisation de moteurs à haut rendement (IE3, IE4).
  - L'adoption de variateurs de vitesse électroniques (VFD) pour adapter la vitesse aux besoins réels.
  - L'optimisation des transmissions mécaniques et des profils de charge.
  - La maintenance préventive (roulements, alignement, ventilation).
- **Perspective** : le remplacement des moteurs anciens et l'introduction de commandes intelligentes permettent des économies d'énergie significatives (souvent 20 à 50 % sur les applications à débit variable).