



Conception Optimale Systémique des Composants des Chaînes de Traction Electriques

Victor Meşter

Laboratoire L2EP, EA2697
Ecole Centrale de Lille
Cité Scientifique - BP 48
F-59651 Villeneuve d'Ascq Cedex

Email: victor.mester@ec-lille.fr



METHODOLOGIE POUR LA CONCEPTION OPTIMALE SYSTEMIQUE

- 1. La nécessité d'une conception optimale systémique**
- 2. Orientation du modèle pour la conception**
- 3. Modèle de conception optimale systémique de la chaîne de traction d'un VE**

CONCEPTION D'UN COMPOSANT DANS UNE APPROCHE SYSTEMIQUE

- 4. Conception d'un moteur-roue par une approche systémique**
- 5. Dimensionnement par un modèle multi-physique détaillé**

CONCLUSIONS

METHODOLOGIE POUR LA CONCEPTION OPTIMALE SYSTEMIQUE

1. La nécessité d'une conception optimale systémique

2. Orientation du modèle pour la conception

3. Modèle de conception optimale systémique de la chaîne de traction d'un VE

CONCEPTION D'UN COMPOSANT DANS UNE APPROCHE SYSTEMIQUE

4. Conception d'un moteur-roue par une approche systémique

5. Dimensionnement par un modèle multi-physique détaillé

CONCLUSIONS

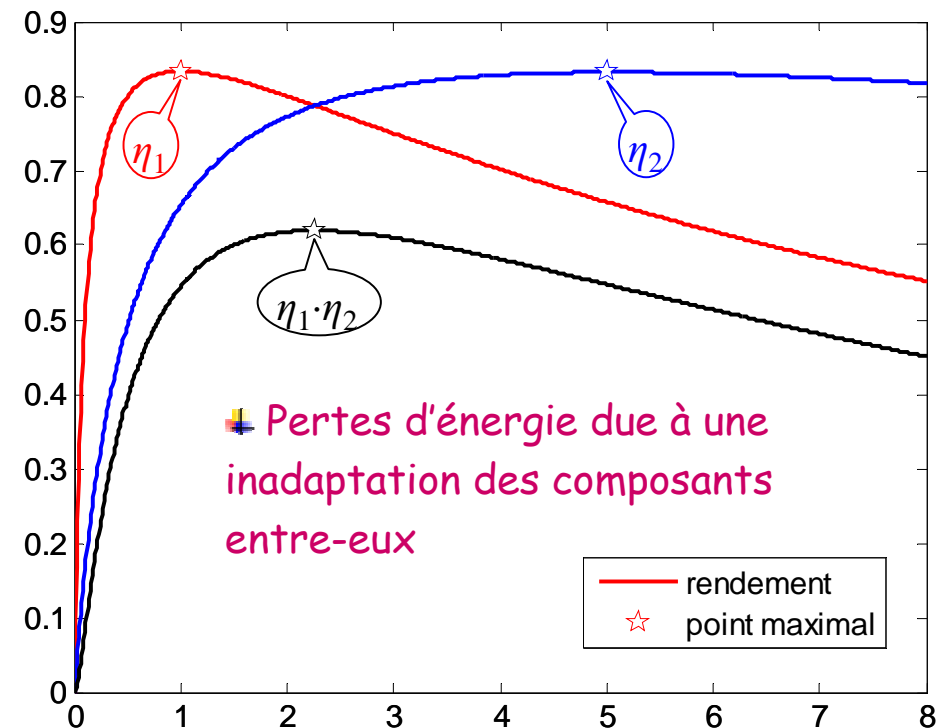
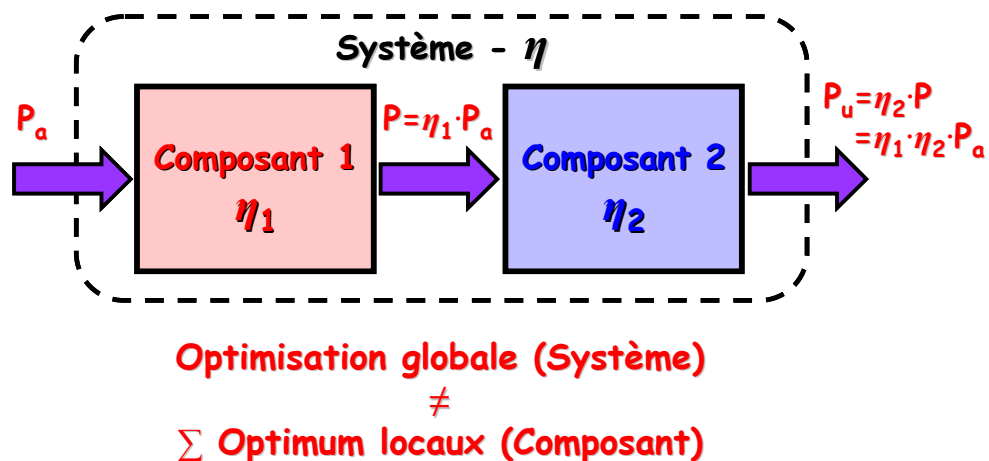
1. La nécessité d'une conception optimale systémique

- Pourquoi une conception *optimale* pour les VE

1. Critère énergétique : minimisation de la **consommation énergétique**
 - maximisation du rendement global
 - minimisation du poids total
2. Critère économique : minimisation du **prix** du véhicule

- Pourquoi une conception *systémique* pour les VE

1. Besoin d'optimalité du système entier
2. Fort couplage entre les composants



Conclusion : Il est indispensable d'optimiser les interactions entre les composants !

METHODOLOGIE POUR LA CONCEPTION OPTIMALE SYSTEMIQUE

1. La nécessité d'une conception optimale systémique

2. Orientation du modèle pour la conception

3. Modèle de conception optimale systémique de la chaîne de traction d'un VE

CONCEPTION D'UN COMPOSANT DANS UNE APPROCHE SYSTEMIQUE

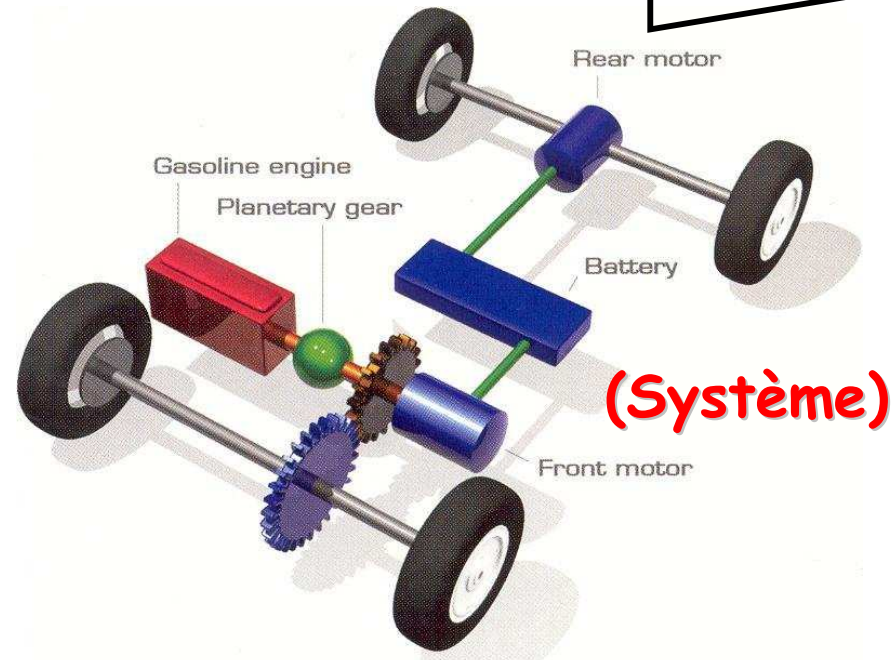
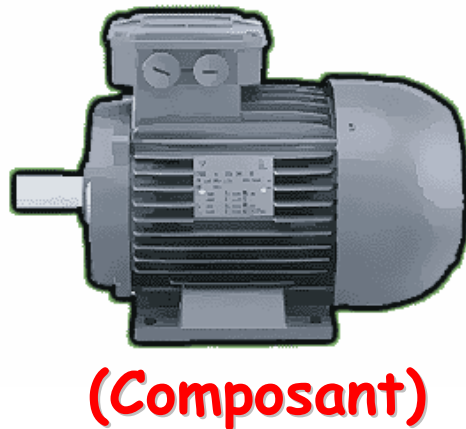
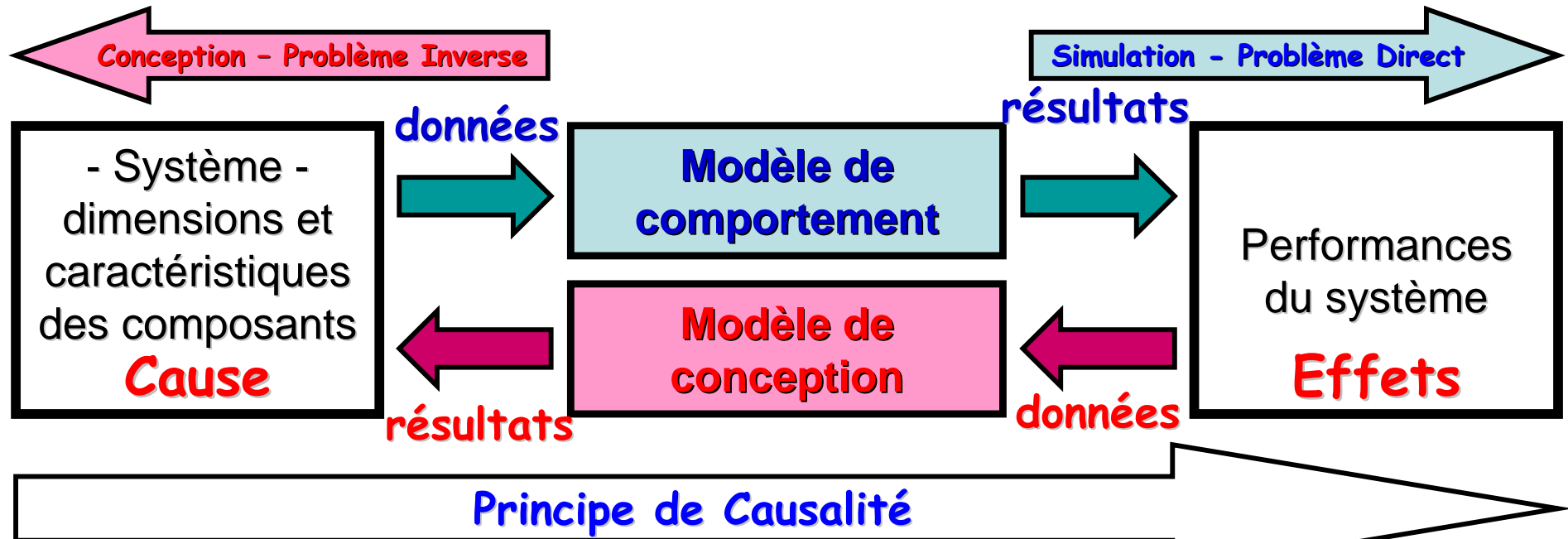
4. Conception d'un moteur-roue par une approche systémique

5. Dimensionnement par un modèle multi-physique détaillé

CONCLUSIONS

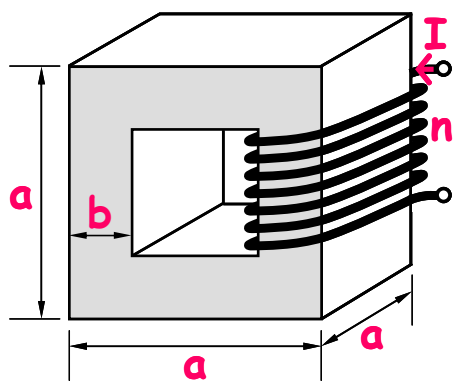
2. Orientation du modèle pour la conception

Deux modèles différents pour deux problèmes différents



2. Orientation du modèle pour la conception : Illustrations

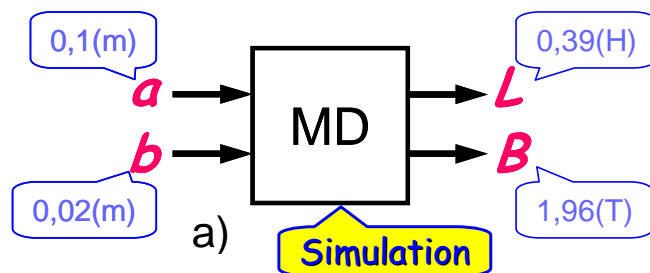
- Inductance :



✚ **Modèle Direct (MD) :**

$$L = \mu \cdot \frac{n^2}{4} \cdot \frac{a \cdot b}{a - b}$$

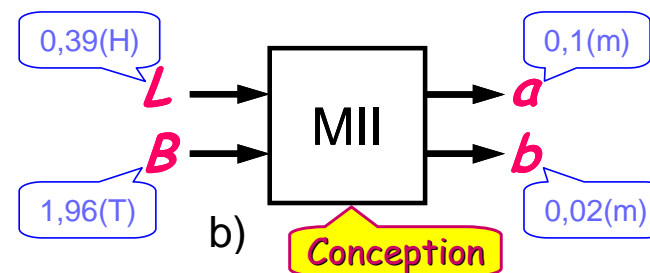
$$B = \frac{\mu \cdot n \cdot I}{4 \cdot (a - b)}$$



✚ **Modèle Inverse Idéal (MII) :**

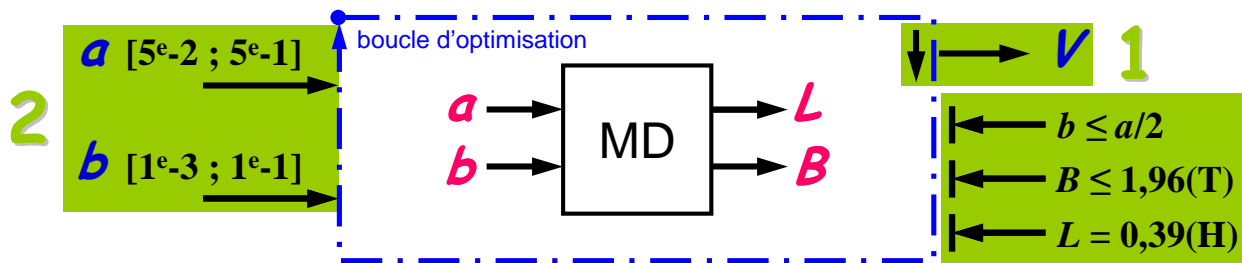
$$b = -\frac{\mu \cdot n \cdot I}{8 \cdot B} + \frac{1}{8 \cdot n \cdot B} \cdot \sqrt{\mu^2 \cdot n^4 \cdot I^2 + 64 \cdot L \cdot I \cdot B \cdot n}$$

$$a = \frac{\mu \cdot n \cdot I}{4 \cdot B} + b = \frac{\mu \cdot n \cdot I}{8 \cdot B} + \frac{1}{8 \cdot n \cdot B} \cdot \sqrt{\mu^2 \cdot n^4 \cdot I^2 + 64 \cdot L \cdot I \cdot B \cdot n}$$



- Conception optimale avec le *modèle direct* et le *modèle inverse idéal* :

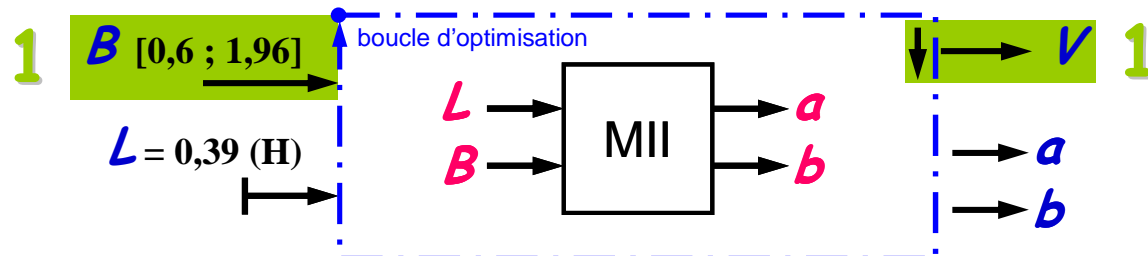
✚ Minimiser le volume du matériau magnétique ($V = a^3$) pour $L = 0,39\text{H}$ et $B < 1,96\text{T}$



L'optimisation :

- réalise l'inversion du MD;
- minimise le volume.

- 5 itérations et 19 évaluations !



✚ Même résultat optimal :

$V = 10^{-3}\text{m}^3$; $a = 0,1\text{m}$; $b = 0,019\text{m}$; $B = 1,96\text{T}$.

- modèle déjà inversé
- l'optimisation minimise seulement le volume

- 2 itérations et 6 évaluations !

Plus loin encore ?

Conclusion : Même pb., formulations différentes → même résultat, vitesses dif.

- Conception optimale idéale

✚ plus besoin d'optimisation car elle est remplacée par des équations qui fournissent la réponse recherchée

L'optimisation utilisée pour :

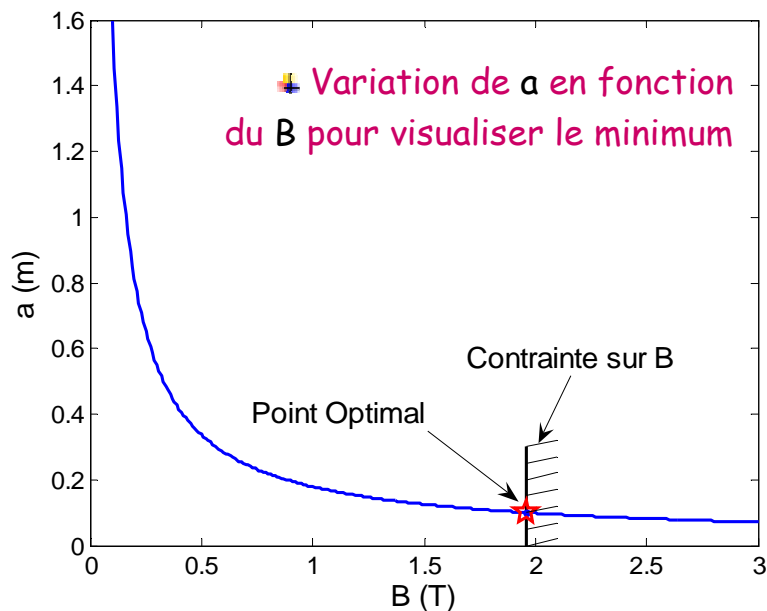
- inverser le modèle
- rechercher le point optimal

Plus besoin d'optimisation si :

- on dispose du modèle inverse idéal
- on résout algébriquement les conditions d'optimalité

✚ critère d'optimalité : $\frac{dV}{dB} = 0$ \Rightarrow
$$\frac{\mu \cdot n \cdot I}{8 \cdot B^2} + \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\frac{\mu^2 \cdot n^2 \cdot I^2}{64 \cdot B^2} + \frac{L \cdot I}{B \cdot n}}} \cdot \left(\frac{\mu^2 \cdot n^2 \cdot I^2}{32 \cdot B^3} + \frac{L \cdot I}{B^2 \cdot n} \right) = 0$$

>0 >0 $\Rightarrow B = \infty$



- B tend vers l'infini ou vers la contrainte supérieure

- plus besoin de l'optimisation
(pour B optimal MII fourni le dispositif optimal)

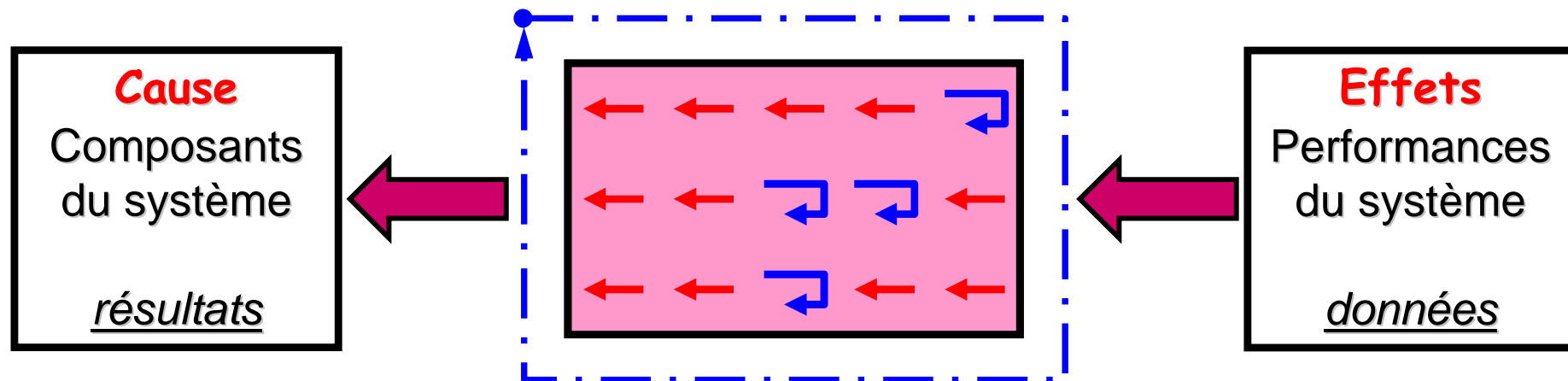
Conclusion : Il faut tendre vers la conception optimale idéale !

Plus le système est grand, plus l'orientation est importante !

Meilleure Approche pour la Conception (un compromis) :

1. Dans la mesure où il est **possible**, le problème est écrit dans le **sens de la conception**;
2. Si c'est **impossible**, une solution est obtenue grâce aux outils d'**optimisation**.

- ✚ Si tout peut être inversé : modèle idéal pour la conception
- ✚ Si rien ne peut être inversé : modèle de comportement à inverser entièrement



Conclusion : Cette approche utilise l'optimisation, seulement s'il n'existe pas d'autres solutions, ce qui simplifie fortement le processus de conception !

METHODOLOGIE POUR LA CONCEPTION OPTIMALE SYSTEMIQUE

1. La nécessité d'une conception optimale systémique

2. Orientation du modèle pour la conception

3. Modèle de conception optimale systémique de la chaîne de traction d'un VE

CONCEPTION D'UN COMPOSANT DANS UNE APPROCHE SYSTEMIQUE

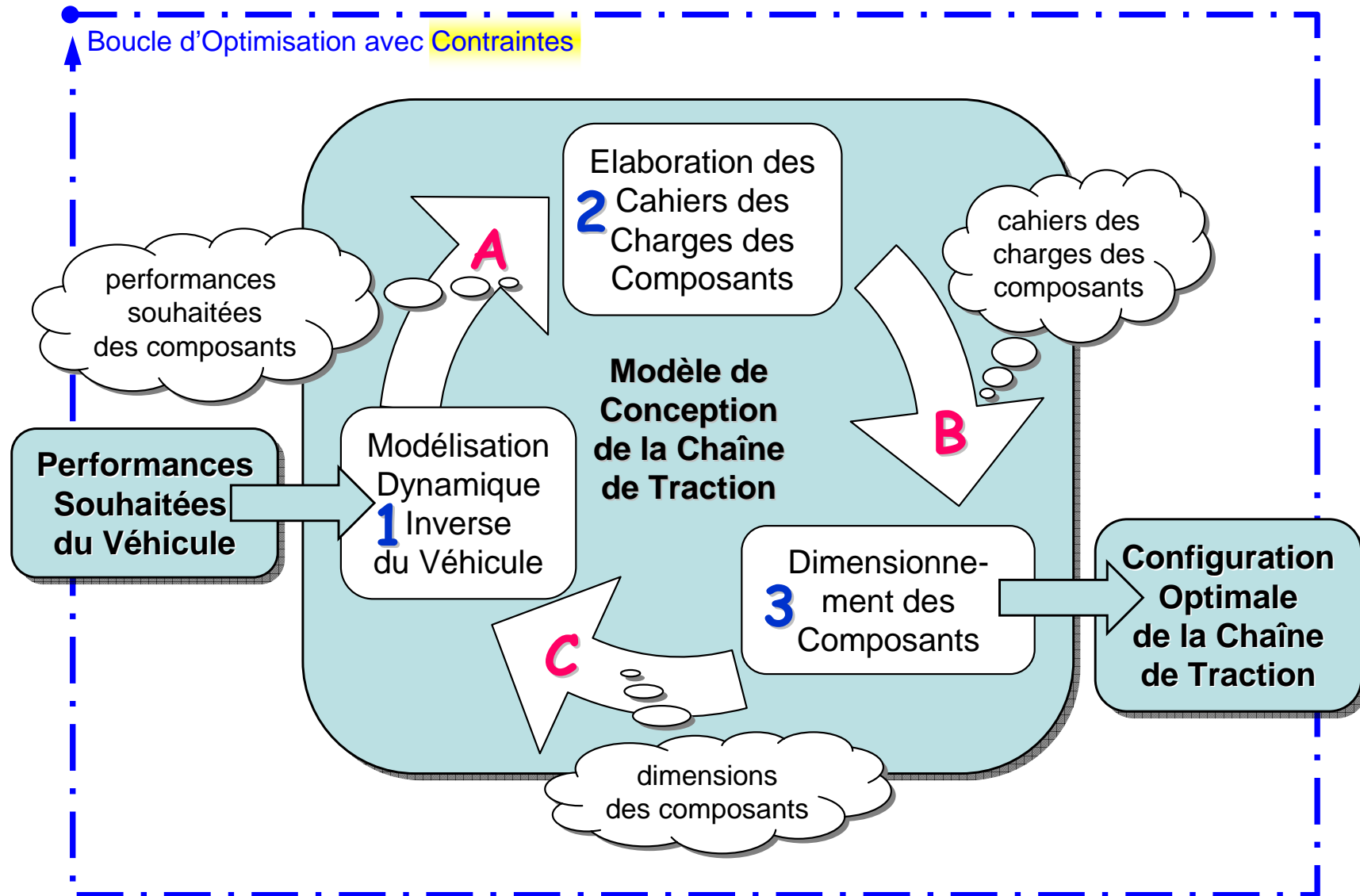
4. Conception d'un moteur-roue par une approche systémique

5. Dimensionnement par un modèle multi-physique détaillé

CONCLUSIONS

3. Modèle de conception optimale systémique de la chaîne de traction d'un VE

- La structure du modèle de conception optimale systémique

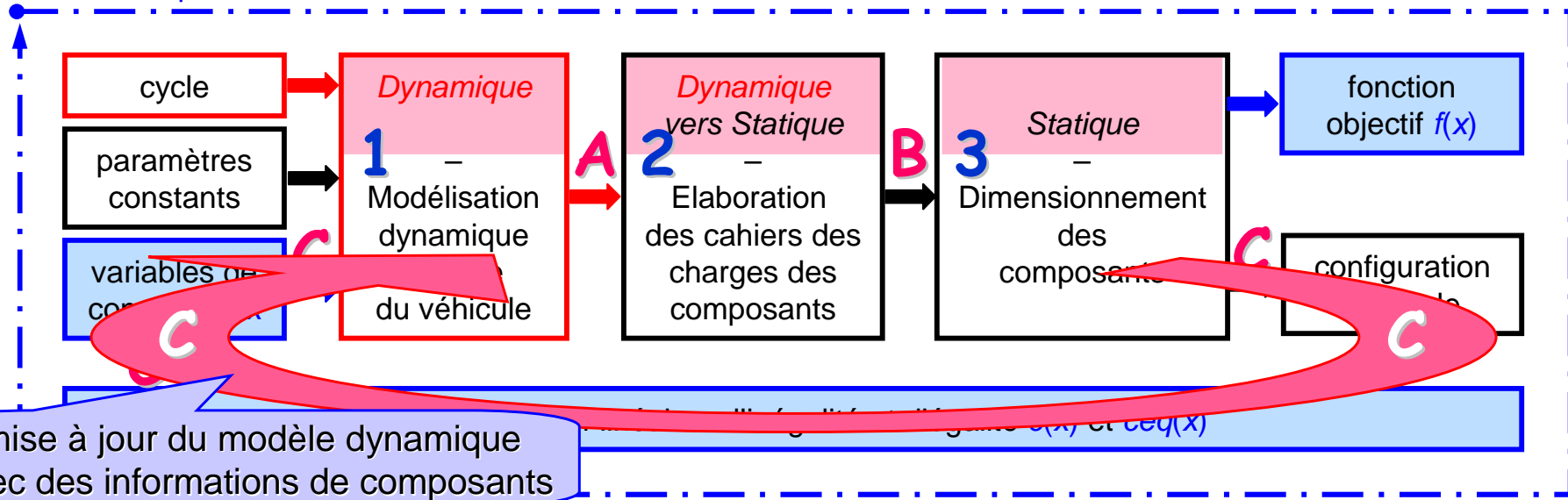


Conclusion : Conception Systémique Optimale

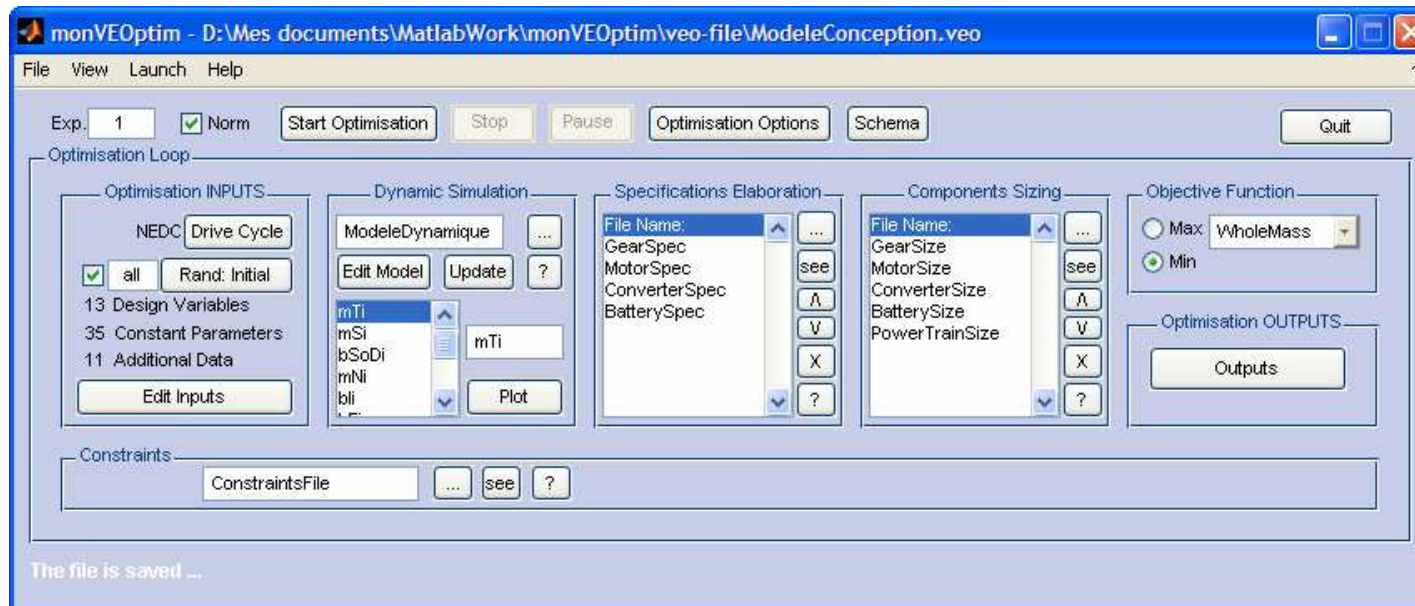
3. Modèle de conception optimale systémique de la chaîne de traction d'un VE

- Le processus de conception optimale systémique sous la forme d'un problème d'optimisation avec contraintes :

boucle d'optimisation avec contraintes



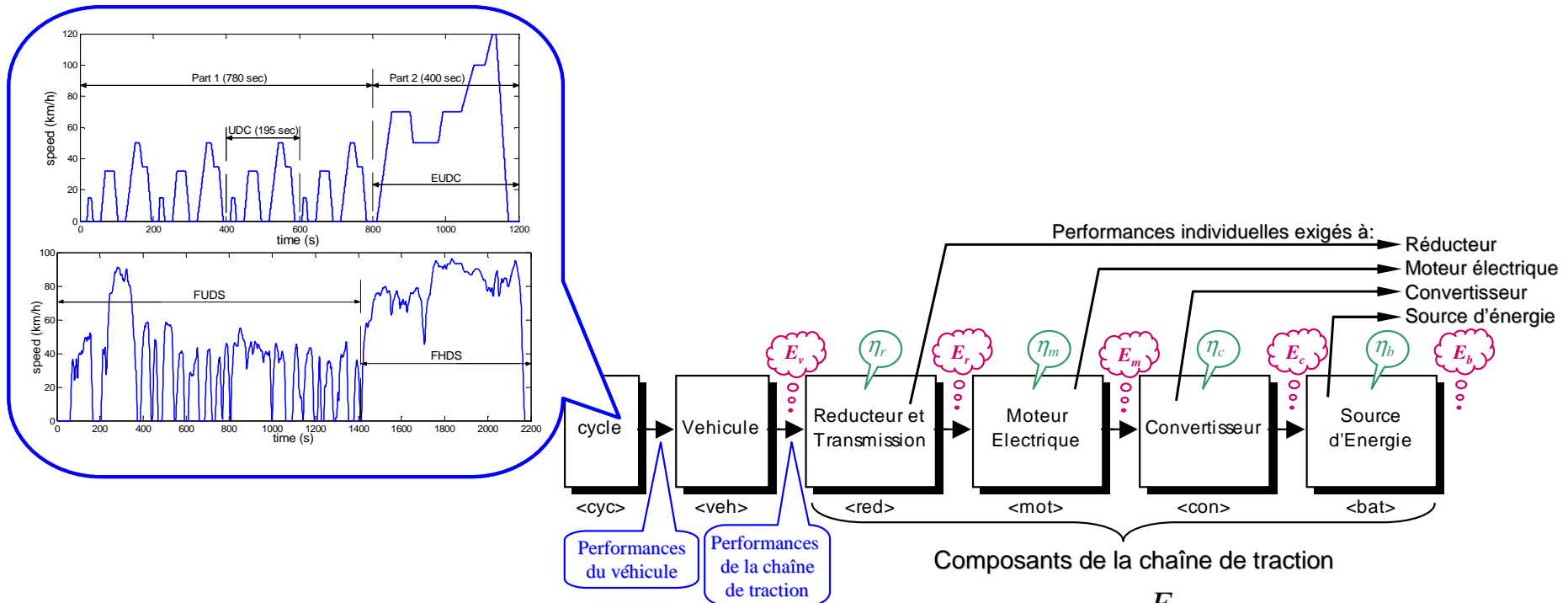
- Fenêtre principale du logiciel *monVEOptim*:



3. Modèle de conception optimale systémique de la chaîne de traction d'un VE

- *Modèle dynamique inverse de la chaîne de traction du VE*

✚ modèle énergétique, construit dans le sens de la conception

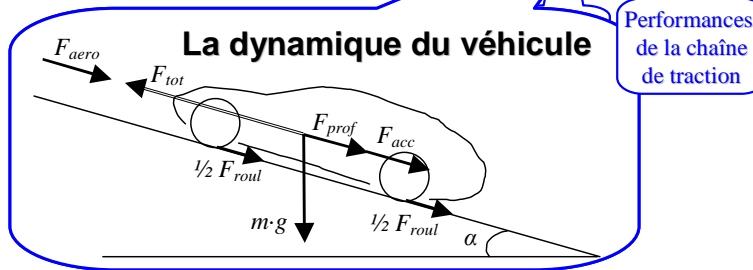
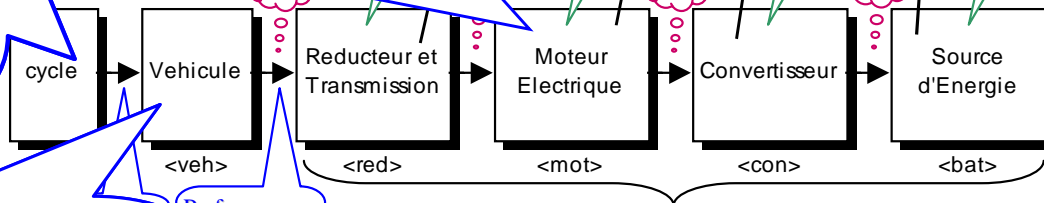
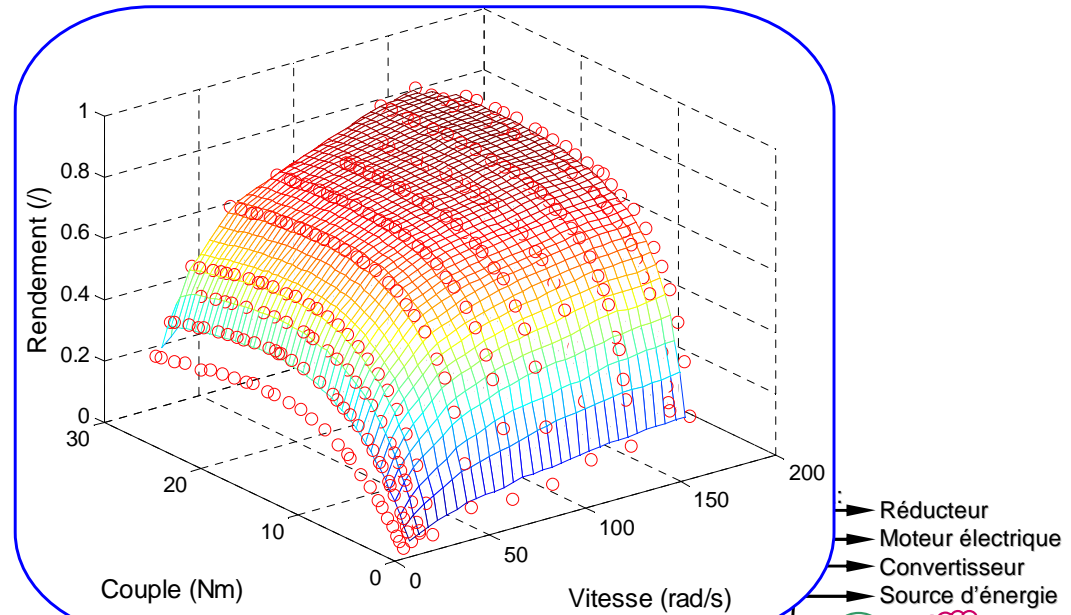
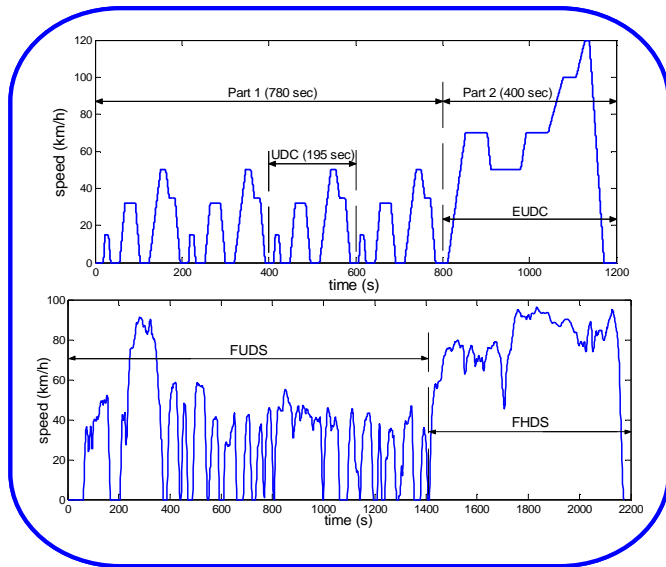


$$E_b = \frac{E_v}{\eta_r(E_v) \cdot \eta_m(E_r) \cdot \eta_c(E_m) \cdot \eta_b(E_c)}$$

3. Modèle de conception optimale systémique de la chaîne de traction d'un VE

- Modèle dynamique inverse de la chaîne de traction du VE

✚ modèle énergétique, construit dans le sens de la conception



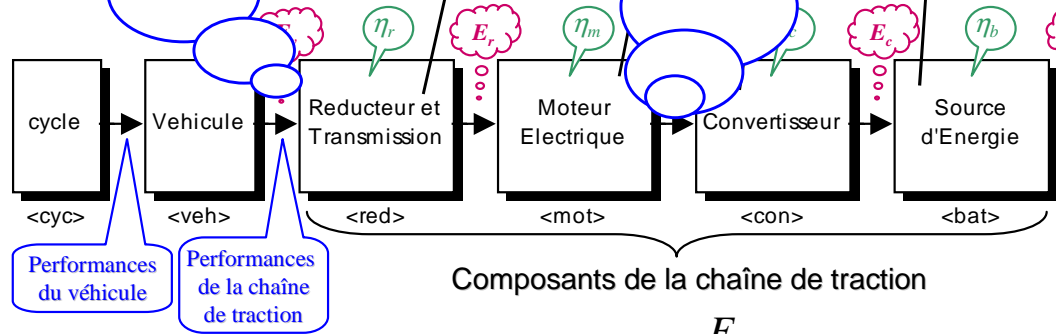
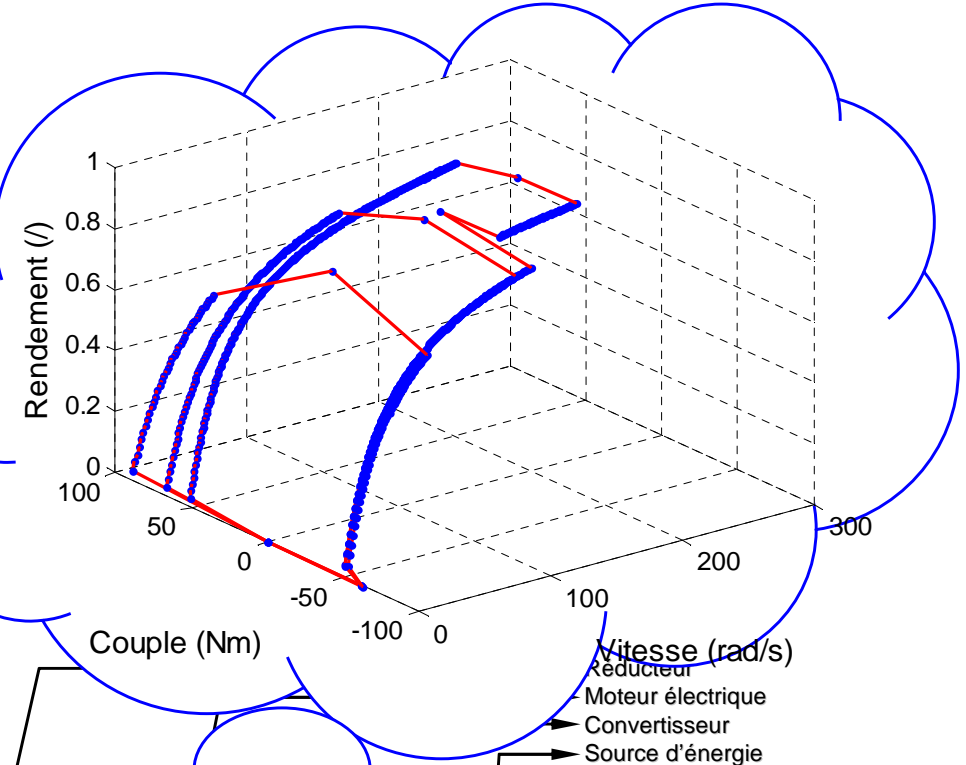
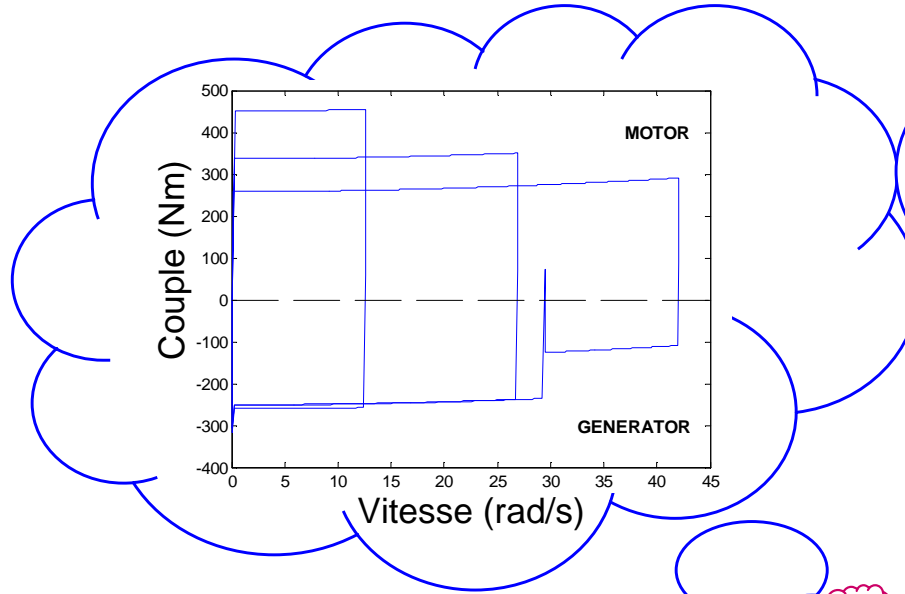
Composants de la chaîne de traction

$$E_b = \frac{E_v}{\eta_r(E_v) \cdot \eta_m(E_r) \cdot \eta_c(E_m) \cdot \eta_b(E_c)}$$

3. Modèle de conception optimale systémique de la chaîne de traction d'un VE

- *Modèle dynamique inverse de la chaîne de traction du VE*

✚ modèle énergétique, construit dans le sens de la conception



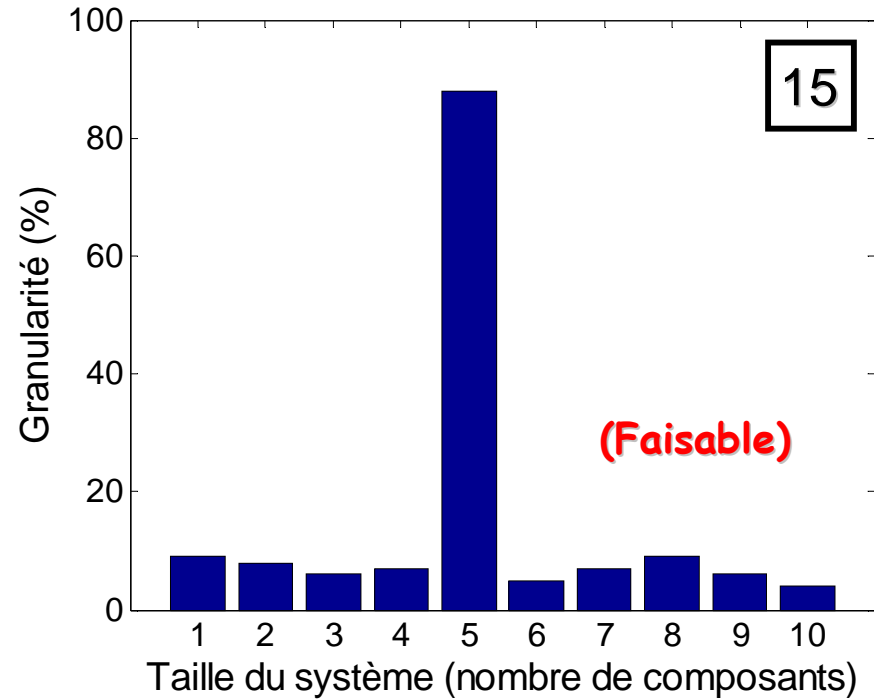
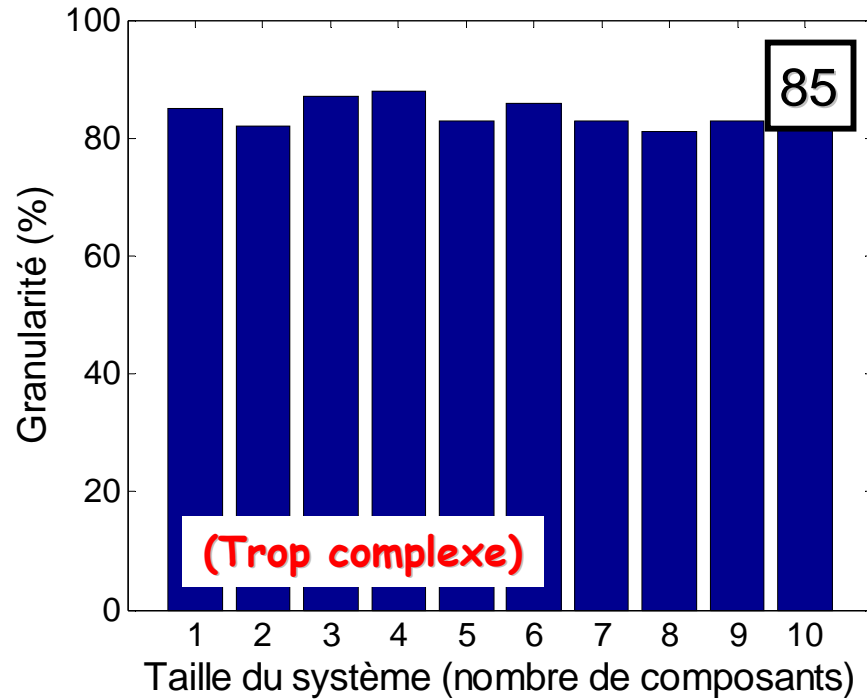
Composants de la chaîne de traction

$$E_b = \frac{E_v}{\eta_r(E_v) \cdot \eta_m(E_r) \cdot \eta_c(E_m) \cdot \eta_b(E_c)}$$

3. Modèle de conception optimale systémique de la chaîne de traction d'un VE

- *Modèle de granularité variable :*

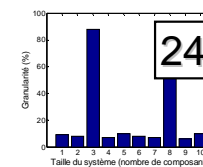
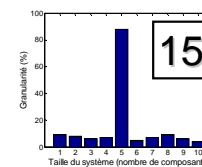
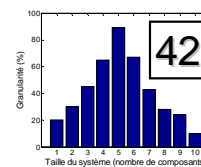
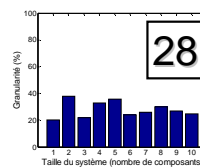
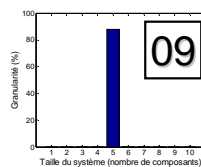
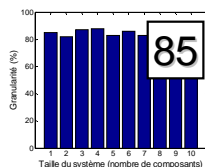
✚ *Complexité du modèle systémique :*



✚ *La granularité de chaque composant est définie en fonction du niveau de signification du composant ou phénomène modélisé ;*

✚ *Le niveau de signification est déterminé par une analyse de sensibilité utilisant la méthode des plans d'expériences ;*

Conclusion : Permet de traiter des systèmes relativement complexes !



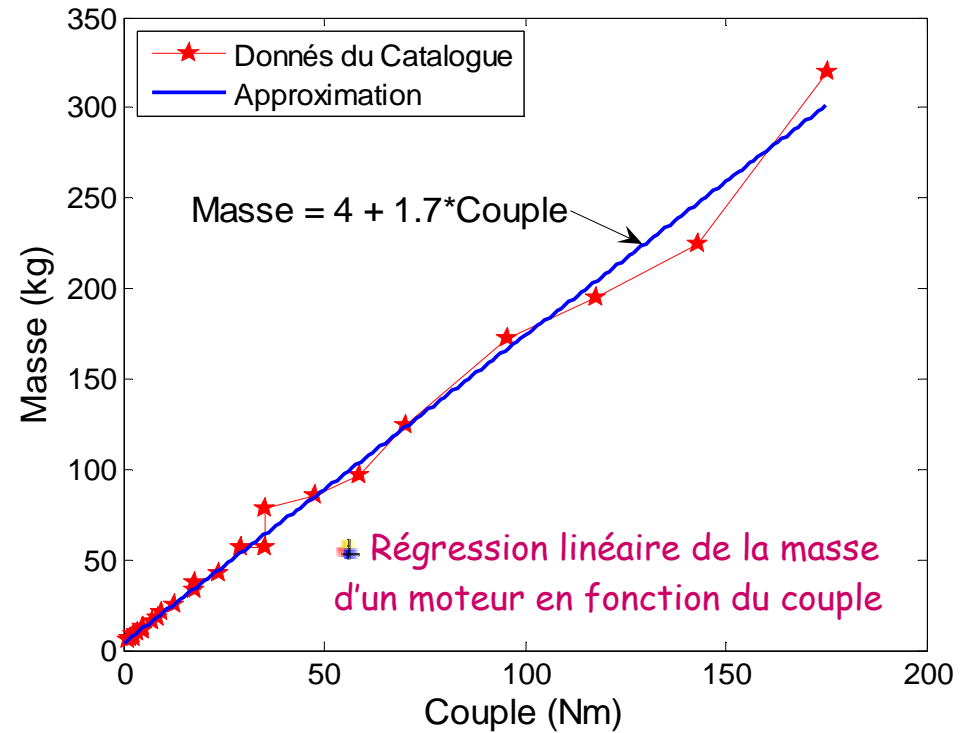
3. Modèle de conception optimale systémique de la chaîne de traction d'un VE

- Modèles simplifiés

✚ Simple mais réaliste !

$$M_b = \frac{E_b}{sE_{NiMH}}$$

$$M_m = 4 + 1,7 \cdot C$$

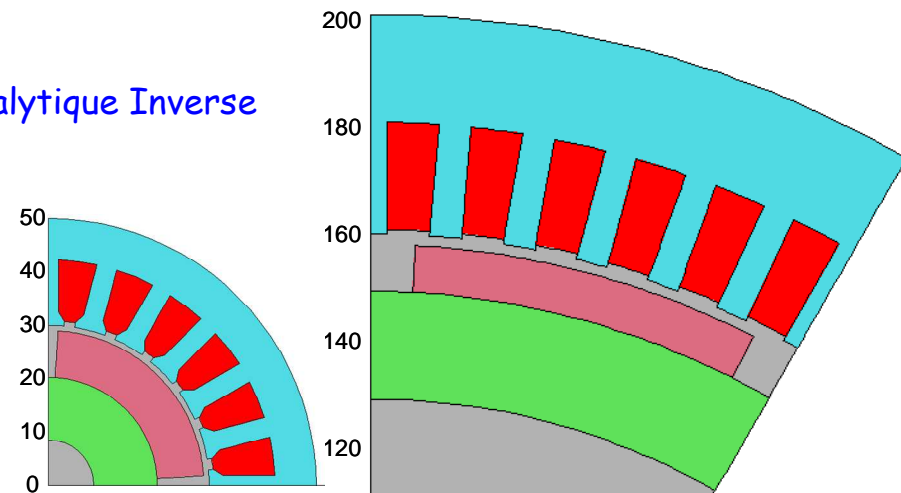


- Modèles détaillés

✚ Analytique (Direct ou Inverse) - Application avec analytique Inverse

✚ Numérique (MEF) - soumis direct à l'optimisation

✚ Multi-Modèle Multi-Physique - Application

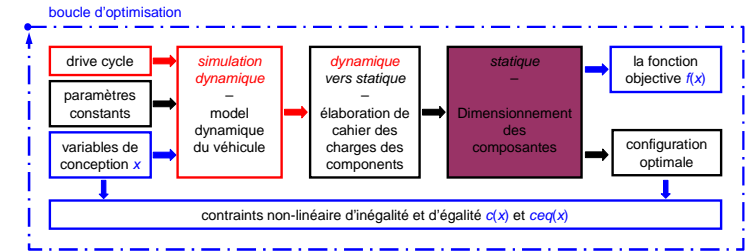


Réalisations du modèle de conception optimale systémique

✚ En fonction du type de modèle de dimensionnement utilisé

1. Modèles simplifiés (suffisant pour):

- boucler ;
- déterminer le *cahier des charge* des composants;
- donner une *image d'ensemble* des composants (masse, coût ...)



Conclusion : Élaboration des cahiers des charges dans une approche systémique !

2. Modèles détaillés

- modèle *analytique*
- modèle *numérique*
- modèle *mixte* (mélange entre analytique et numérique)

- ...

- *dimensionner* le composant;

moteur – détaillé
autres – simplifié



Dimensionner le moteur
dans une approche systémique

Conclusion : Conception des composants dans une approche systémique !

METHODOLOGIE POUR LA CONCEPTION OPTIMALE SYSTEMIQUE

1. La nécessité d'une conception optimale systémique
2. Orientation du modèle pour la conception
3. Modèle de conception optimale systémique de la chaîne de traction d'un VE

CONCEPTION D'UN COMPOSANT DANS UNE APPROCHE SYSTEMIQUE

4. Conception d'un moteur-roue par une approche systémique

5. Dimensionnement par un modèle multi-physique détaillé

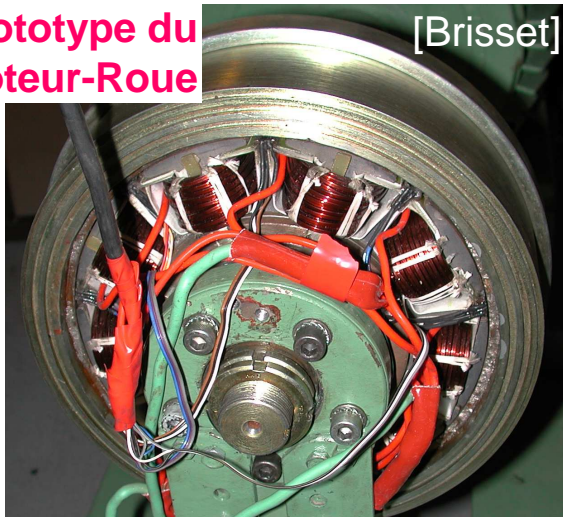
CONCLUSIONS

4. Conception d'un moteur-roue par une approche systémique



Kart de Loisir

Prototype du Moteur-Roue



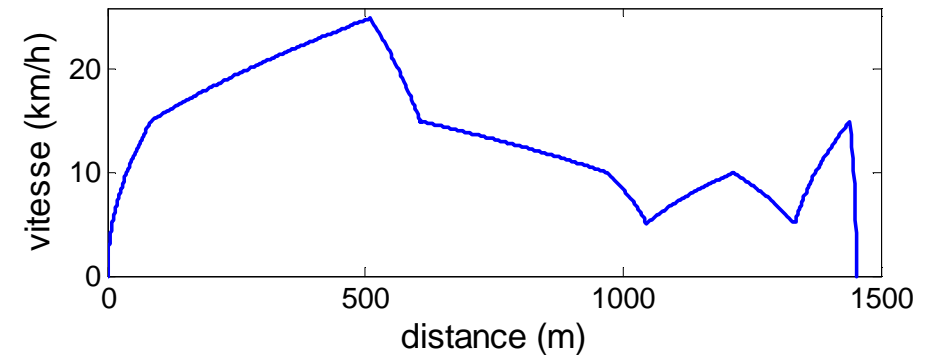
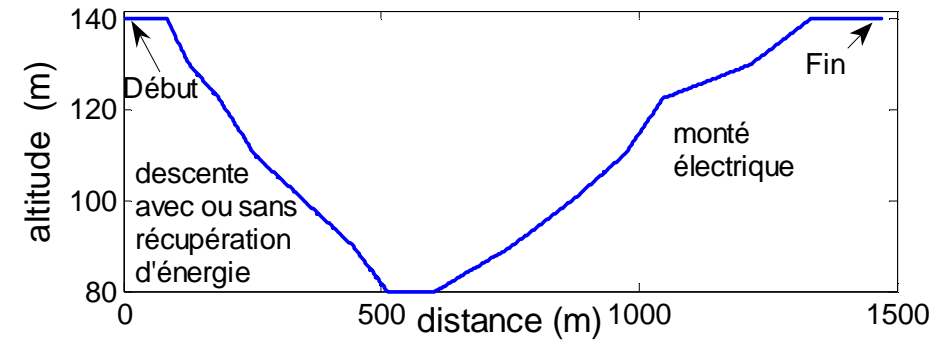
[Brisset]

Modèle inverse de dimensionnement !

67 équations & 78 variables !

Le cahier des charges du Déval-kart :

- le profile géographique ;
- le profile de vitesse en fonction de la distance.



- ✚ Propulsé par deux moteurs de type moteur-roue
- ✚ Batterie NiMH
- ✚ Conditions d'Opération :
 - 8 heures/jour;
 - 10 minutes/cycle (8+2);
 - 50 cycles/jour

4. Conception d'un moteur-roue par une approche systémique

Le problème de conception optimale systémique

✚ Concevoir le moteur pour une application spécifique en régime variable

Composant sans le système

1. $\min_x M_m(x)$

Masse du Moteur – Ne prend en compte que le **moteur électrique**

2. $\min_x M_W(x)$

Masse du Kart – Prend en compte le **système entier**

$$\begin{cases} c_i(x) \leq 0 & i = 1, \dots, p \\ ceq_j(x) = 0 & j = 1, \dots, q \\ lb_k \leq x_k \leq ub_k & k = 1, \dots, n \end{cases}$$

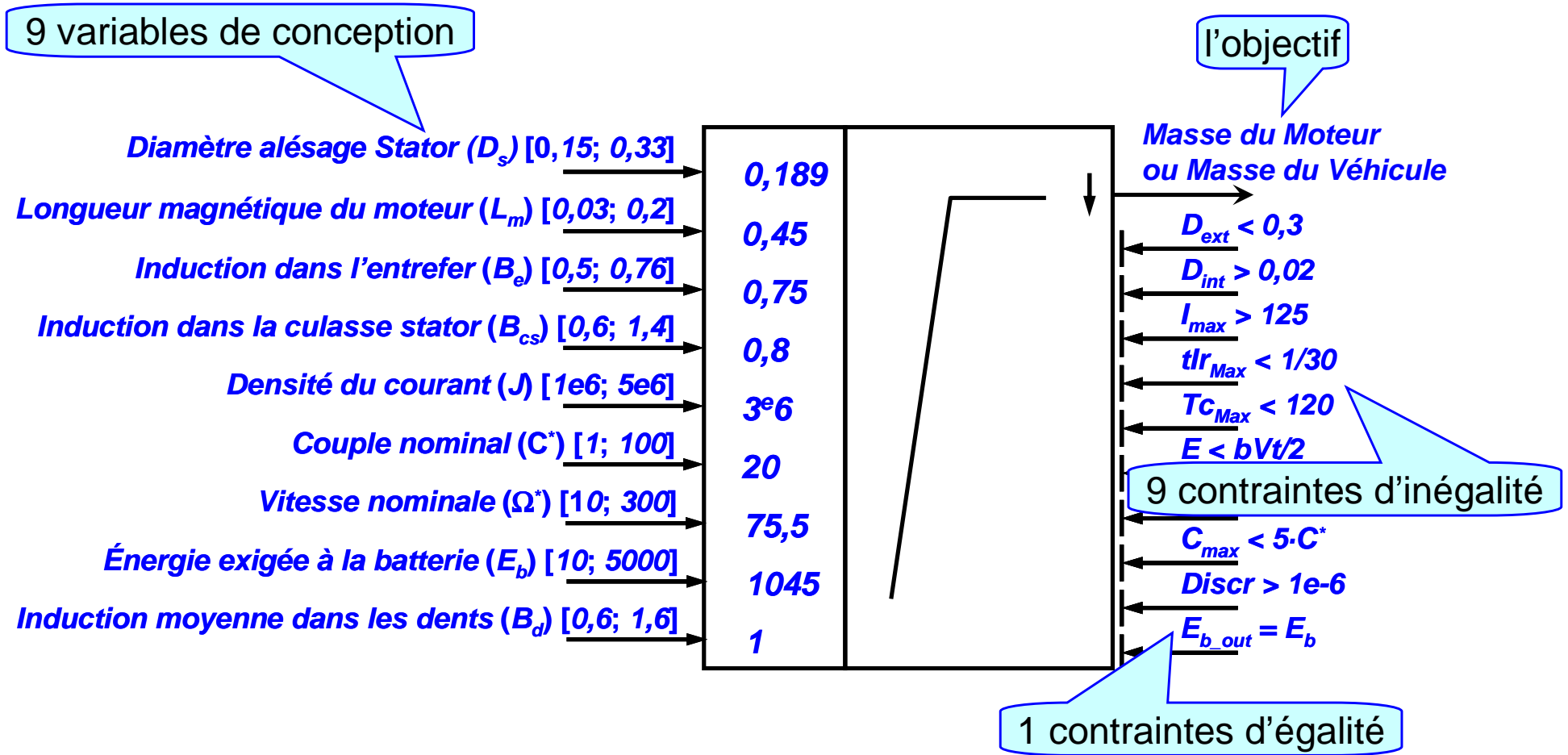
Composant dans (par) le système

✚ Le cahier des charges du moteur-roue :

Pas de Couple nominal mais **contrainte sur la température maximale du moteur < 120°C**

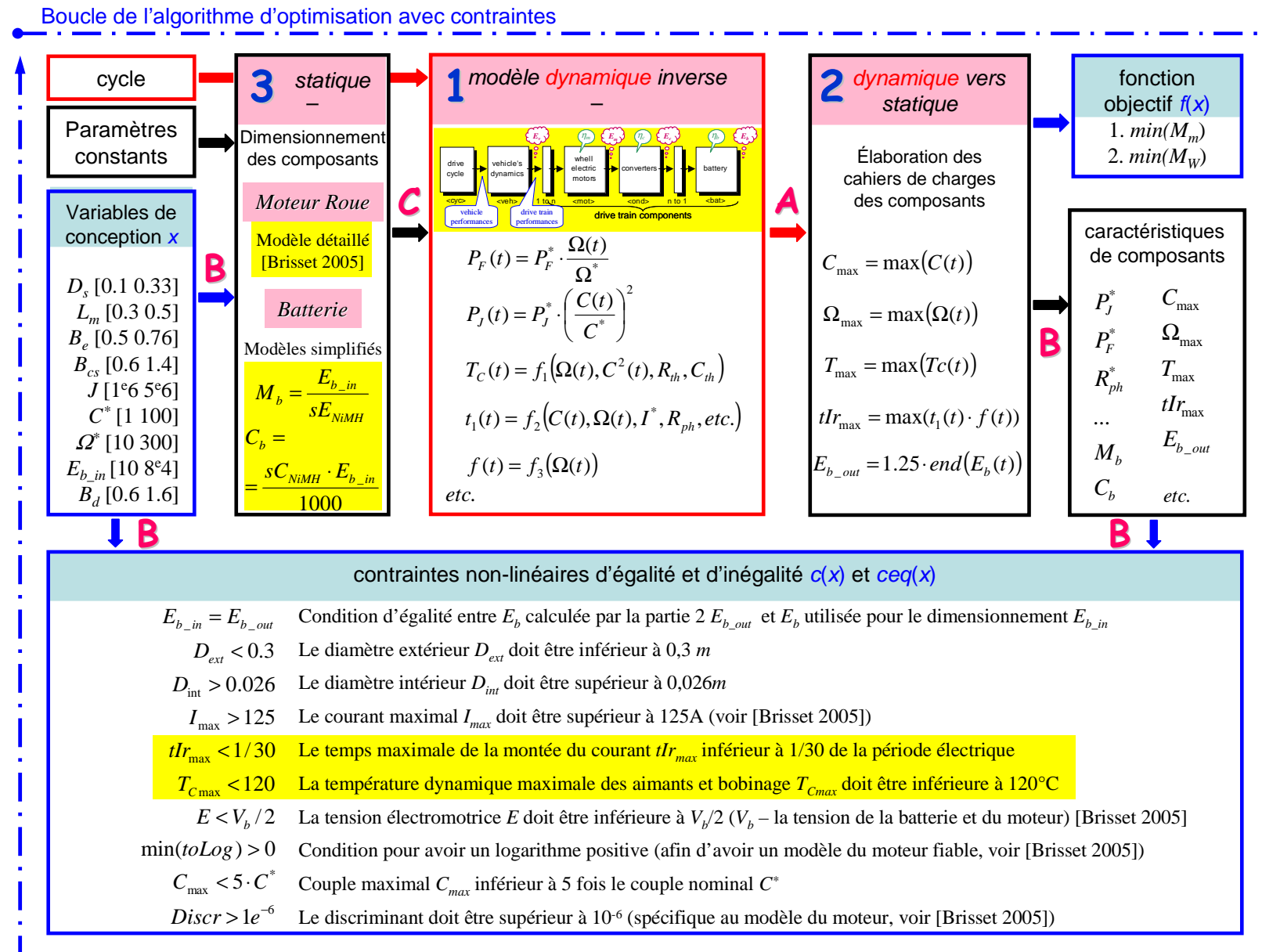
Pas de Vitesse nominale mais **contrainte sur le temps de montée du courant < 1/30 de la période électrique**

Schéma du problème d'optimisation



4. Conception d'un moteur-roue par une approche systémique

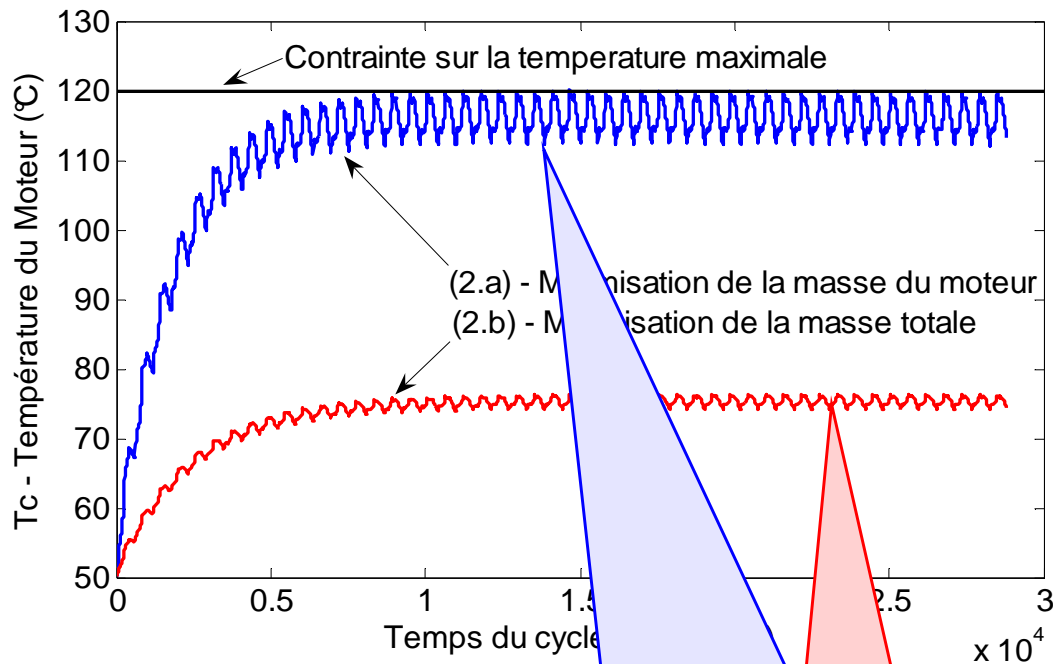
Schéma du processus de *conception optimale systémique*



4. Conception d'un moteur-roue par une approche systémique

Résultats d'optimisation

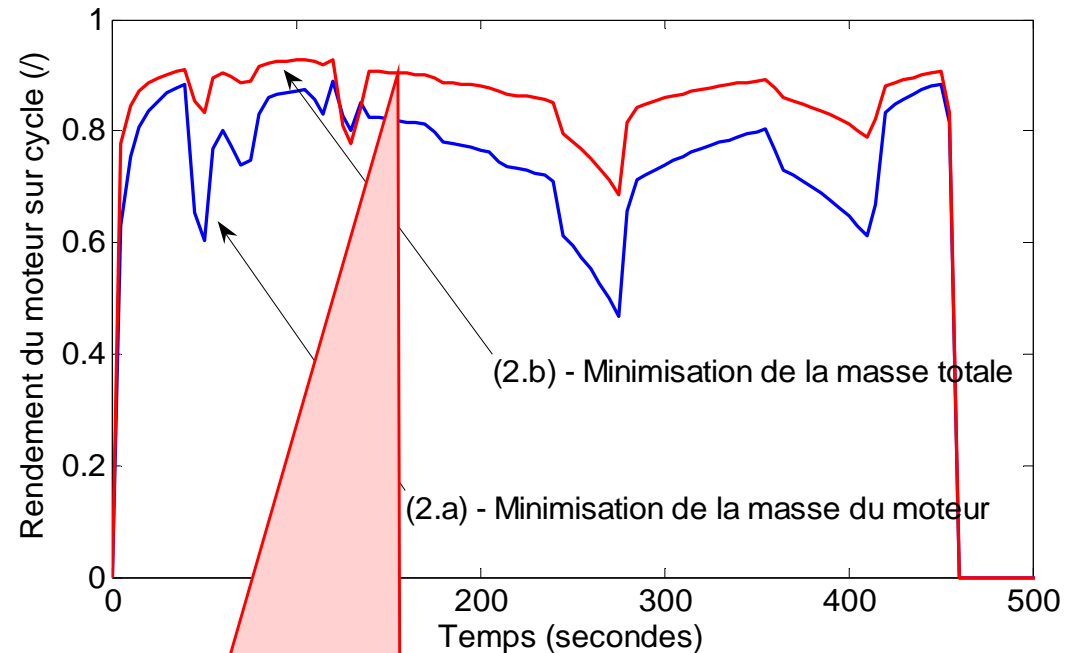
✚ L'évolution de la température du moteur pendant les 50 cycles pour les 2 solutions optimales



Minimisation de la **masse du moteur**
→ la **température** est sur la contrainte

→ **pertes** inférieures, donc
une **température** inférieure

✚ L'évolution du rendement du moteur sur un cycle pour les 2 solutions optimales

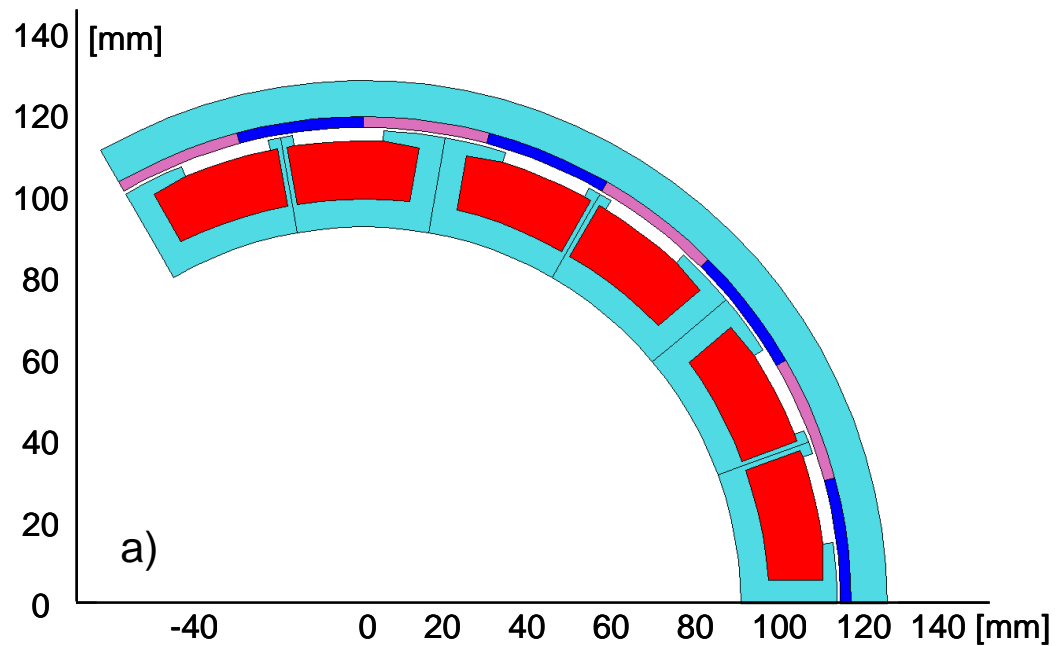


Minimisation de la **masse totale du kart**
→ Minimisation de l'**énergie** de la batterie
→ **Rendement** du moteur est supérieur

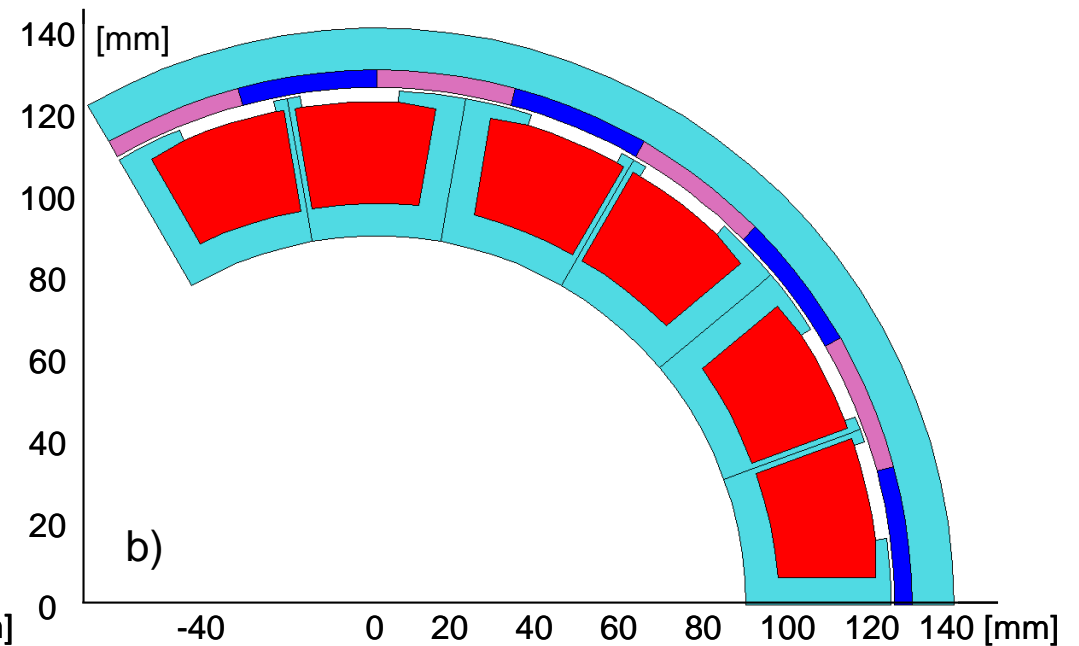
4. Conception d'un moteur-roue par une approche systémique

Forme optimale des moteurs :

a) Minimisation de la **masse du moteur**;



b) Minimisation de la **masse totale du kart**.

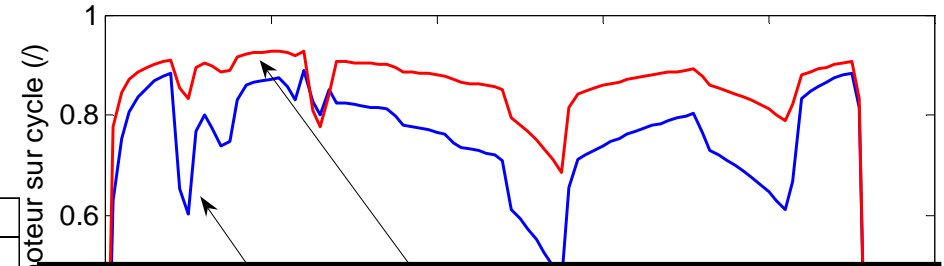


✚ Même modèle, mais résultats différents car les objectifs sont différents !

4. Conception d'un moteur-roue par une approche systémique

Résultats d'optimisation

	Nom de la Variable	$min(M_m)$	$min(M_W)$	Unités
Variables de Conception				
D_s	Diamètre Alésage Stator	0,208	0,218	m
L_m	Longueur Magnétique du Moteur	0,03	0,032	m
B_e	Induction dans l'Entrefer	0,68	0,76	T
B_{cs}	Induction dans la Culasse Stator	1,4	1,4	T
J	Densité du Courant	2,4e6	1,2e6	A/m ²
C^*	Couple Nominal du Moteur	7,8	7,5	Nm
Ω^*	Vitesse Nominale du Moteur	114,6	59,6	rad/s
E_b	Énergie exigée à la batterie	3,149	2,098	kWh
B_d	Induction moyenne dans les dents	1,6	1,6	T
Autres				
C_{max}	Couple Maximal	39,3	37,4	Nm
Ω_{max}	Vitesse Maximale	38,5	38,5	rad/s
T_{max}	Température Maximale	120	76,3	°C
D_{ext}	Diamètre Extérieur du Moteur	0,232	0,248	m
M_m	Masse du Moteur	5,4	8,1	kg
η_m	Rendement du Moteur (nominal)	0,92	0,9	/
P_F	Pertes Fer (nominal)	48,3	28,9	W
P_J	Pertes Joule (nominal)	13,9	5,3	W
C_b	Coût de la Batterie	787	524	€
M_b	Masse de la Batterie	45	30	kg
M_W	Masse totale du Kart	249,8	240,4	kg
	Temps Moyen d'une Optimisation	~25	~47	minutes



La contrainte sur la température maximale du moteur permet de **sous-dimensionner le moteur (downsizing)**

Il est important de **prendre en compte le cycle de fonctionnement !**

Il est important de **prendre en compte le système entier** dans le processus de conception (les solutions sont différentes) !

Conclusion : L'application met en évidence l'intérêt d'une approche systémique !

METHODOLOGIE POUR LA CONCEPTION OPTIMALE SYSTEMIQUE

1. La nécessité d'une conception optimale systémique
2. Orientation du modèle pour la conception
3. Modèle de conception optimale systémique de la chaîne de traction d'un VE

CONCEPTION D'UN COMPOSANT DANS UNE APPROCHE SYSTEMIQUE

4. Conception d'un moteur-roue par une approche systémique

5. Dimensionnement par un modèle multi-physique détaillé

CONCLUSIONS

5. Dimensionnement par un modèle multi-physique détaillé

Le Multi-Modèle et le Problème d'Optimisation

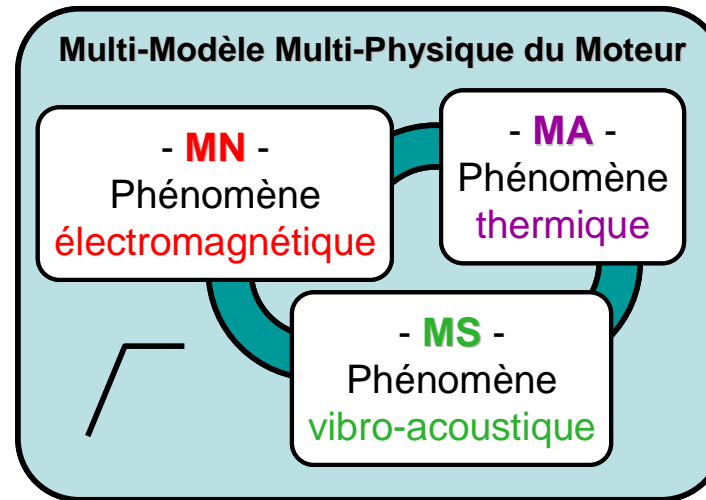
(moteur de traction à aimant permanent)

✚ Multi-modèle multi-physique du moteur électrique utilisé pour le dimensionnement

7 variables de conception

R	[0.1	0.3]
E_S	[0.002	0.04]
E_R	[0.002	0.04]
E_W	[0.005	0.04]
J	[1	10]
E_{PM}	[0.002	0.02]
$L_{T/2}$	[0.001	0.005]

Boucle d'optimisation avec contraintes



MN - Modèle Numérique, MA - Modèle Analytique, MS - Modèle Surrogate.

l'objectif

Masse ou Volume

$$C = 200 \text{ Nm}$$

$$L_S \leq 1e-2$$

$$T_W \leq 90 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$B_S \leq 1.8 \text{ T}$$

$$B_R \leq 1.8 \text{ T}$$

$$B_T \leq 1.8 \text{ T}$$

$$N \leq 70 \text{ dB}$$

1 contraintes d'égalité

6 contraintes d'inégalité

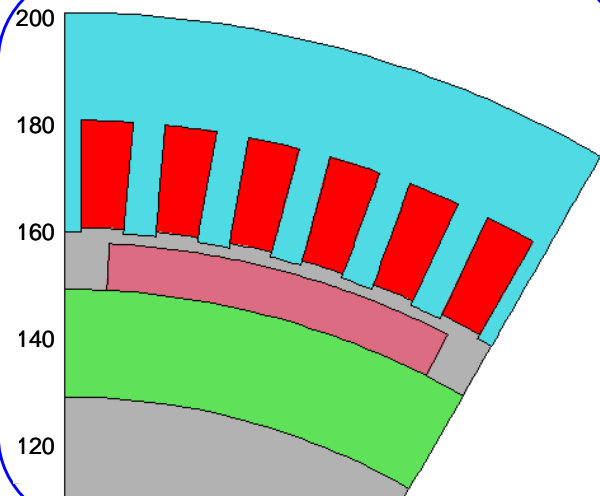
R	– Rayon extérieur du moteur (m)	C	– Couple (Nm)
E_S	– Épaisseur Culasse stator (m)	L_S	– Largeur de l'ouverture d'encoche (m)
E_R	– Épaisseur Culasse rotor (m)	T_W	– Température du Bobinage ($^\circ\text{C}$)
E_W	– Hauteur d'encoche (m)	B_S	– Induction magnétique dans la Culasse Stator (T)
J	– Densité du Courant (A/mm^2)	B_R	– Induction magnétique dans la Culasse Rotor (T)
E_{PM}	– Épaisseur Aimant (m)	B_T	– Induction magnétique dans les Dents (T)
$L_{T/2}$	– Épaisseur de Demi Dent (m)	N	– Bruit maximale sur la plage de vitesse (dB)

5. Dimensionnement par un modèle multi-physique détaillé

Le Multi-Modèle et le Problème d'Optimisation

Multi-modèle multi-physique du moteur électrique

7 variables de conception



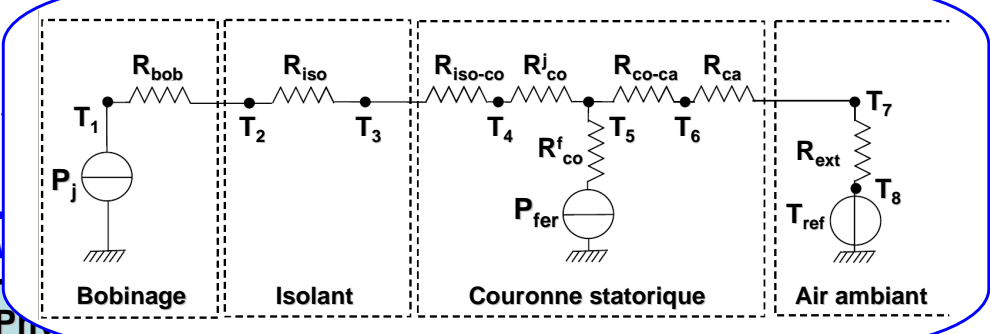
Boucle d'optimisation avec

Multi-Modèle Multi-Physique

- MN -
Phénomène électromagnétique

- MA -
Phénomène thermique

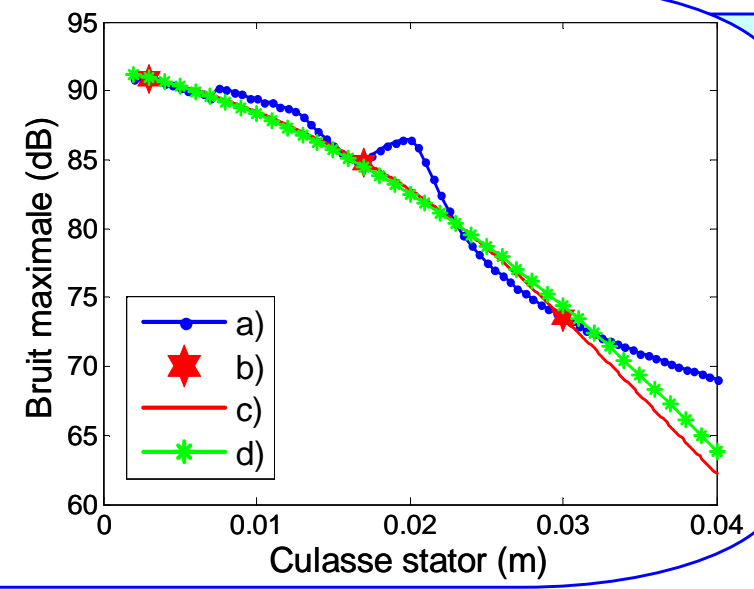
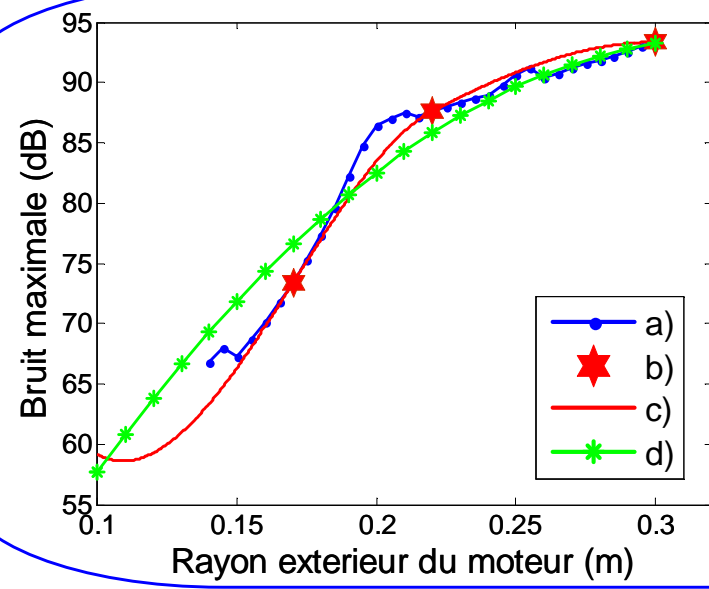
- MS -
Phénomène acoustique



- $L_s \leq 1e-2$
- $T_w \leq 90$
- $B_s \leq 1.8$ T
- $B_R \leq 1.8$ T
- $B_T \leq 1.8$ T
- $N \leq 70$ dB


1 contraintes d'égalité

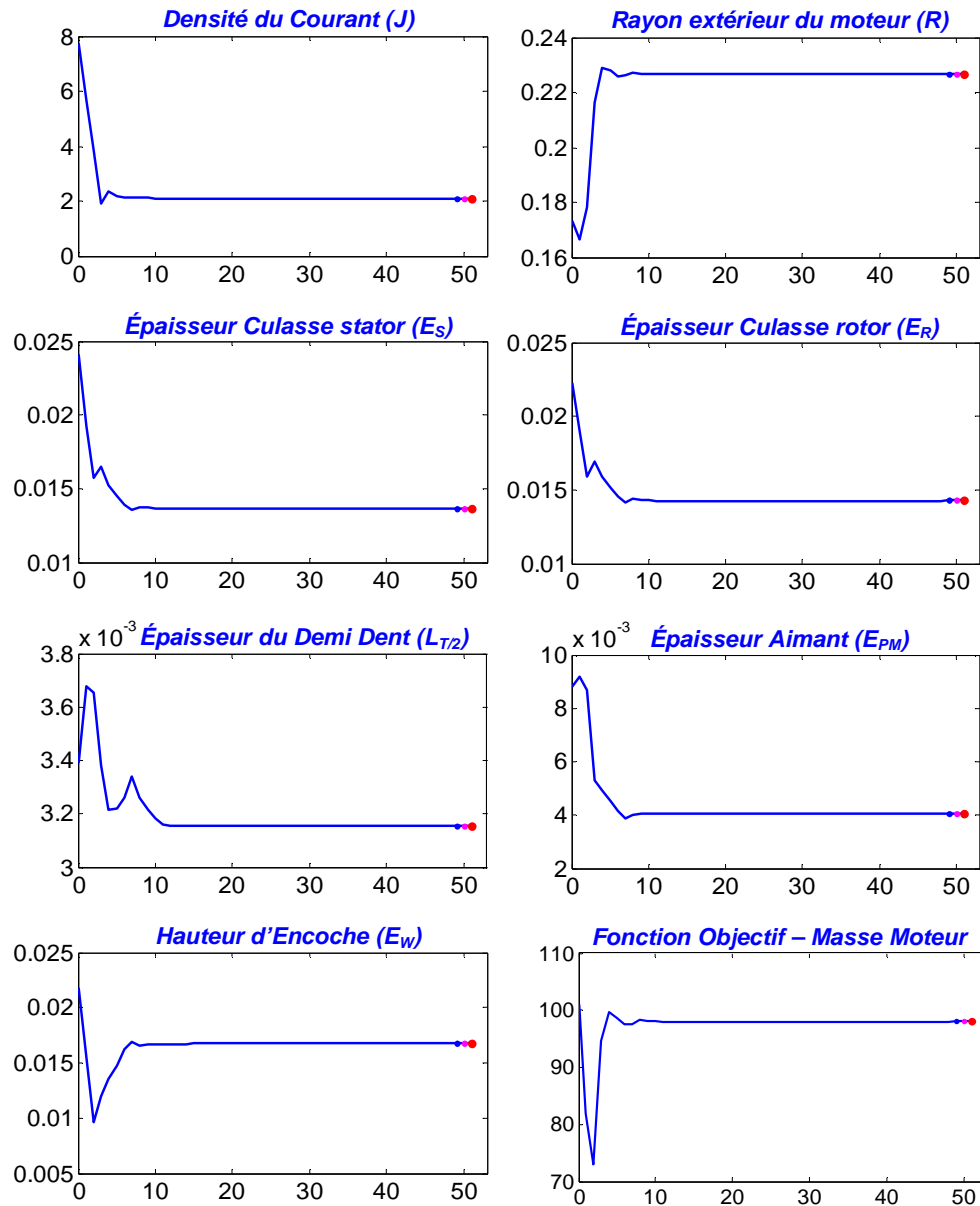
R
E_S
E_R
E_W
J
E_{PM}
L_{T/2}



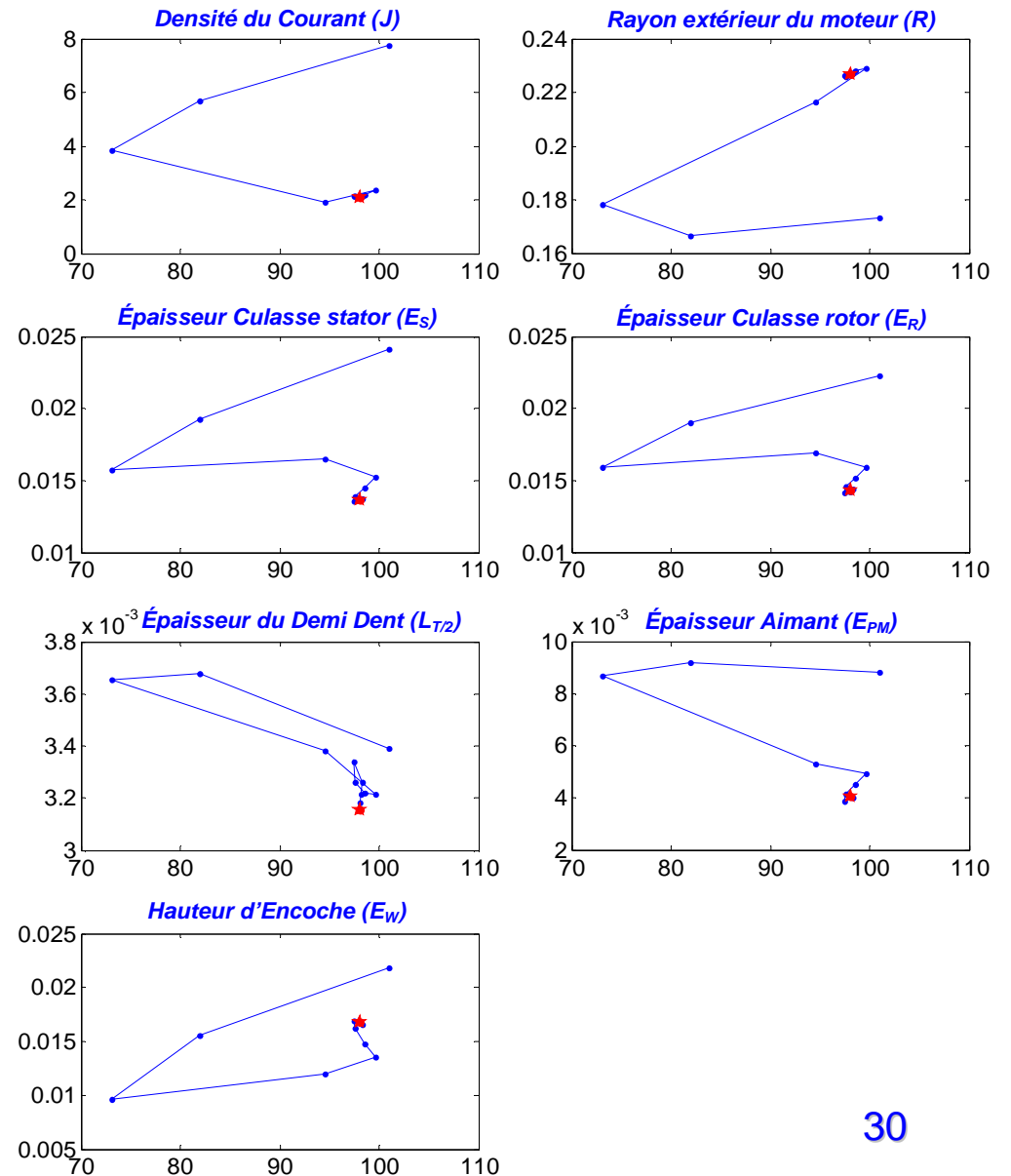
égalité

5. Dimensionnement par un modèle multi-physique détaillé

Résultats :  Convergence des variables de conception et de la fonction objectif en 51 itérations pour la minimisation de la masse sans contrainte sur le bruit

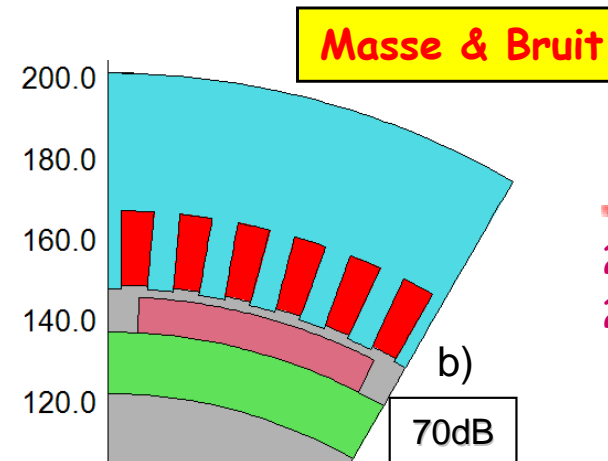
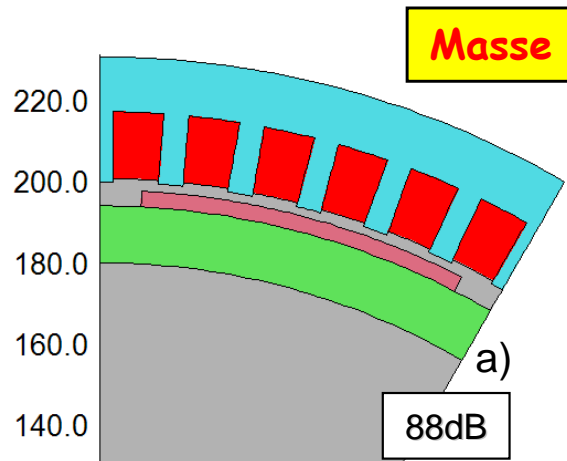


L'évolution des variables de conception pendant la convergence en fonction de l'objectif pour la minimisation de la masse sans la contrainte sur le bruit



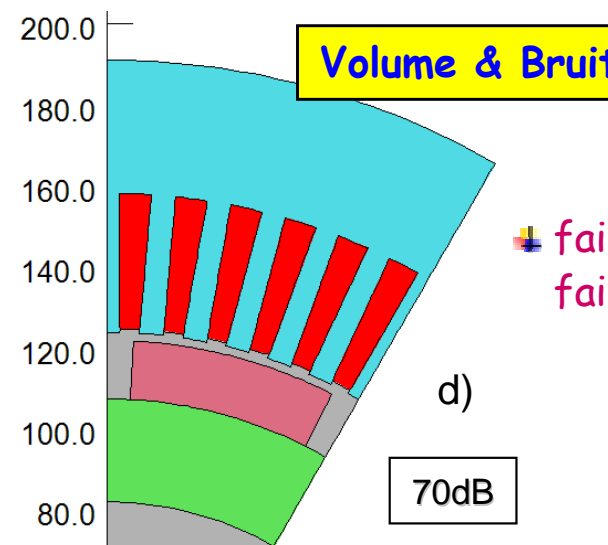
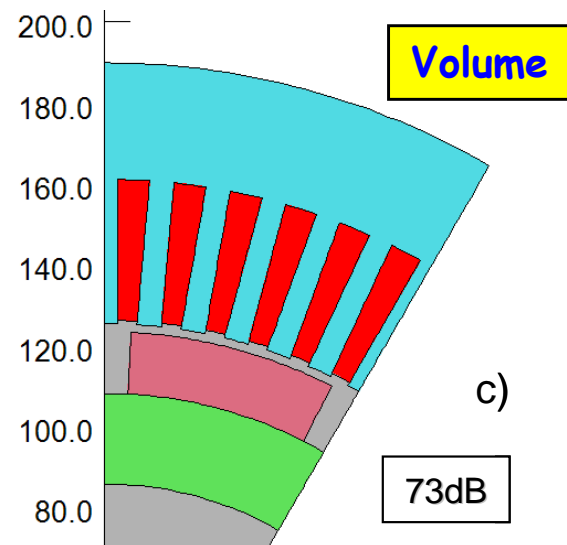
Résultats d'optimisation – Configurations optimales du moteur :

✚ Forme d'anneau avec un circuit magnétique saturé



✚ Forme différente 26% plus petit 23% plus lourd

✚ Forme différente 33% plus petit 40% plus lourd



✚ faible variation de forme faible variation du bruit !

Conclusion : Prémisse de la conception simultanée multidisciplinaire !

- en adaptant la structure aux caractéristiques désirées
- grâce à l'approche multidisciplinaire

METHODOLOGIE POUR LA CONCEPTION OPTIMALE SYSTEMIQUE

1. La nécessité d'une conception optimale systémique
2. Orientation du modèle pour la conception
3. Modèle de conception optimale systémique de la chaîne de traction d'un VE

CONCEPTION D'UN COMPOSANT DANS UNE APPROCHE SYSTEMIQUE

4. Conception d'un moteur-roue par une approche systémique
5. Dimensionnement par un modèle multi-physique détaillé

CONCLUSIONS

- ✚ Justifie le besoin d'une approche de conception optimale systémique
- ✚ Définit la meilleure orientation pour la conception
(très important lors de la conception des systèmes complexes)
- ✚ Méthodologie rationnelle et générale pour la conception optimale systémique
(basée sur la meilleure orientation + structure claire et logique)
- ✚ Développement du logiciel monVEOptim
(afin d'appliquer la méthodologie aux cas spécifiques de conception)
- ✚ Granularité & méthode pour construire un modèle bien adapté à l'objectif
- ✚ Mis en évidence l'utilité de la méthodologie
(Élaboration des cahiers des charges & Conception des composants dans une approche systémique)
- ✚ Applications :
 - approche systémique (système optimal)
 - dimensionner pour un cycle de fonctionnement (adapté aux besoins)
 - approche multidisciplinaire (solutions originales)
- ✚ Perspectives : multidisciplinaire & systémique

Aider à la conception de nouveaux produits bien adaptés aux sous-systèmes et systèmes associés tout en intégrant les contraintes économiques et environnementales locales et globales. 33



Composants Électriques des Véhicules Urbains

Conception Optimale Systémique des Composants des Chaînes de Traction Electriques

Victor Meşter

Laboratoire L2EP, EA2697
Ecole Centrale de Lille
Cité Scientifique - BP 48
F-59651 Villeneuve d'Ascq Cedex

Email: victor.mester@ec-lille.fr

