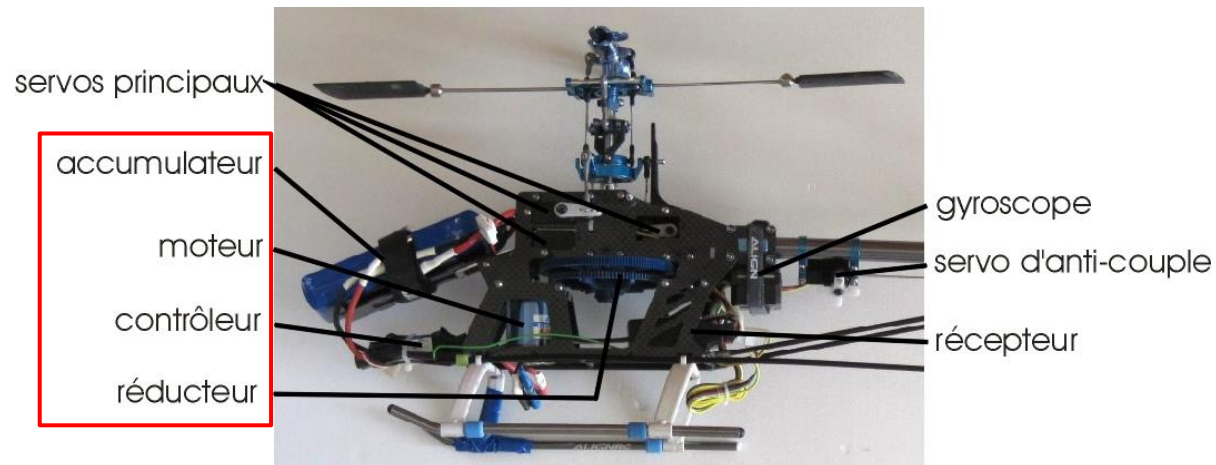


Approche énergétique et schéma synoptique



- **Introduction**
- **Production et transport de l'énergie**
- **Les systèmes d'entraînements électriques (SEE)**
- **Transferts d'énergie**
- **Transferts de puissance**
- **Domaines de fonctionnement**
- **Exemples**

Introduction

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : Approche énergétique et schéma synoptique

Flux d'énergies : exemple d'un véhicule 100% électrique

- Stockage de l'énergie dans une batterie
- Transmission à une machine électrique
 - Puissance électrique en sortie de batterie adaptée aux besoin du moteur ? A votre avis ?
- Conversion en puissance mécanique
- Transmission aux roues, qui permettent la mise en translation du véhicule
 - Puissance mécanique en sortie du moteur adaptée aux besoin des roues ? A votre avis ?

...et vice-versa !

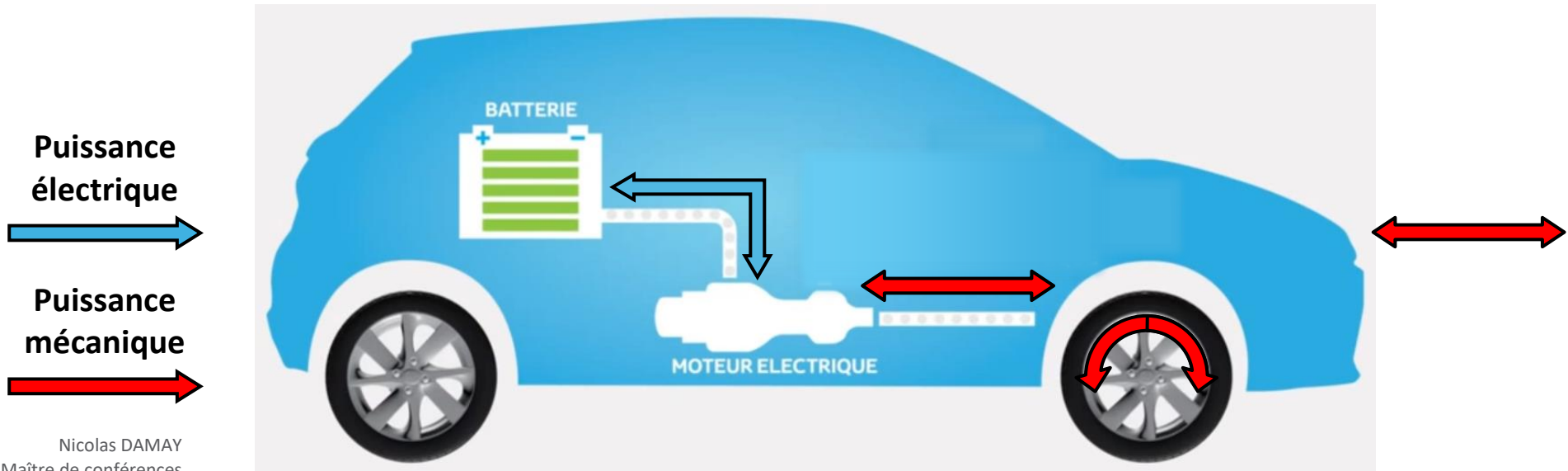


Schéma de véhicule hybride par Toyota

Flux d'énergies

- Puissance radiative (soleil) convertie en puissance électrique
- Transmission aux moteurs + stockage de l'énergie en excédent
- Entraînement des hélices pour créer la poussée nécessaire

Pas de Réversibilité cette fois !

Stockage d'énergie



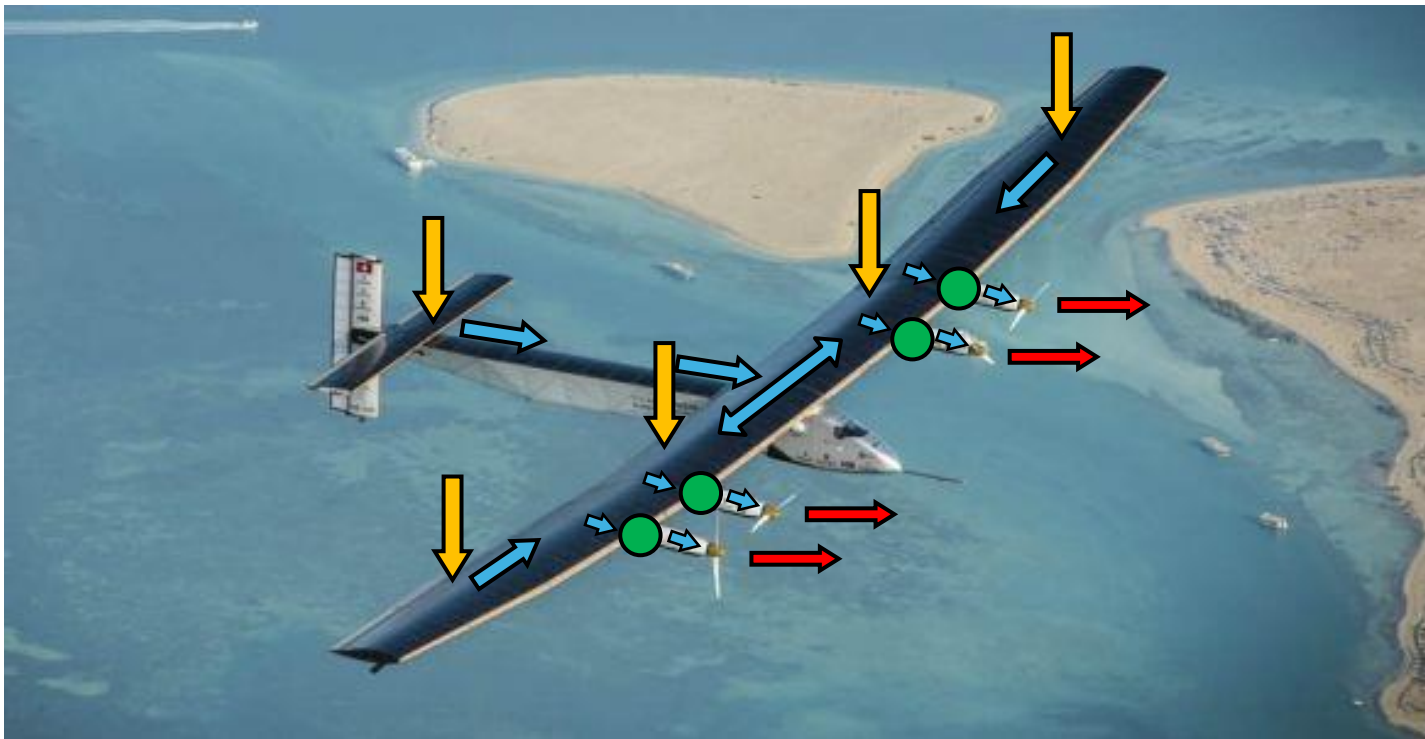
Puissance radiative



Puissance électrique



Puissance mécanique



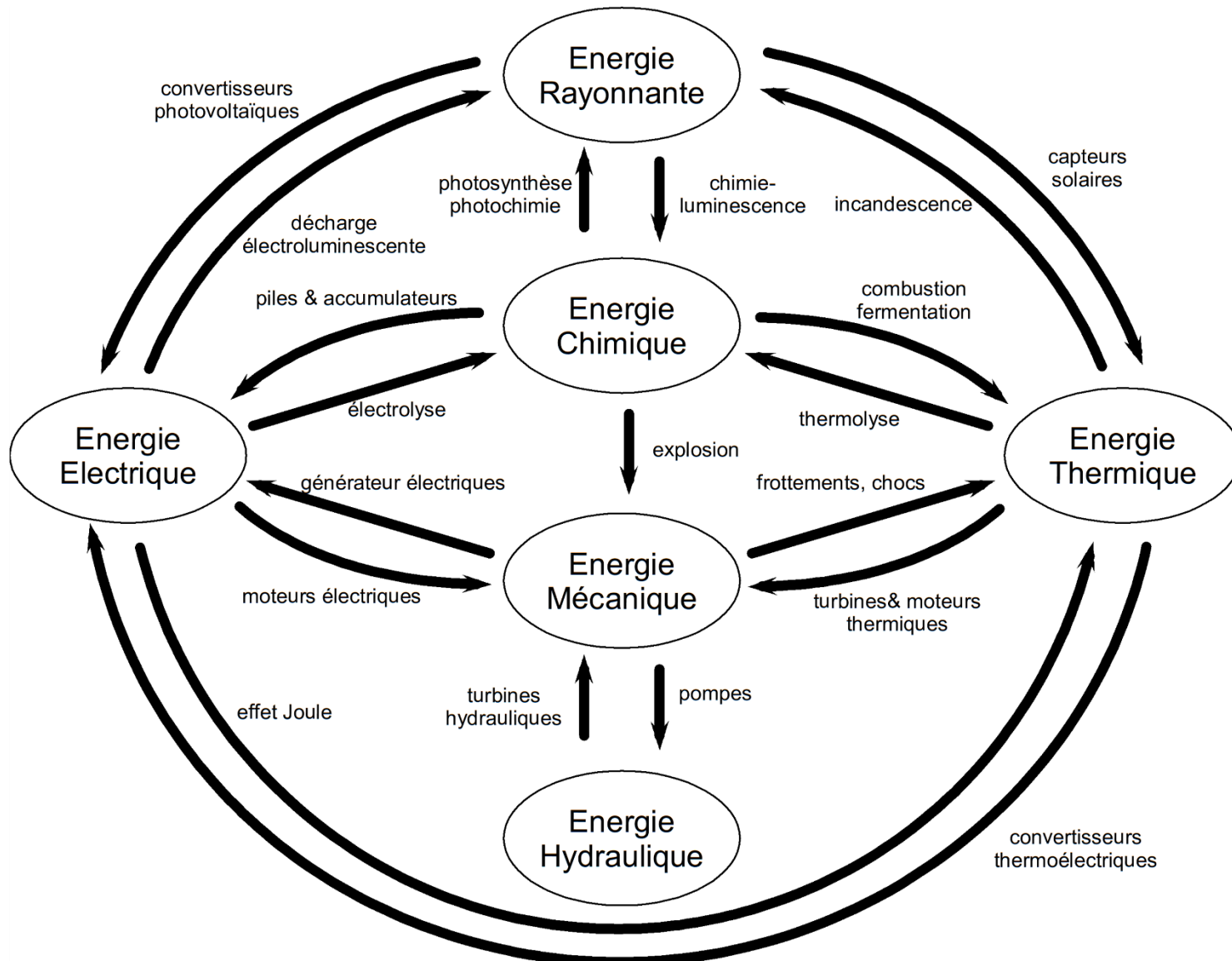
Solar impulse : prototype d'avion à énergie solaire

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : Approche énergétique et schéma synoptique

Bilan : il existe plusieurs types d'énergies/puissances



Bilan

- Les énergies/puissances peuvent être stockées, transmises, converties...
- Chaînes de puissances : irréversibles ou réversibles
- Une puissance mécanique peut être de différentes natures :
 - Il y a donc besoin d'adapter les puissances d'un composant à l'autre : transmission
- C'est la même chose pour une puissance électrique :
 - Il y a tout autant besoin d'adapter les puissances : convertisseur de puissance électronique
- En SY03 on s'intéresse aux composants permettant de stocker ou convertir les énergies électrique et mécanique.
- Il faudra être bien conscient que chaque composant :
 - n'accepte qu'une certaine forme d'énergie en entrée
 - ne peut fournir qu'une certaine forme d'énergie en sortie
 - peut être réversible ou non



Ex : impossible d'alimenter une machine triphasée directement par une batterie !!

D'où vient l'énergie ?

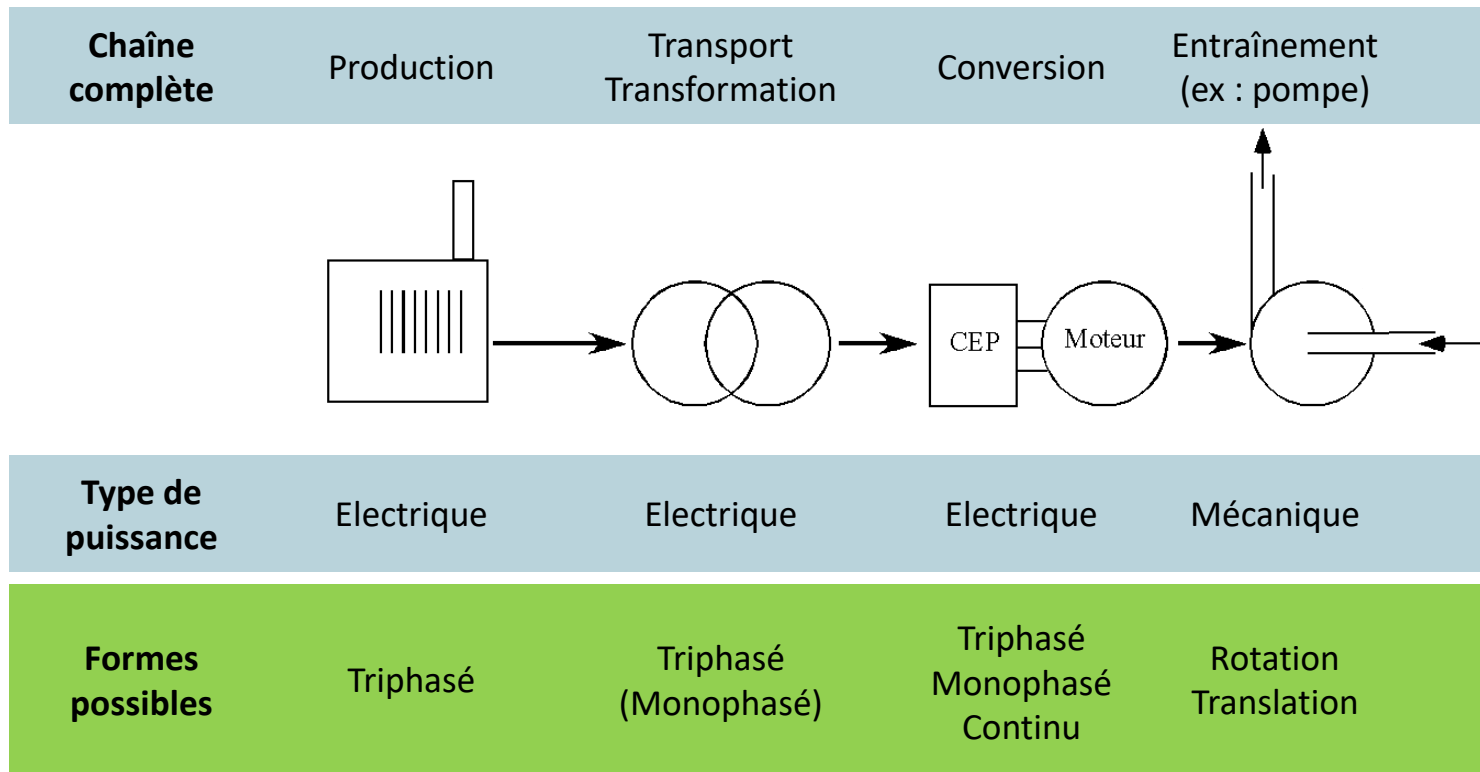
Production / transport

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr

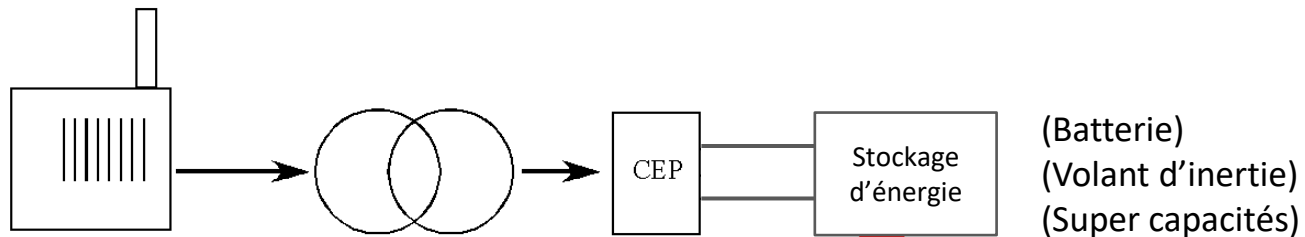
Cours SY03 : Approche énergétique et schéma synoptique

En direct de la production à l'application

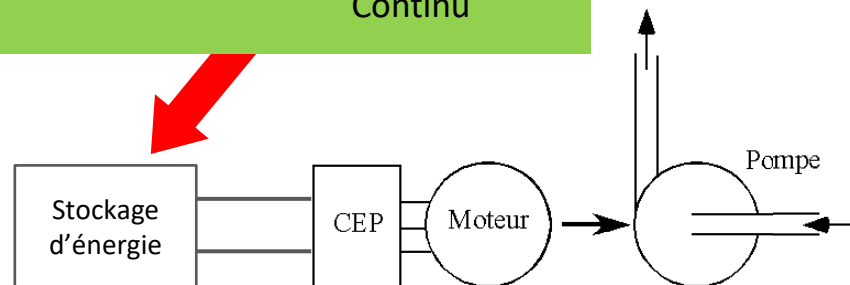


- Production en triphasé à basse tension
- Transport à haute tension et en triphasé (meilleur rendement)
- Transformation vers la basse tension (sécurité des utilisateurs)
- Conversion pour s'adapter à différentes machines électriques

De la production à l'application *via* un système de stockage

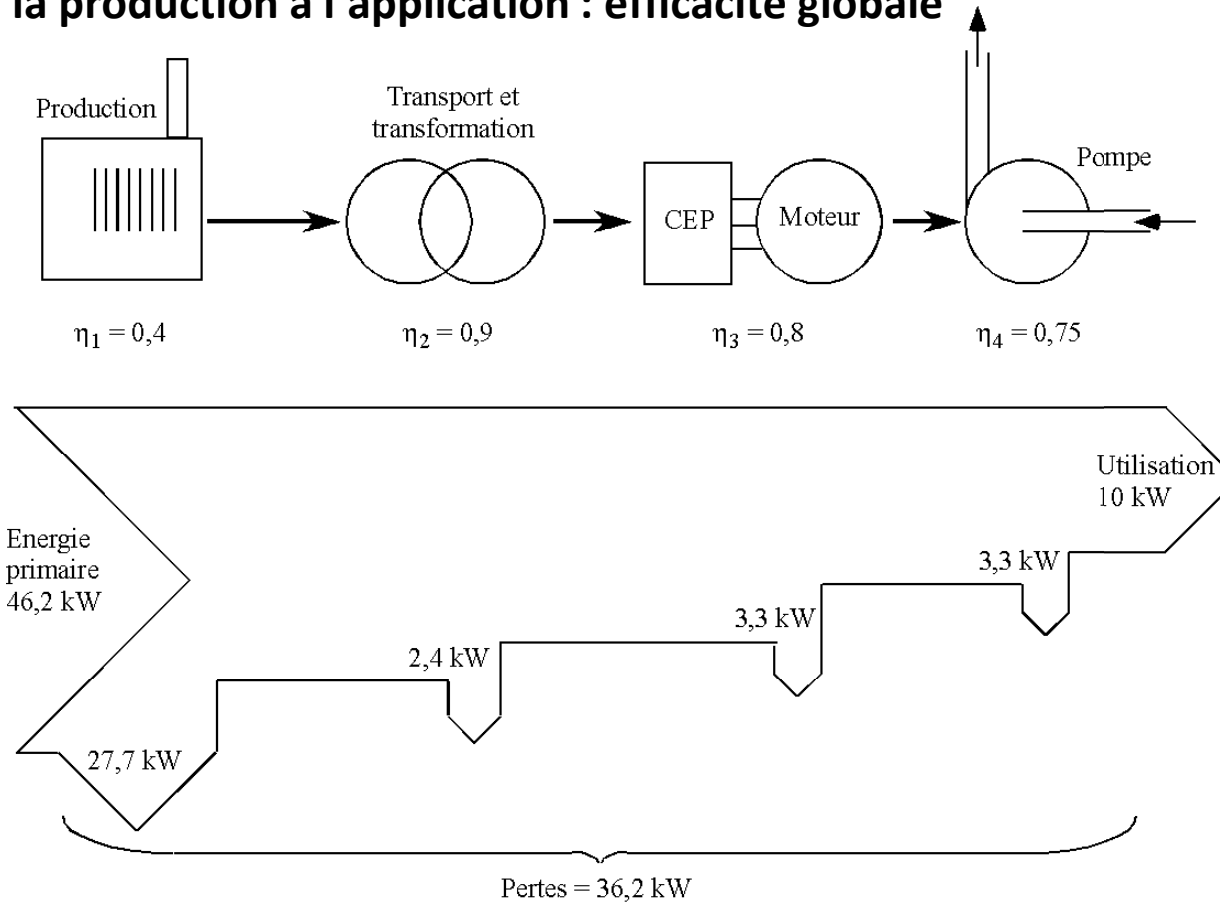


Type de puissance	Electrique	Electrique	Electrique
Formes possibles	Triphasé	Triphasé (Monophasé)	Triphasé Monophasé Continu



Type de puissance	Electrique	Electrique	Mécanique
Formes possibles	Triphasé Monophasé Continu	Triphasé Monophasé Continu	Rotation Translation

De la production à l'application : efficacité globale



Objectif : réaliser des systèmes performants à un prix acceptable

Objectif : minimiser les pertes d'énergie (économie des ressources)

► Les CEP permettent de maximiser les rendements des machines

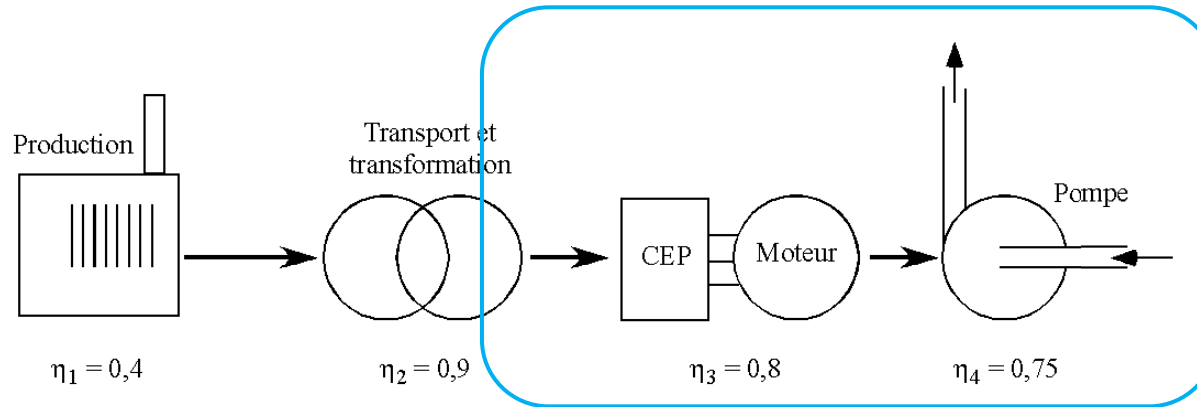
Les systèmes d'entraînements électriques (SEE)

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : Approche énergétique et schéma synoptique

Positionnement de SY03



SEE
(SY03)

SY03 : étude du système d'entraînement électrique

- Application (besoin mécanique)
- Entraînement de l'application : machine électrique + transmission
- Alimentation de la machine : réseau/système de stockage d'énergie + CEP
 - Rappel : CEP = Convertisseur Electronique de Puissance

Définition

- Les SEE assurent la conversion de l'énergie électrique d'une source en énergie mécanique nécessaire à une application.

Grandeurs mécaniques

- **Vitesse (m/s)** : variation de position par rapport à une variation de temps.
- **Force (N)** : interaction entre deux objets ou systèmes. Action mécanique capable d'imposer une accélération induisant la modification du vecteur vitesse.
- **Vitesse de rotation Ω (rad/s)** : variation d'angle par rapport au temps.
- **Couple (N.m)** : effort en rotation appliqué à un axe.

Définition

- Les SEE assurent la conversion de l'énergie électrique d'une source en énergie mécanique nécessaire à une application.

Grandeurs électriques

- **Courant (A)** : flux de charges électriques au travers d'une surface (*ex : section d'un fil électrique*)
- **Tension (V)** : différence de potentiels électriques, susceptible de provoquer le mouvement de charges électriques d'un potentiel vers l'autre.
- Courant et tension sont souvent (*pas toujours !*) liés par la loi d'Ohm :

tension = resistance × courant

$$U = R \times I$$

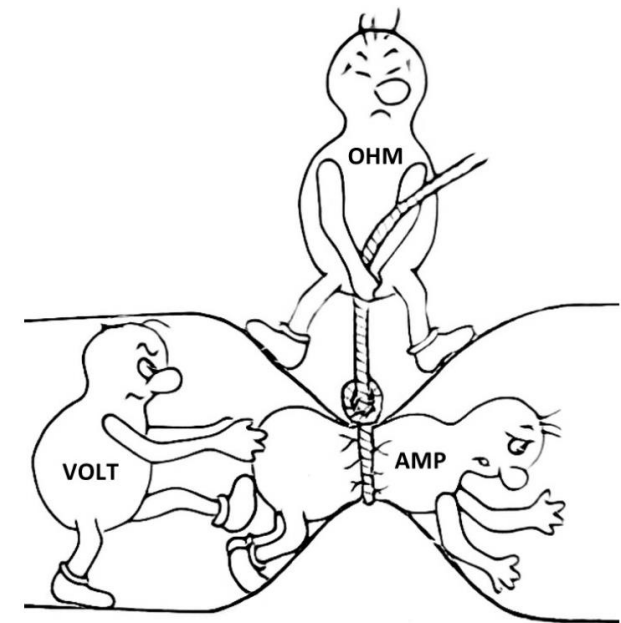


Illustration de la loi d'Ohm

Flux d'énergies : exemple d'un véhicule 100% électrique

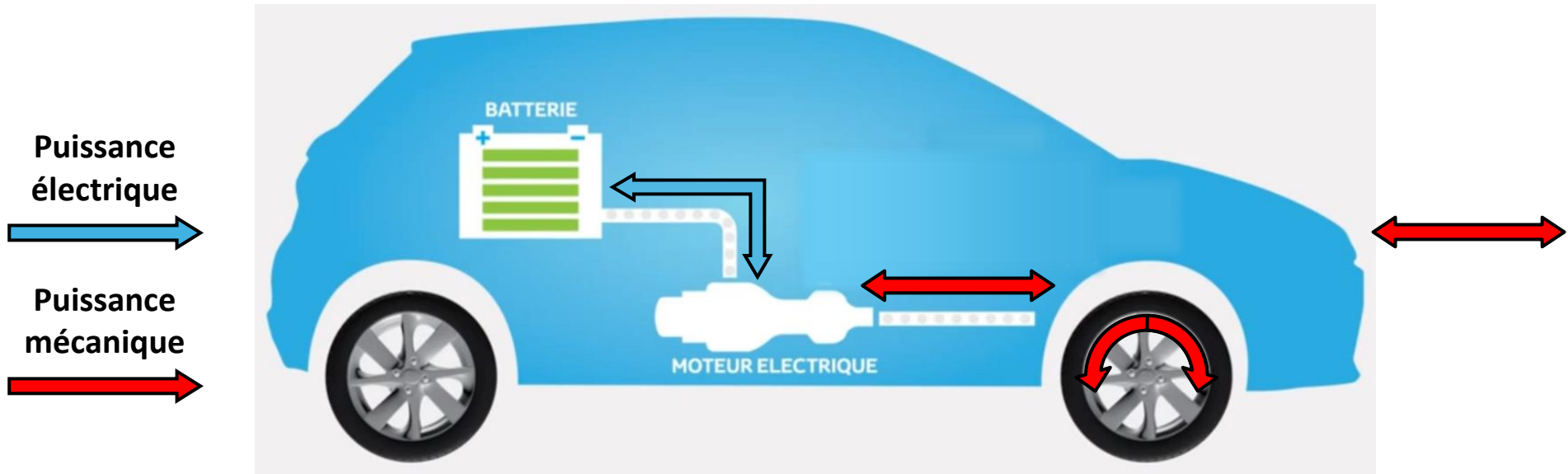
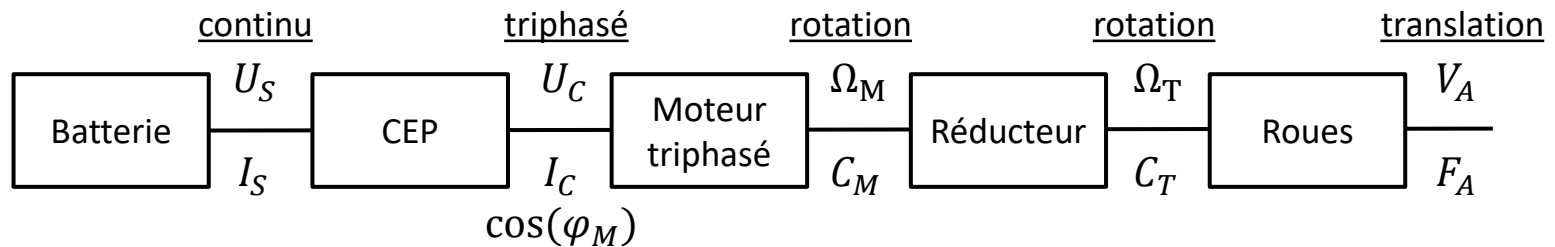


Schéma de véhicule hybride par Toyota

Schéma synoptique utilisé en SY03



Autres exemples de SEE

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : Approche énergétique et schéma synoptique



- ▶ Translation + rotation : 2 moteurs minimum
- ▶ Levage des palettes : 1 moteur minimum (2 en réalité)
- ▶ Accélérations/décélérations rapides : besoin d'un CEP
- ▶ Autonome en énergie : stockage interne



- ▶ Traction : 1 moteur
- ▶ Accessoires : des dizaines de moteurs (vitres, ABS, ventilation...)
- ▶ Vitesse très variable : besoin d'un CEP
- ▶ Autonome en énergie : batterie de 22 kWh, puis 41 kWh



- ▶ Structure articulées : nombreux moteurs pilotés de manière coordonnée
- ▶ Vitesse très variable : besoin d'un CEP
- ▶ Autonome en énergie : stockage interne



- ▶ Vitesse lente mais fort couple (terrains pentus)
- ▶ Alimentation de nombreux accessoires liés à la culture
- ▶ Pas de gaz d'échappement près des vignes
- ▶ Batteries utiles pour stabiliser l'engin

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : Approche énergétique et schéma synoptique

Dimensionnement d'un SEE en SY03

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

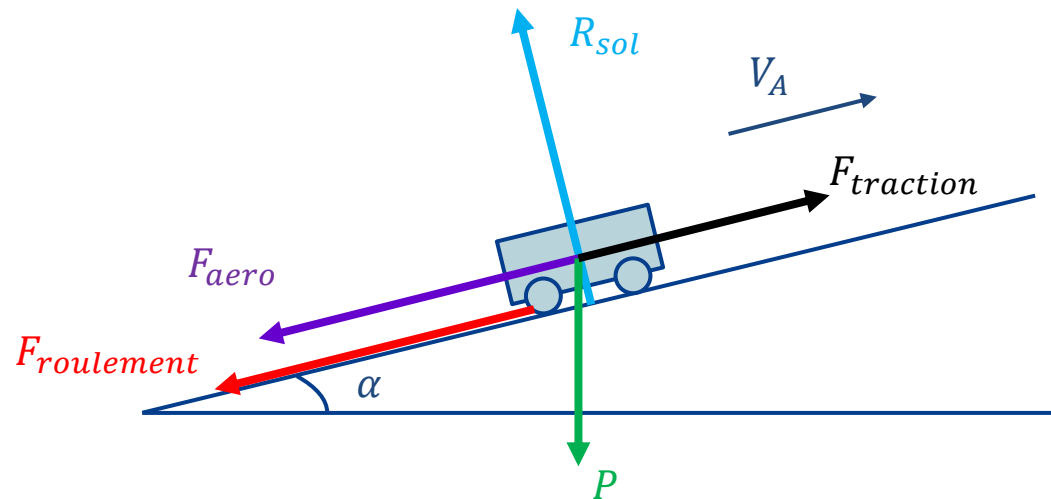
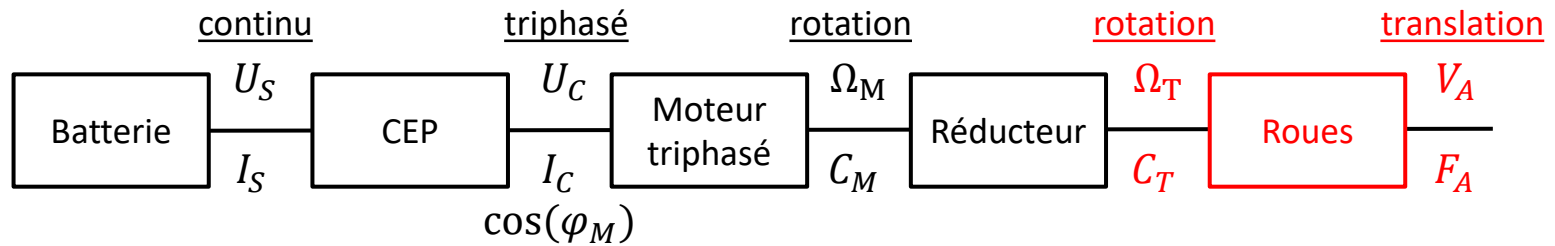
www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : Approche énergétique et schéma synoptique

1) Calcul du besoin mécanique

- Détermination des évolutions des vitesses V_A et des forces F_A en usage

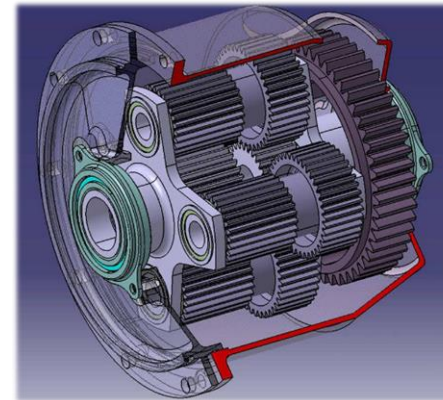
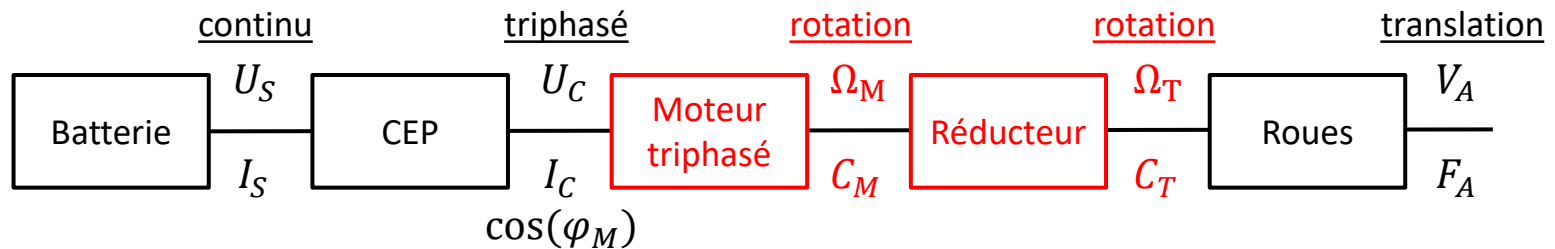
1^{ère} séance



2) Machine électrique et transmission

- Sélection d'une machine électrique grâce aux puissances
- Choix de la transmission permettant d'adapter les vitesses

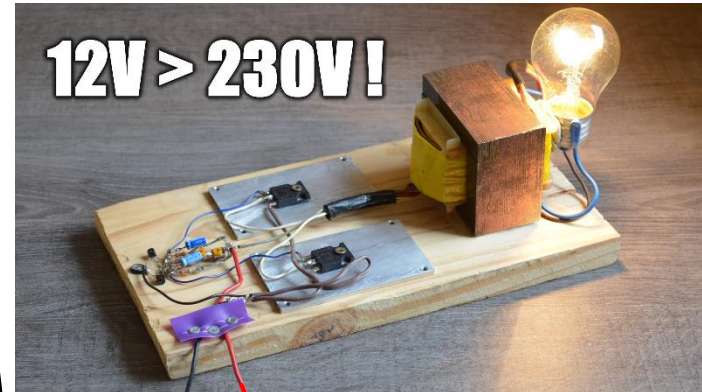
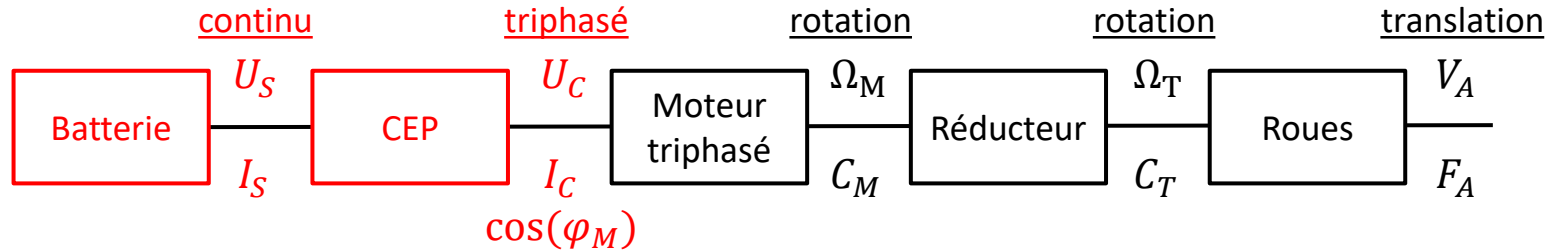
2^{ème} séance



3) Source d'énergie électrique et CEP

3^{ème} séance

- Sélection d'une source d'énergie en fonction :
 - De la tension, du courant et de la puissance nécessaires pour le moteur
 - Application stationnaire ou embarquée ? Quelle autonomie ? Quelle durée de vie ?
 - Des types de CEP existants
- Sélection du convertisseur électronique de puissance



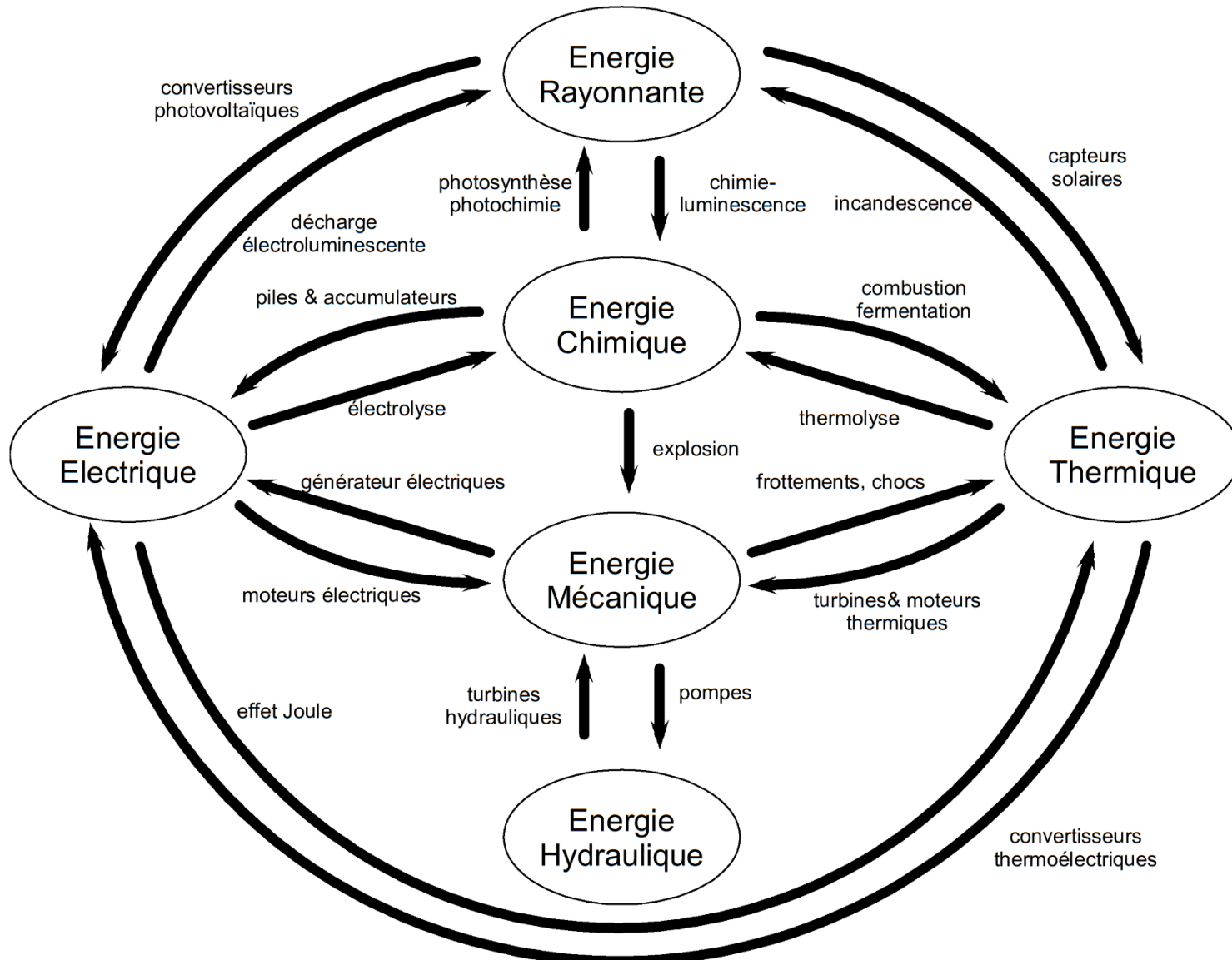
Transferts d'énergies

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : Approche énergétique et schéma synoptique

Energie : grandeur caractérisant la capacité d'un système à produire du travail, de la chaleur ou à émettre un rayonnement.



Expressions usuelles de l'énergie

Type	Energie	Energie potentielle	Energie cinétique
Mécanique en translation	$F \cdot x$	$M \cdot g \cdot h$	$\frac{1}{2} M \cdot V^2$
Mécanique en rotation	$C \cdot \theta$		$\frac{1}{2} J \cdot \Omega^2$
Electrique	$U \cdot Q$	$\frac{1}{2} C \cdot U^2$	$\frac{1}{2} L \cdot I^2$
Magnétique	$\lambda \cdot \phi$ (force magnétomotrice.flux)		
Hydraulique	$P \cdot V$ (pression . volume)		

Unités d'énergie

- Joule J : unité du système international (SI)
 - $1J = 1W \times 1s$
- Kilowatt-heure kWh : beaucoup utilisé en électricité
 - $1 kWh = 1000 W \times 1 h = 1000 W \times 3600 s = 3,6 MJ$

Exemple d'une batterie de 300 V et de capacité 140 Ah

- Peut fournir 140 A sous 300 V pendant 1h
- Alors $E = 140A \times 300V \times 1h = 42000 Wh = 42 kWh = 151,2 \cdot 10^6 J = 151 MJ$

Energies cinétique et potentielle de pesanteur

- Une voiture d'1 tonne qui percute un mur à 60 km/h
- Alors $E = \frac{1}{2} \times 1000 \times \left(\frac{60}{3,6}\right)^2 = 139 kJ$
- Soit l'équivalent d'une chute de 14,2 m : $Mgh = 1000 \times 9,81 \times 14,2 = 139 kJ$

Transferts de puissances

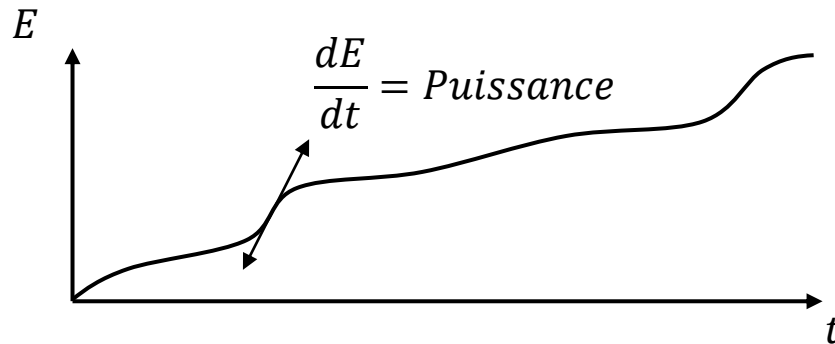
Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : Approche énergétique et schéma synoptique

Définition

- Variation d'énergie par rapport au temps



Exemple

- Pour lever 3 kg sur 50 cm, il faut un travail de :
- $W = Mgh = 3 \times 9,81 \times 0,5 = 14,7 \text{ J}$
- Pour le faire en 2 secondes, il faut développer $P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = 7,35 \text{ W}$ en moyenne.
- Pour le faire en 0,2 secondes, il faut 10 fois plus de puissance.
- Limitations en puissance ? En force ? Les deux ?



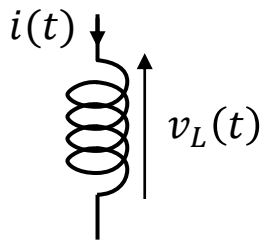
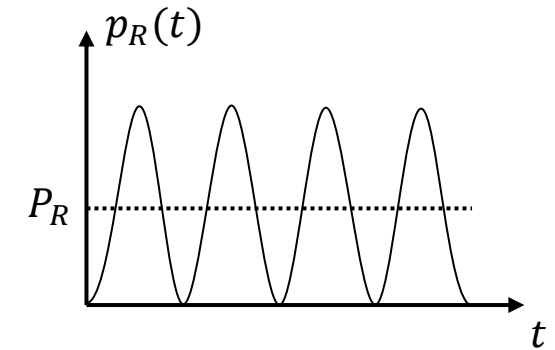
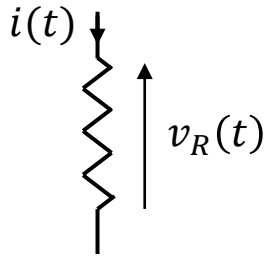
Expressions de la puissance

- En physique, la puissance est le produit d'un « effort » par un « flux ».

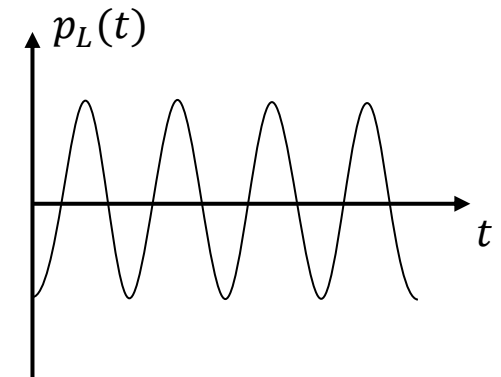
	Effort	Flux	Puissance
Mécanique (translation)	Force F (N)	Vitesse V (m/s)	F.V
Mécanique (rotation)	Couple C (N.m)	Vitesse angulaire Ω (rd/s)	C. Ω
Hydraulique	Pression P (N/m ²)	Débit Q (m ³ /s)	P.Q
Electrique (continu)	Tension U (V)	Courant I (A)	U.I
Electrique (alternatif monophasé)	Tension U (V)	Courant I (A)	U.I.cos(φ)
Electrique (alternatif triphase)	Tension entre phases U (V)	Courant dans une phase I (A)	$\sqrt{3}.U.I.cos(\varphi)$

Puissance avec un courant alternatif $i(t) = I_{cr} \times \sin(\omega t)$

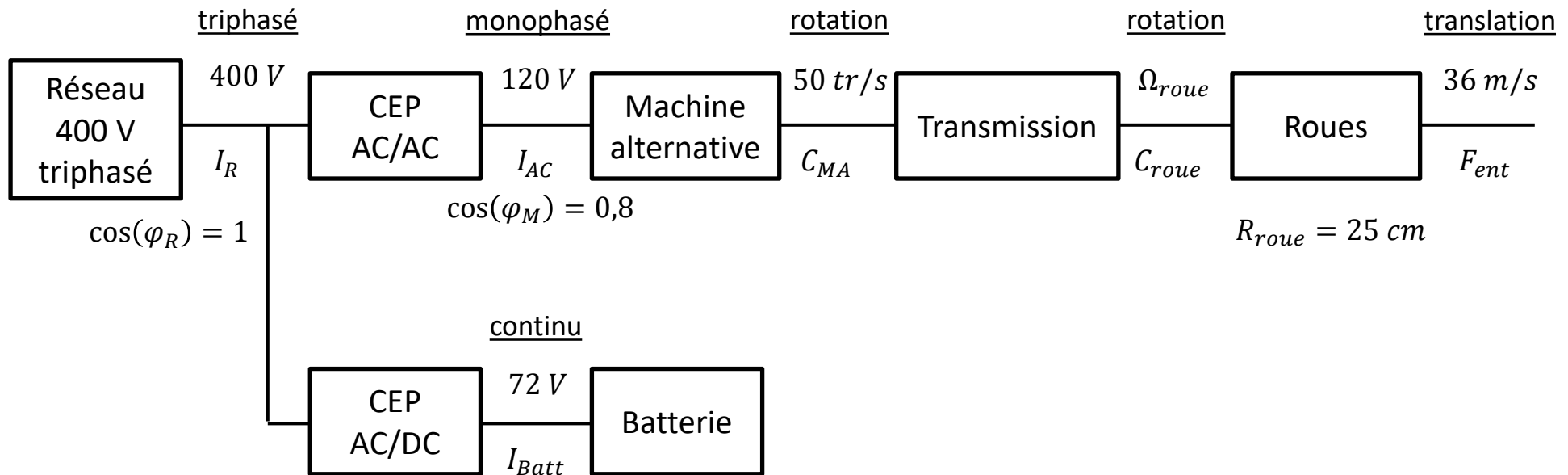
- Puissance instantanée dans une résistance : $p_R(t) = i(t) \times v_R(t)$
- $p_R(t) = R \times i(t)^2$
- $p_R(t) = R \times I_{cr}^2 \times \sin^2(\omega t)$
- $p_R(t) = R \times I_{cr}^2 \times \frac{1 - \cos(2\omega t)}{2}$
- $P_R = \frac{R \times I_{cr}^2}{2} = R \times I_{eff}^2$ (*notion de courant « efficace »*)
- $P_R = U_{eff} \times I_{eff}$ (*notion de tension « efficace »*)



- Puissance instantanée dans une inductance : $p_L(t) = i(t) \times v_L(t)$
- $p_L(t) = i(t) \times v(t) = i(t) \times L \times \frac{di(t)}{dt}$
- $p_L(t) = I_{cr} \times \sin(\omega t) \times L \times I_{cr} \times \omega \times \cos(\omega t)$
- $p_L(t) = L\omega \times I_{cr}^2 \times \frac{\sin(2\omega t)}{2}$
- $P_L = U_{eff} \times I_{eff} \times \cos(\varphi_{bobine}) = 0$



Utilisation de la notion de puissance dans un système



- Soit $F_{ent} = 6\text{ kN}$ et une batterie qui se charge à 20 kW .
- Quel courant pris sur le réseau par ces deux systèmes ?
- Courant consommé par la batterie ?
- Comment obtenir le couple fourni par la machine et le courant qu'elle consomme ?

Premier principe de la thermodynamique

- Au cours d'une transformation quelconque d'un système fermé, la variation de son énergie est égale à la quantité d'énergie échangée avec le milieu extérieur, par transfert thermique (chaleur) et transfert mécanique (travail).
- La quantité d'énergie transformée peut l'être dans plusieurs types que nous pourrions séparer en **énergie utile** et **énergie inutilisable** (souvent chaleur).

En SY03

- Globalement, une transformation d'énergie électrique en énergie mécanique, avec essentiellement des pertes sous forme de chaleur.
- On définit alors la **notion du rendement** :

$$\eta = \frac{\text{Energie utile}}{\text{Energie fournie}} \leq 1$$

- S'il n'y a pas d'énergie stockée, alors on peut transcrire ceci en puissances :

$$\eta \approx \frac{\text{Puissance utile}}{\text{Puissance fournie}} \leq 1$$

- Une transformation parfaite correspond à un rendement de 1

Risques liés à la dissipation de chaleur

- Une température trop haute peut dégrader les composants (déformation, destruction, pertes de performances)
- Un mauvais rendement peut entraîner de gros problèmes d'évacuation des pertes (intégration du refroidisseur ?)

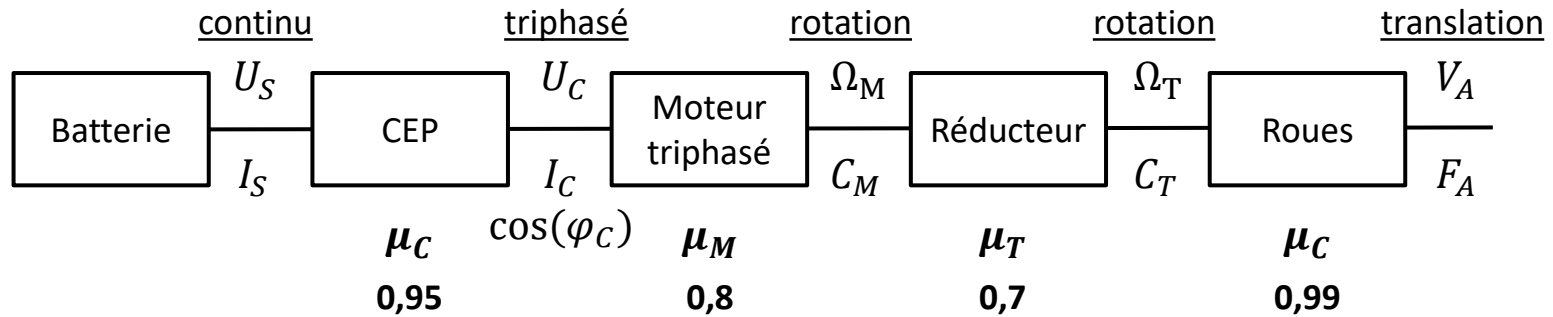
Quelques valeurs typiques de rendements

Système	Rendement typique
Transmission mécanique	0,6 à 0,98
Moteur électrique	0,8 à 0,98
CEP	0,9 à 0,98
Source d'énergie	0,5 à 0,8 (batterie) 0,9 à 1 (réseau électrique)
Moteur à explosion	0,25 à 0,35
Turbine à gaz	0,2 à 0,4
Centrale thermique	0,4



Un refroidisseur de processeur
un peu trop imposant

Schéma synoptique avec rendements



- $P_S = U_S \times I_S$ (puissance électrique en continu)
- $P_C = \sqrt{3} \times U_C \times I_C \times \cos(\varphi_C)$ (puissance électrique en triphase) (Typique : $\cos(\varphi_C) : 0,7 \sim 0,9$)
- $P_M = \Omega_M \times C_M$ (puissance mécanique en rotation)
- $P_T = \Omega_T \times C_T$ (puissance mécanique en rotation)
- $P_A = V_A \times F_A$ (puissance mécanique en translation)

Pendant la charge de la batterie...

- $P_R = U_R \times I_R \times \cos(\varphi_R)$ (électrique monophasé)
 - Souvent : $\cos(\varphi_R) \approx 1$
- $P_{ch} = U_{ch} \times I_{ch}$ (électrique continu)

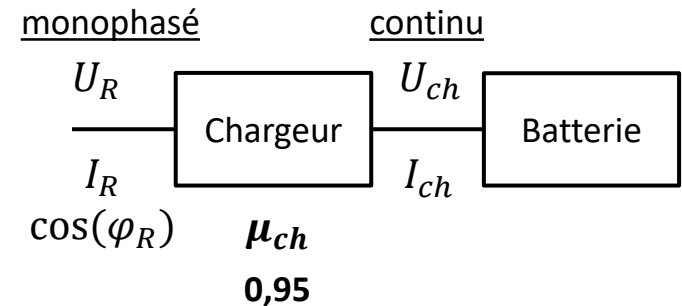
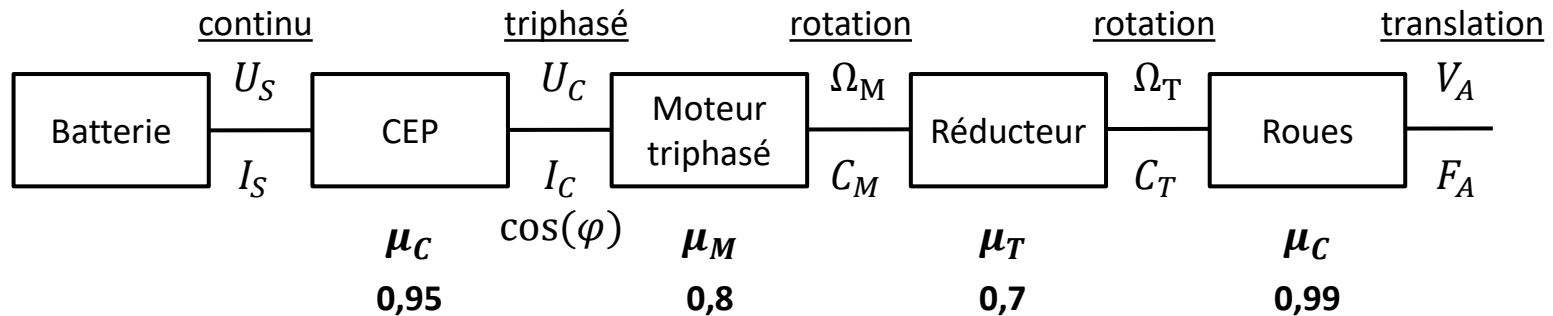


Schéma synoptique avec rendements (mode moteur)



/!\ Sens de transfert de l'énergie /!

$$\mu_C = \frac{P_C}{P_S} = \frac{\sqrt{3} U_C I_C \cos(\varphi_C)}{U_S \cdot I_S}$$

$$\mu_M = \frac{\Omega_M \cdot C_M}{P_C}$$

$$\mu_T = \frac{\Omega_T \cdot C_T}{\Omega_M \cdot C_M}$$

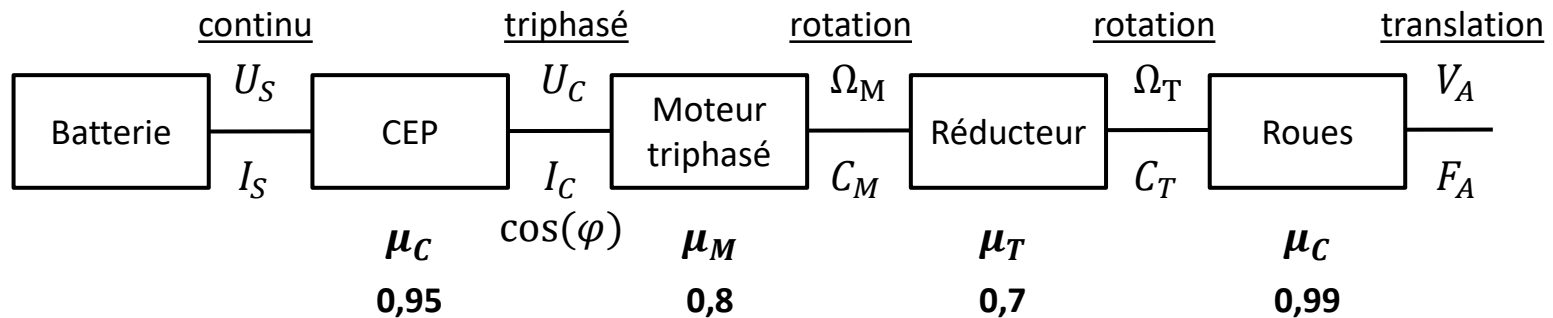
$$\mu_A = \frac{V_A \cdot F_A}{\Omega_T \cdot C_T}$$

Rendement global $P_A = \mu_C \mu_M \mu_T \mu_A P_S = 53\%$ de P_S

Possibilité de croiser les infos, exemple : $I_C = \frac{\Omega_M \cdot C_M}{\sqrt{3} U_C \cos(\varphi_C) \cdot \mu_M}$

Schéma synoptique avec rendements (mode générateur)

- Les pertes ont toujours lieu lors de la transformation de l'énergie



← ←
/!\ Sens de transfert de l'énergie /!\

$$\mu_C' = \frac{P_S}{P_C}$$

$$\mu_M' = \frac{P_C}{P_M}$$

$$\mu_T' = \frac{P_M}{P_T}$$

$$\mu_A' = \frac{P_T}{P_A}$$

Rendements « inversés » ! (toujours plus d'énergie fournie que d'énergie utile)

Le calcul de I_C devient : $I_C = \frac{\Omega_M \cdot C_M \cdot \mu_M'}{\sqrt{3} U_C \cos(\varphi_C)}$ (en mode moteur c'était : $I_C = \frac{\Omega_M \cdot C_M}{\sqrt{3} U_C \cos(\varphi_C) \cdot \mu_M}$)

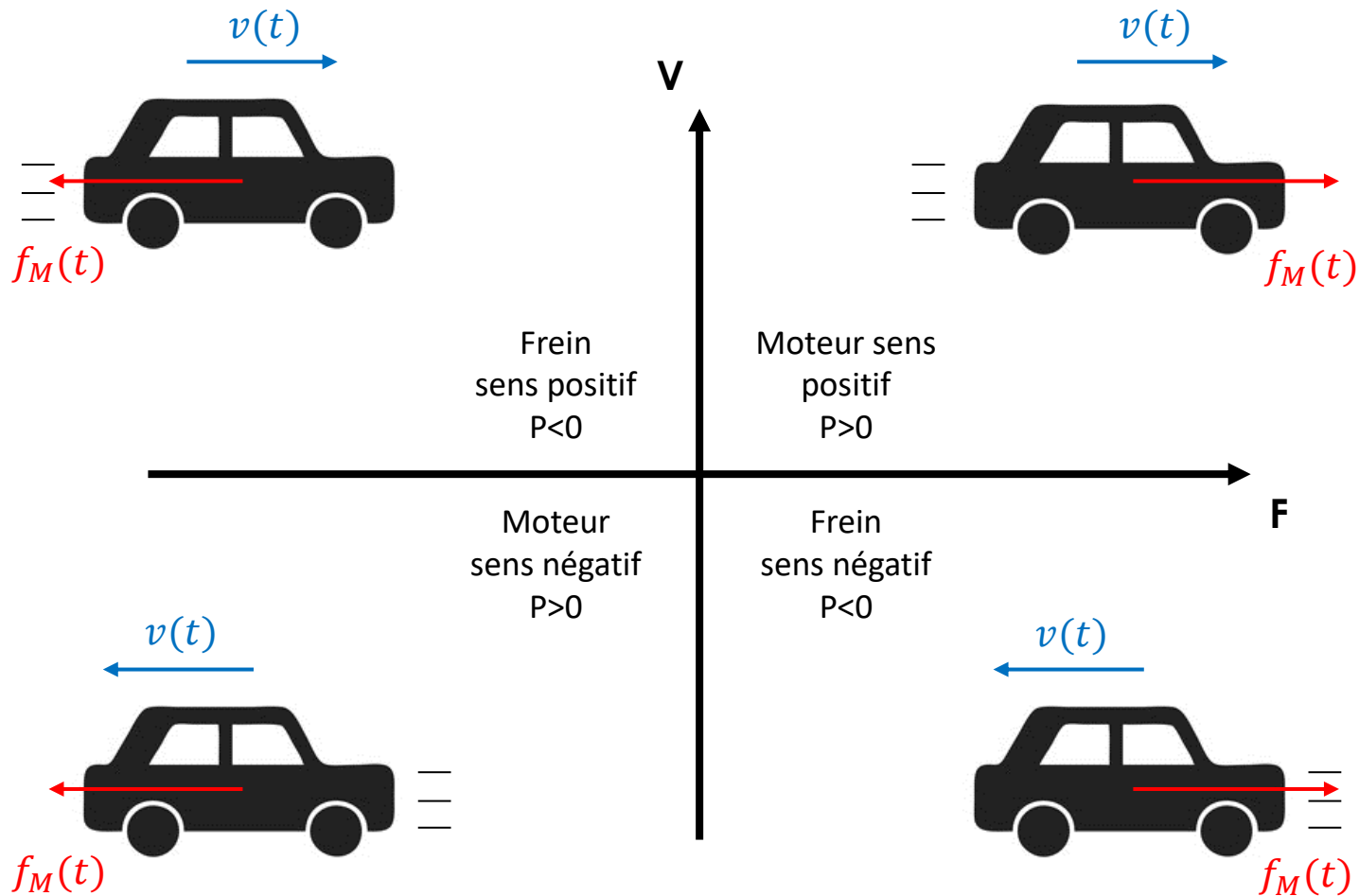
Domaines de fonctionnement

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : Approche énergétique et schéma synoptique

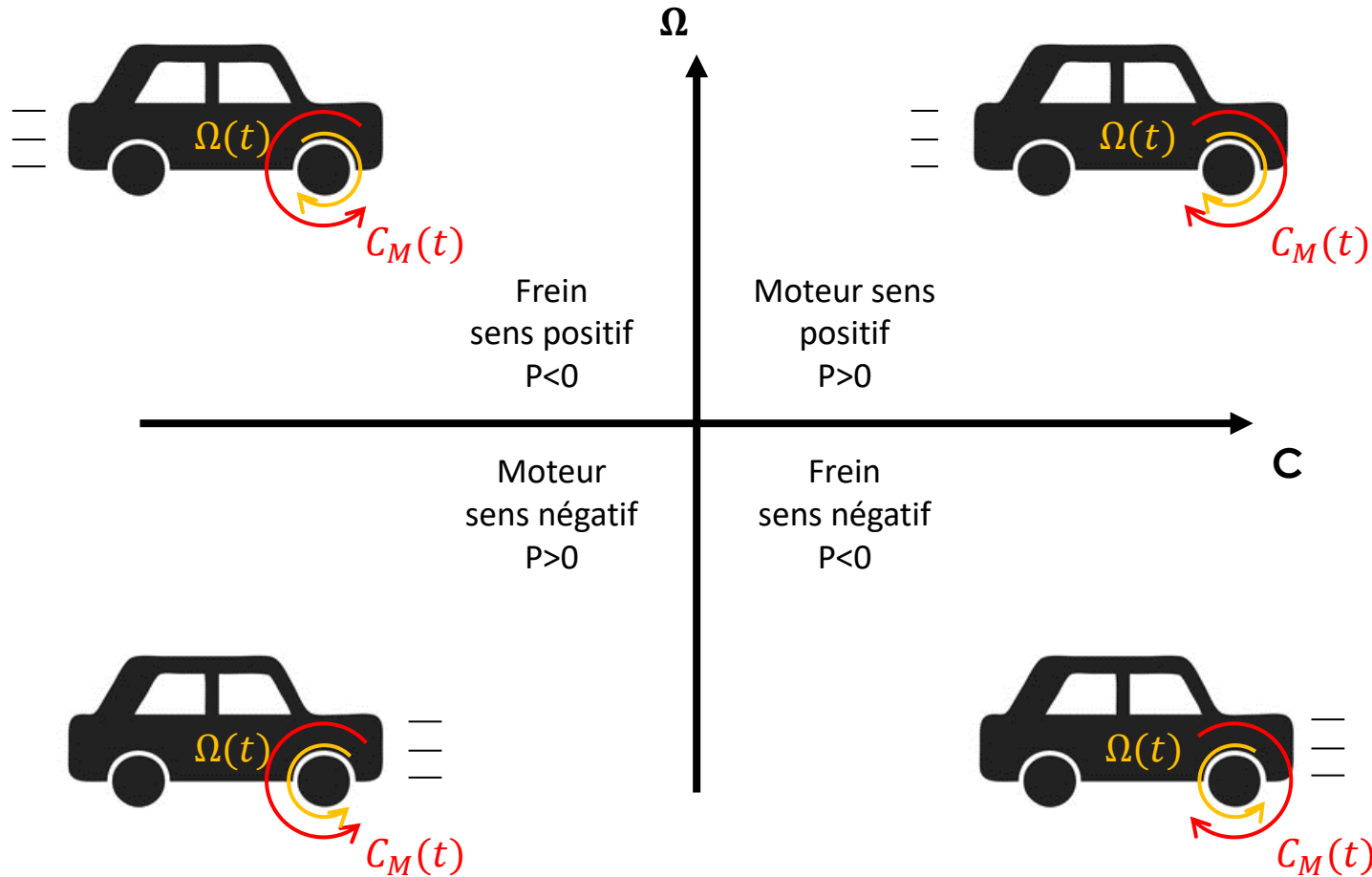
4 quadrants de fonctionnement (V-F)



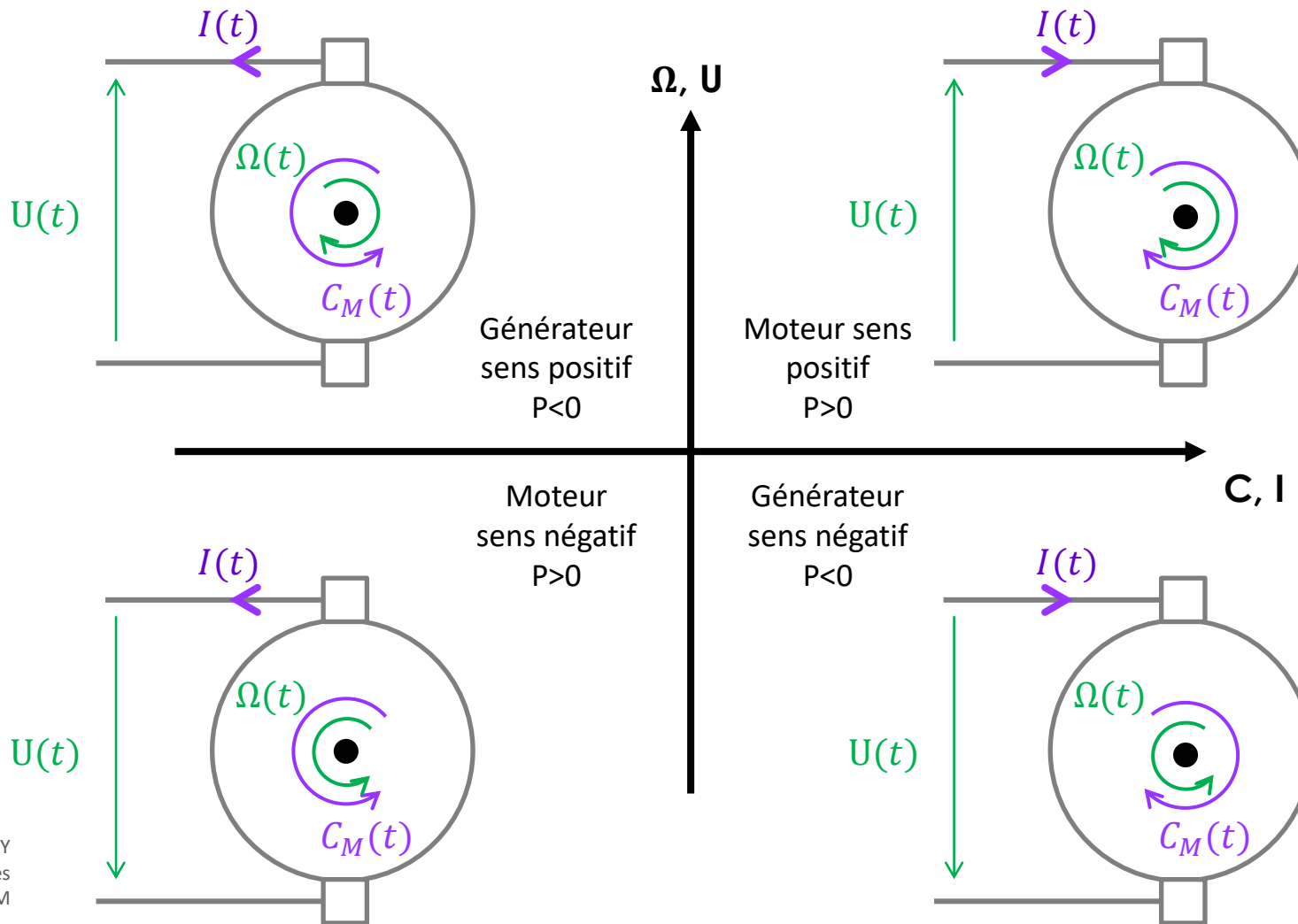
Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr

4 quadrants de fonctionnement (Ω -C)



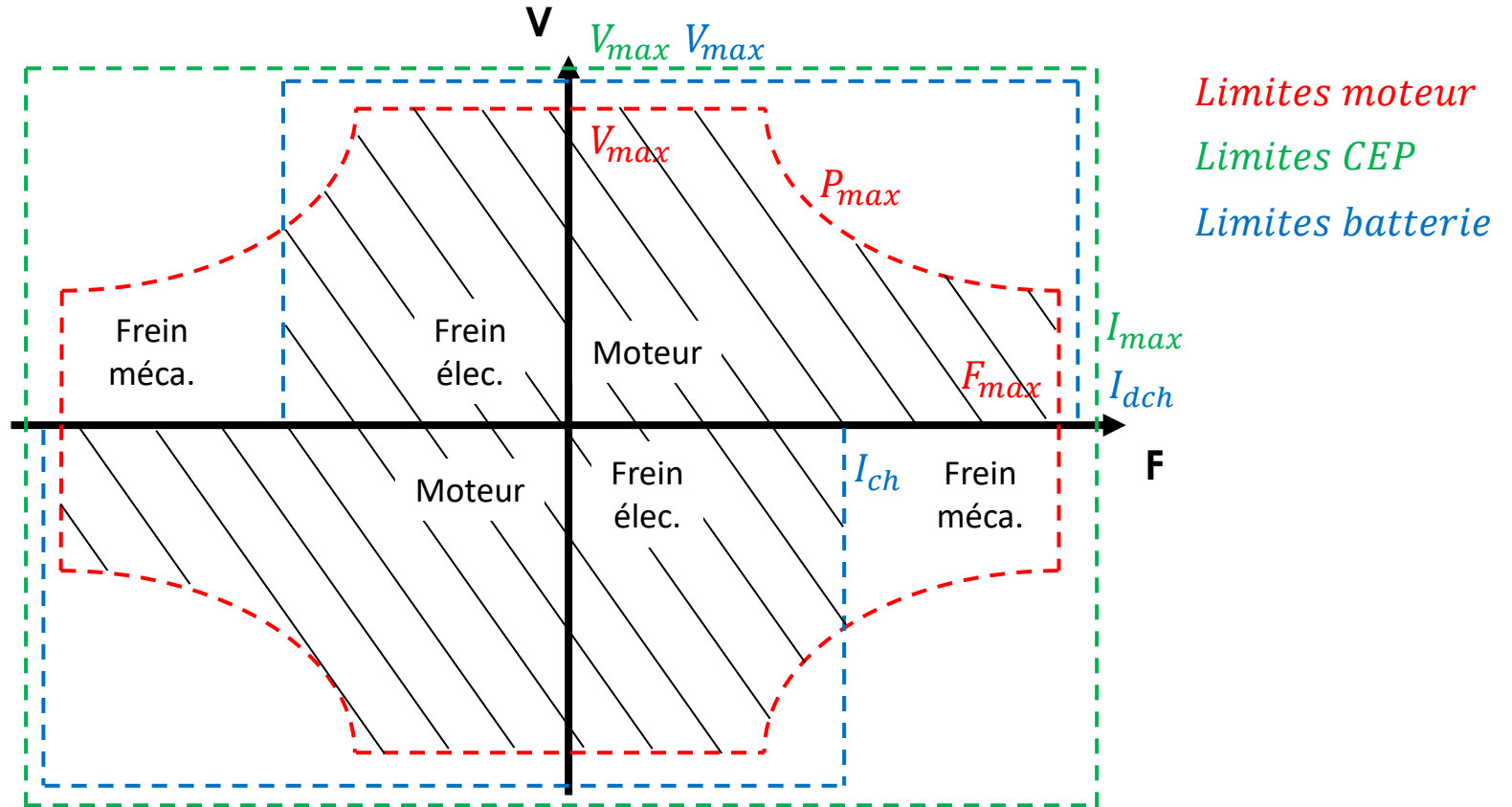
Machine à courant continu : 4 quadrants (Ω -C, U-I)



Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr

Limites de fonctionnement



Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr

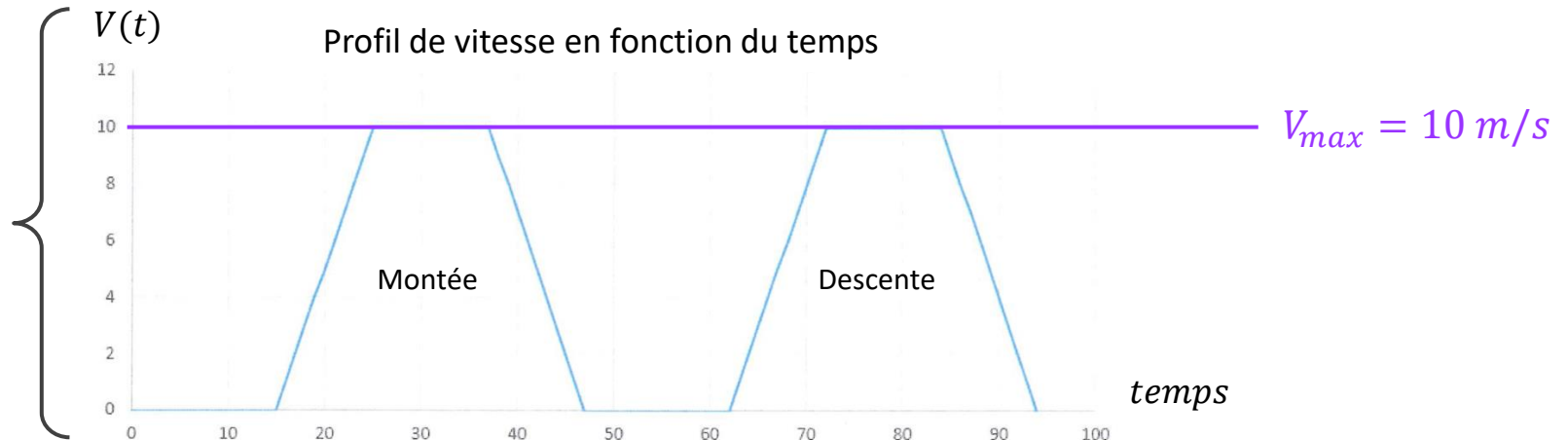
Exemples

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

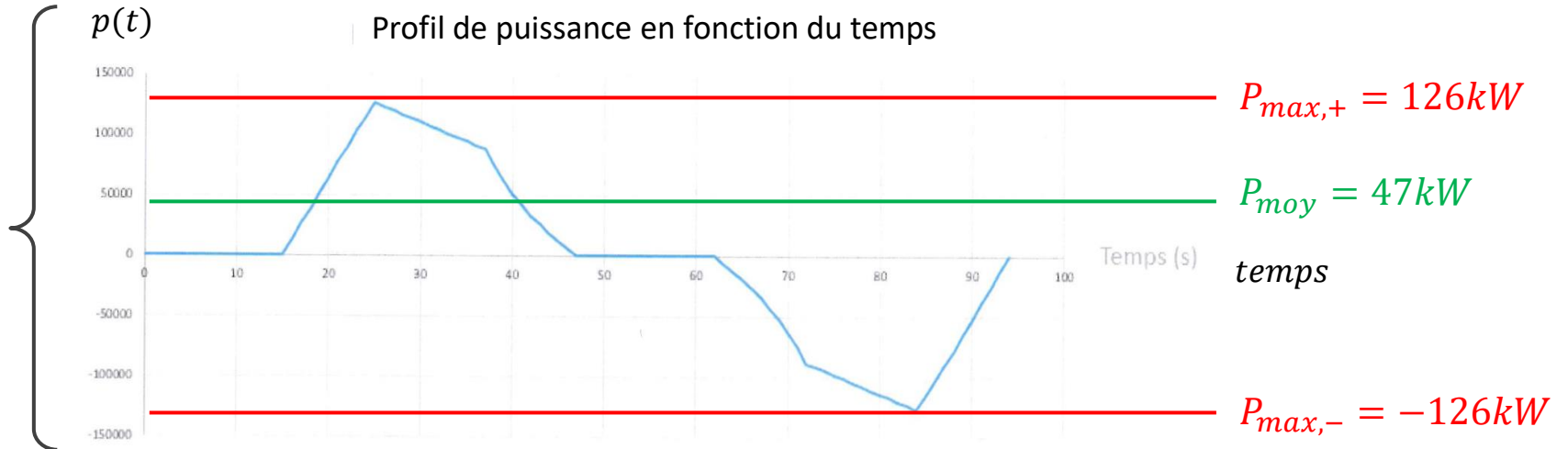
www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : Approche énergétique et schéma synoptique

Issu du cahier
des charges

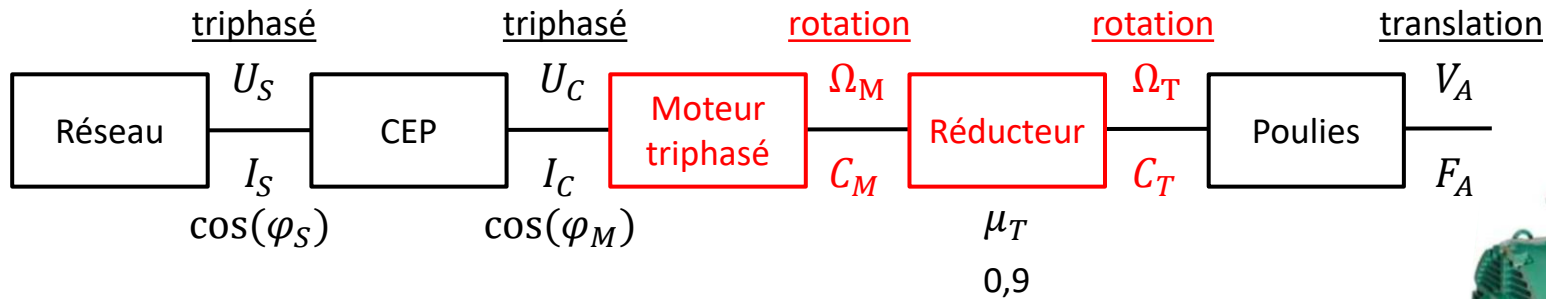


Issu des
calculs
mécaniques



Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr



Choix du moteur

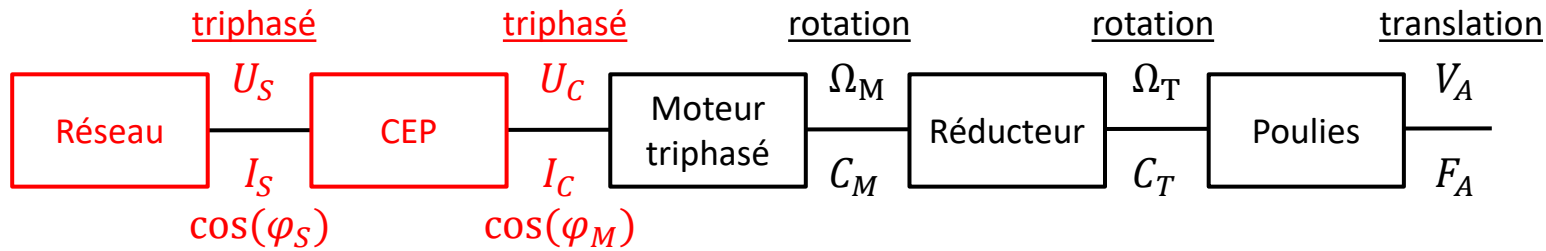
- Besoin : $P_{A,moy} = 47 \text{ kW}$ ► $P_{M,nom} = 47/0,9 = 52,2 \text{ kW}$
- Besoin : $P_{A,max} = 126 \text{ kW}$ ► $P_{M,max} = 126/0,9 = 140 \text{ kW}$
- Le PLS 200 LP de chez Leroy Sommer convient *a priori*

Choix du réducteur : CHMR110-7 de chez HPC

- Rapport de réduction de 7,5
- Vitesse max : 2800 tr/min
- Vérification des couples max
- Vérification de la vitesse max



Fabricant	Leroy Somer
Référence	PLS 200 LP
Puissance nom.	55 kW
Puissance max.	176 kW
Vitesse nom.	2950 tr/min
Couple nom.	178 Nm
Rendement	93,1 %
Tension	400 V triphasé
Courant nom.	96,9 A
Facteur de puissance	0,88



Choix de la source d'énergie électrique

- Réseau 400 V triphasé de 200 kVA (/!\ coût installation)

Choix du convertisseur électronique de puissance

- Besoin de 56 kW en nominal et 150 kW à puissance maximum
- Variateur de fréquence triphasé : VRF-092T4B-90K0
- $P_{nom} = 90 \text{ kW} \Rightarrow \text{OK}$
- Surcharge : 150% soit 135 kW (1 min) ou 180% soit 162 kW (2 s)
- Phase d'accélération de 10 s à $\approx 150 \text{ kW} \Rightarrow a \text{ priori OK}$