

Outils pour le dimensionnement efficace des systèmes électromécaniques

Stéphane VIVIER

Sommaire

- ▶ Parcours
- ▶ Activités d'enseignement
- ▶ Activités de recherche
- ▶ Travaux de recherche
- ▶ Bilan & Perspectives



Parcours & Activités

Parcours

- ▶ Diplôme d'ingénieur – 1992-1997
 - ▶ ESIEE (Ecole Supérieure d'ingénieurs en Electronique et Electrotechnique) – Amiens
- ▶ DEA -1998
 - ▶ FPMs (Faculté polytechnique de Mons - Belgique)
- ▶ Doctorat – 1998-2002
 - ▶ Ecole Centrale de Lille – USTL (Université des Sciences et Technologies de Lille)
 - ▶ *[Service militaire]*
- ▶ ATER (*poste complet*) – 2002-2003
 - ▶ IUT de Béthune – Université d'Artois
- ▶ ATER (*poste complet*) – 2003-2004
 - ▶ Ecole Centrale de Lille – USTL (Université des Sciences et Technologies de Lille)
- ▶ Maître de conférences – depuis 09/2004
 - ▶ UTC (Université de Technologie de Compiègne)

Activités d'enseignement

- ▶ École Centrale de Lille

- ▶ Génie Électrique (*général*) / Probabilités / Statistiques

- ▶ IUT Béthune

- ▶ Machines électriques / Électronique

- ▶ UTC

- ▶ **Électromagnétisme**

- ▶ Responsable de l'UV

- ▶ Robotique (*filière*)

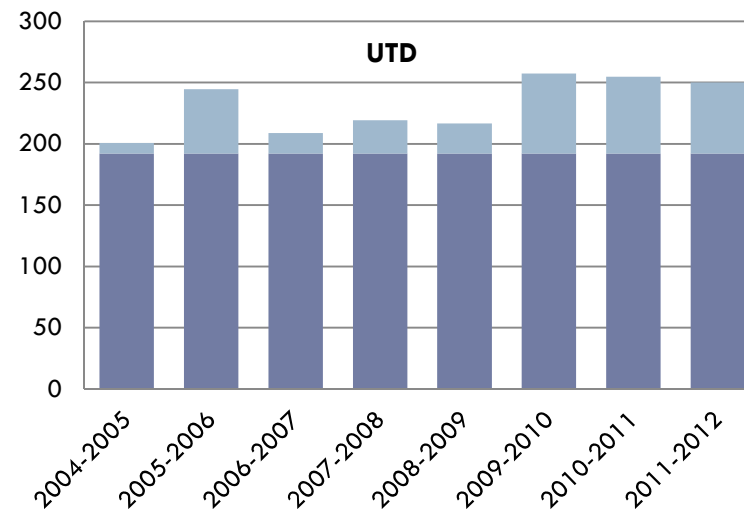
- ▶ Machines électriques (*filière*)

- ▶ Électricité (*tronc commun*)

- ▶ Optique (*tronc commun*)

- ▶ **Modélisation et Conception Optimale d'Actionneurs Électriques** (*Master II*)

- ▶ Responsable de l'UE



Activités de recherche

- ▶ Positionnement
 - ▶ Laboratoire d'Electromécanique de Compiègne (LEC – EA 1006)
 - ▶ *Actionneurs Electriques et Systèmes de motricité à énergie électrique embarquée*

AS2E

Alimentation des Systèmes à Énergie Embarquée

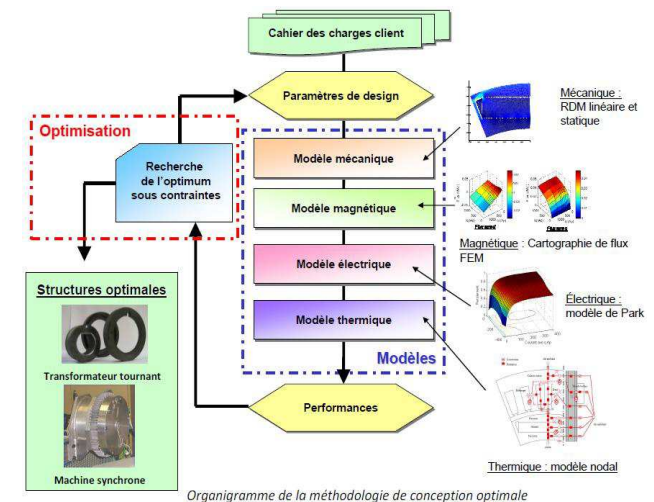
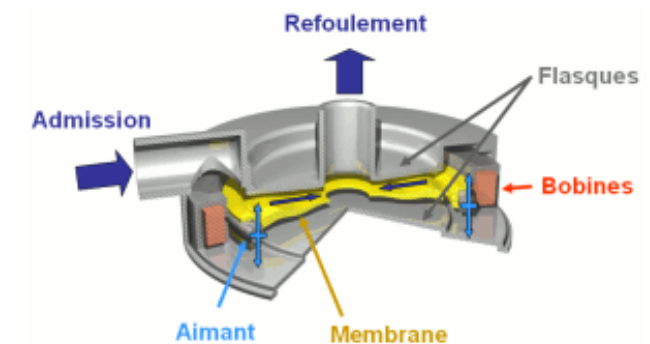
COMEC

Conception, réalisation et mise en œuvre des machines électriques et de leur commande



Activités de recherche

- ▶ Activités contractuelles
- ▶ Projet AMS – AirBooster
 - ▶ Projet PREDIT – 2007- /
 - ▶ *Conception d'un système embarqué de pompe à membrane pour la surcompression des gaz d'échappement*
 - ▶ → *Conception d'un actionneur linéaire résonnant haute dynamique, grands efforts*
- ▶ Projet M2EI
 - ▶ Projet PREDIT – ~2007-2009
 - ▶ *Evaluation des concepts innovants pour l'hybridation des véhicules*

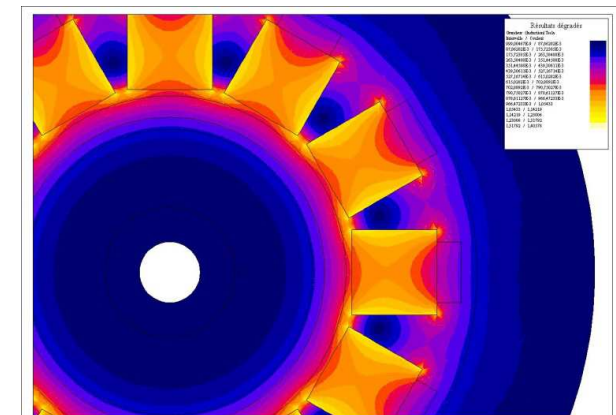


Activités de recherche

- ▶ Activités contractuelles
- ▶ Projet AREMA
 - ▶ Projet PREDIT - ~2007-2009
 - ▶ *Conception des alternateurs automobiles à haut rendement*



- ▶ Projet « Ferrofluide »
 - ▶ Étude industrielle
 - ▶ *Étude d'un trieur densimétrique de billes amagnétiques, à base de ferrofluide*



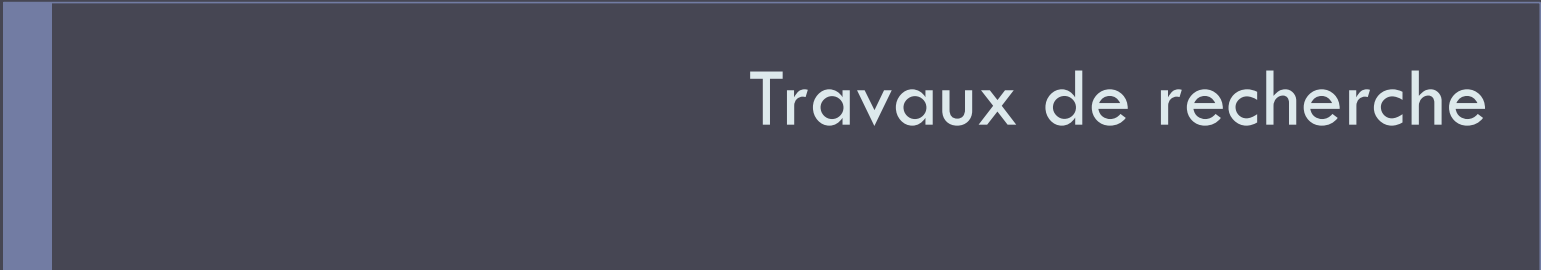
Activités scientifiques

- ▶ Co-encadrements (50%) - Thèses
 - ▶ Jérôme LEGRANGER
 - ▶ 2007→2009
 - ▶ *Étude des machines brushless dans les applications moteurs-générateurs embarquées*
 - ▶ Anthony GIMENO
 - ▶ 2007-2008→2010-2011
 - ▶ *Étude des alternateurs automobiles – Caractérisation des pertes*
 - ▶ Radhouane KHLISSA
 - ▶ 2011-...
 - ▶ *Application des outils de dimensionnement efficace*

- ▶ Publications
 - ▶ 12 revues avec comités de lecture
 - ▶ 33 articles en Conférences internationales
 - ▶ 4 articles en Conférences nationales
 - ▶ 2 brevets

Activités scientifiques

- ▶ Participation aux jurys de thèse
 - ▶ 2, comme co-encadrant
 - ▶ Jérôme LEGRANGER – Anthony GIMENO
 - ▶ 2, comme membre extérieur
 - ▶ Aurélien VAUQUELIN (UTC) – Jilin GONG (EC Lille)
- ▶ Comités de lecture
 - ▶ EF2009, ICEM 2010, MATCOM
- ▶ Commissions de spécialistes / de sélection



Travaux de recherche

Travaux de recherche - Sommaire

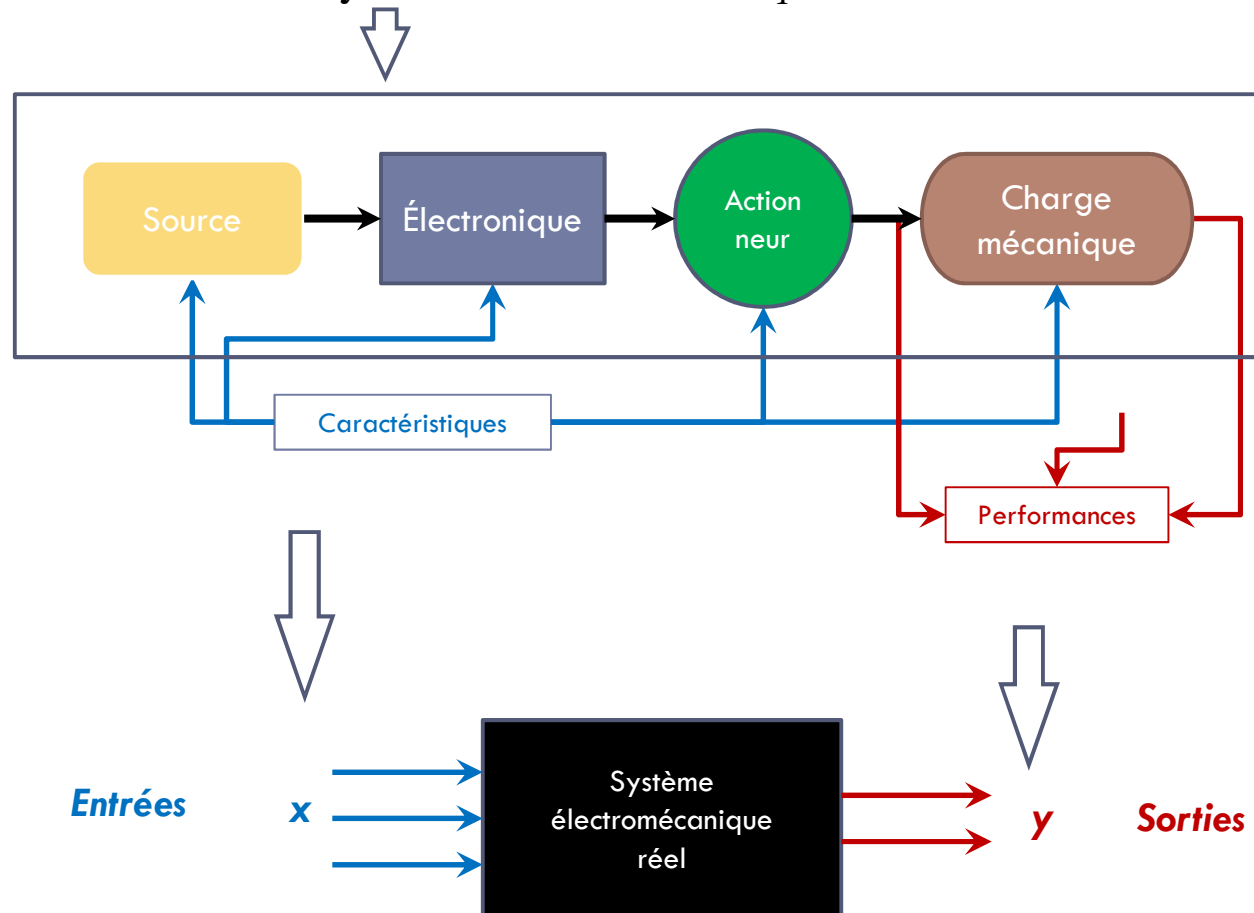
- ▶ Vision unifiée des travaux
- ▶ Problématique & Outils
 - ▶ Objet des travaux
- ▶ Modélisation
 - ▶ Différentes physiques
 - ▶ Différentes techniques
- ▶ Optimisation
 - ▶ Différentes méthodes
 - ▶ Différents supports

Travaux de recherche

Problématique & Outils

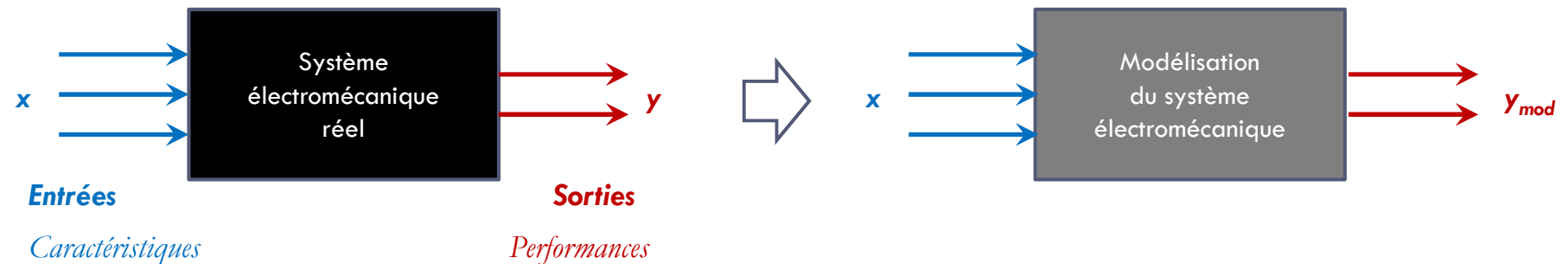
Problématique

- Dimensionnement d'un **Système** Électromécanique



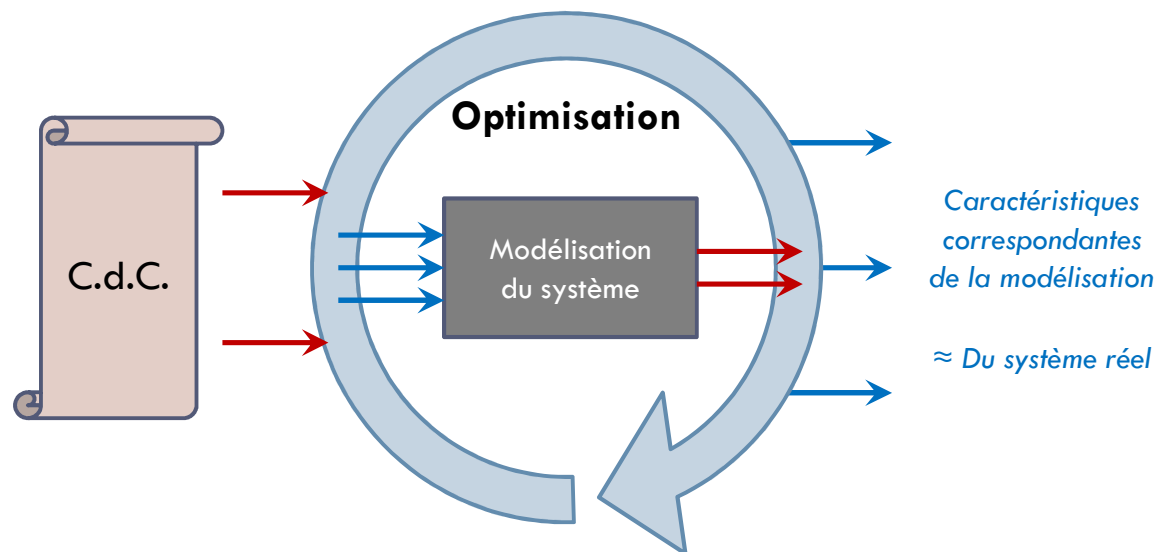
Problématique

- ▶ Le « système réel » est dans tous les cas inexistant réellement, car:
 - ▶ Soit il n'a jamais été conçu / construit
 - ▶ Soit il existe mais n'est pas dimensionné de manière optimale
- ▶ Utilisation d'un outil mathématique – informatique permettant de se substituer au système « réel »
 - ▶ **Modélisation**



Problématique - Outils

- ▶ **Dimensionnement** d'un Système Électromécanique
- ▶ But recherché:
 - ▶ La conception optimale du système, par utilisation de sa modélisation
 - ▶ Selon un cahier des charges (spécifications données a priori)
- ▶ Démarche privilégiée
 - ▶ **Optimisation**



Problématique - Outils

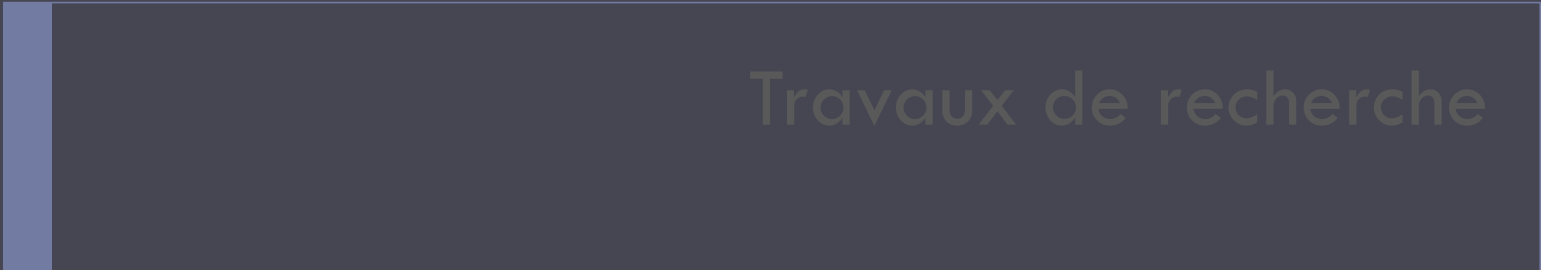
- ▶ Modélisation & Optimisation: Outils pour le dimensionnement
- ▶ Grand nombre de possibilités quant au choix de :
 - ▶ La méthode de modélisation
 - ▶ La procédure d'optimisation
 - ▶ Des combinaisons entre elles
- ▶ Intention des travaux :
 - ▶ Déterminer un meilleur choix sur le plan de l'**efficacité** globale du dimensionnement

Critère supplémentaire

- ▶ Outils pour le dimensionnement **efficace** des systèmes électromécaniques
- ▶ Notion d'efficacité

$$\text{efficacité} = \frac{\text{Qualité de la solution}}{\text{Coût de la solution}}$$

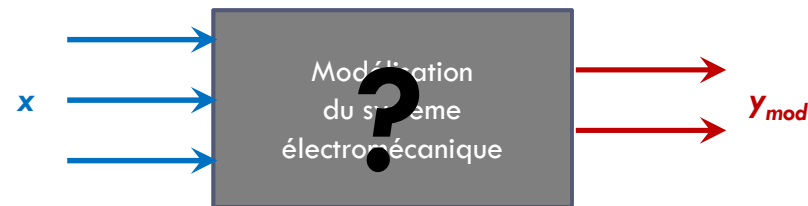
- ▶ Coût d'un dimensionnement
 - ▶ Matériel utilisé
 - ▶ Investissement des personnes
 - ▶ Temps nécessaire
 - ▶ A l'optimisation
 - ▶ A la construction des modélisations
- ▶ Qualité:
 - ▶ Proximité avec la réalité
 - ▶ Performances
 - ▶ Caractéristiques
 - ▶ Variabilité des variables (tolérances / incertitudes)



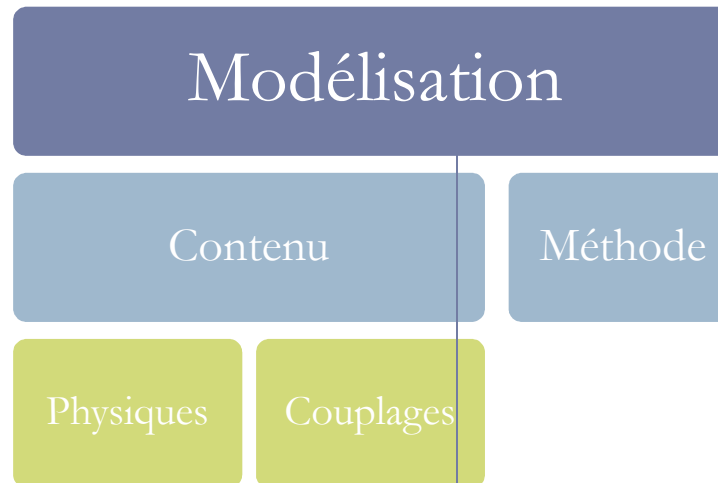
Travaux de recherche

Modélisation

Modélisation

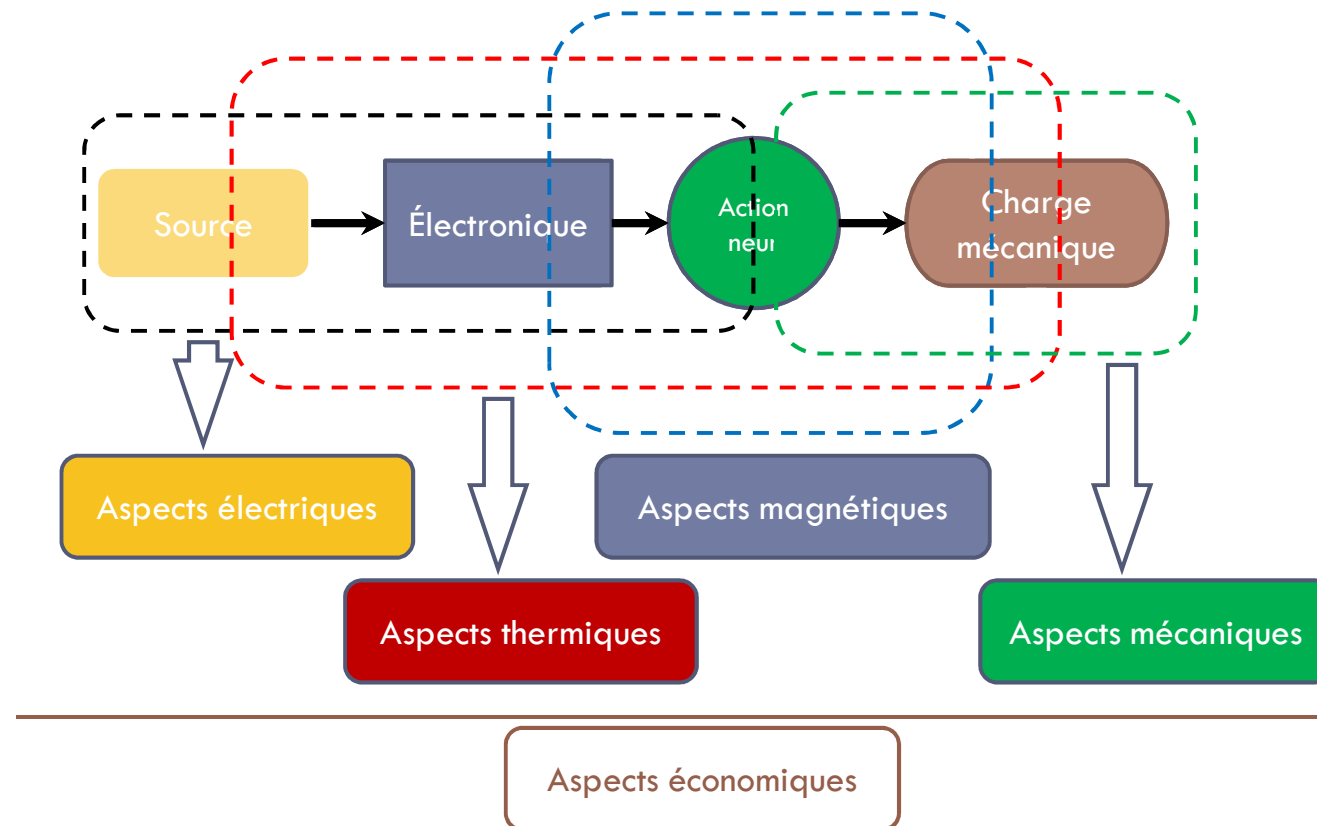


- Constitution d'une modélisation

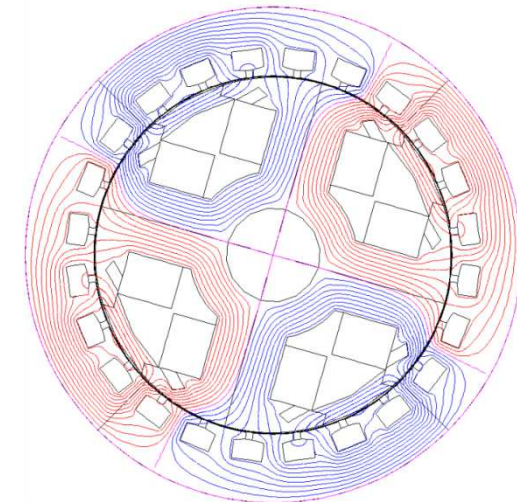
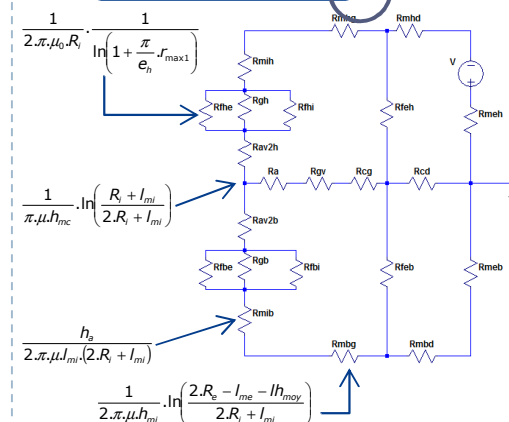
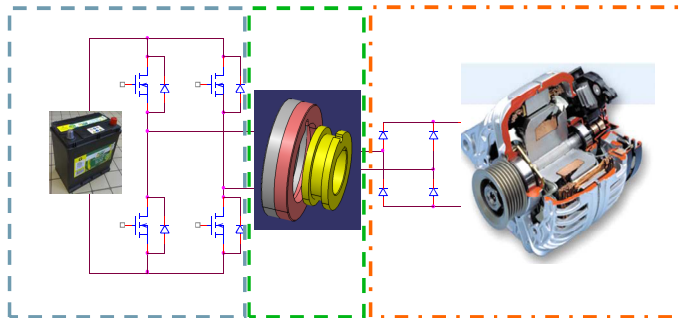
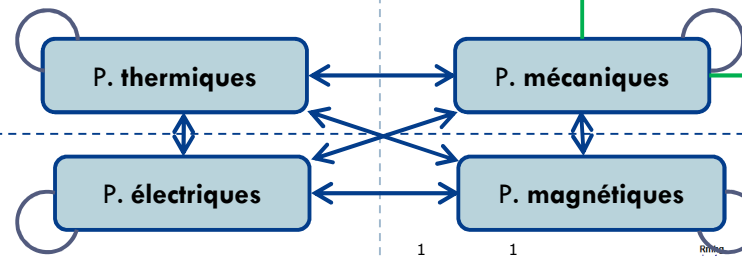
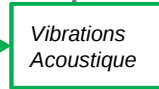
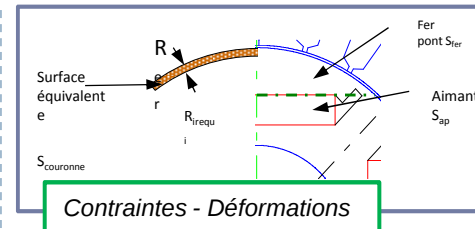
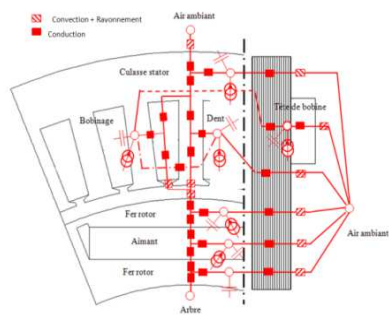


Les phénomènes physiques à prendre en compte Comment les prendre en compte ?

Modélisation – Quelles physiques ?



- ▶ Un modèle par phénomène physique
- ▶ **Une modélisation = Des modèles**

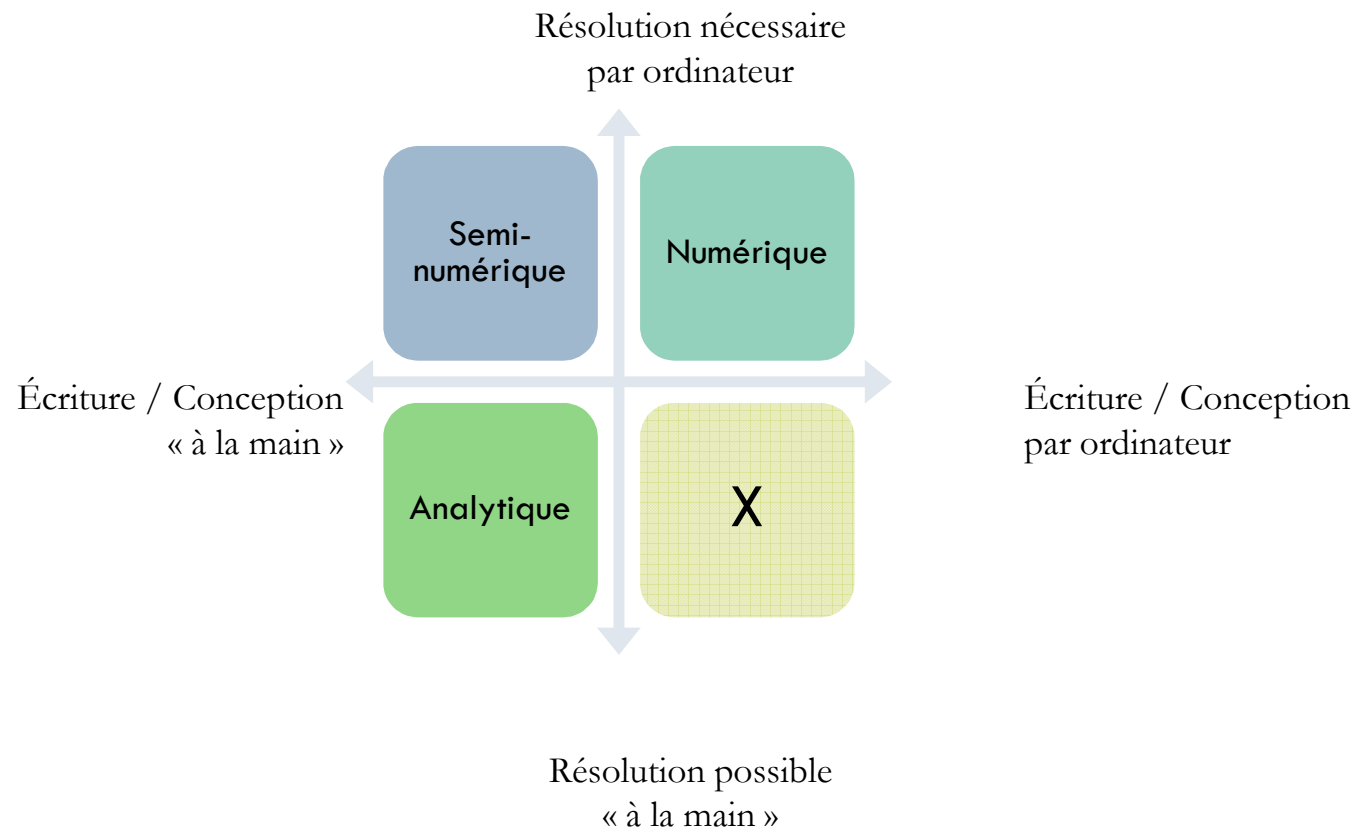


Modélisation - Méthodes

- ▶ Construction d'une modélisation
 - ▶ Une histoire de choix multiples
 - ▶ Des phénomènes physiques à considérer / De leur niveau de description
 - ▶ Des techniques mathématiques et informatiques permettant de les prendre en compte
 - ▶ De la nature des couplages à prendre en compte / De la manière dont ils sont décrits (*naturel, faible, fort*)
 - ▶ De préférence les bons ...
 - ▶ Relativement à un objectif d'efficacité
- ▶ Hypothèses de construction d'une modélisation
 - ▶ Le moins possible
 - ▶ Pour se rapprocher de la réalité modélisée
- ▶ Dans une finalité supérieure de dimensionnement
 - ▶ Par optimisation

Modèles - Méthodes

- Quelles méthodes pour quelles physiques ?



Modèles – Approche analytique

Avantages	Inconvénients
Rapide	Hypothèses nombreuses et lourdes
Dérivable	Peu précis
	Difficilement réutilisable

- ▶ Souvent indispensable:
 - ▶ Seule approche raisonnable (efficacité) pour le calcul de grandeurs secondaires
 - ▶ Pertes fer (formules de Steinmetz, Bertotti)
 - ▶ Donne des approximations utiles dans des configurations complexes
 - ▶ Inductances – Pertes dans les chignons
 - ▶ Est utilisée par d'autres approches de modélisation !
 - ▶ Calcul des résistances des méthodes nodales
- ▶ Pré-dimensionnement
- ▶ **Aide à la modélisation**

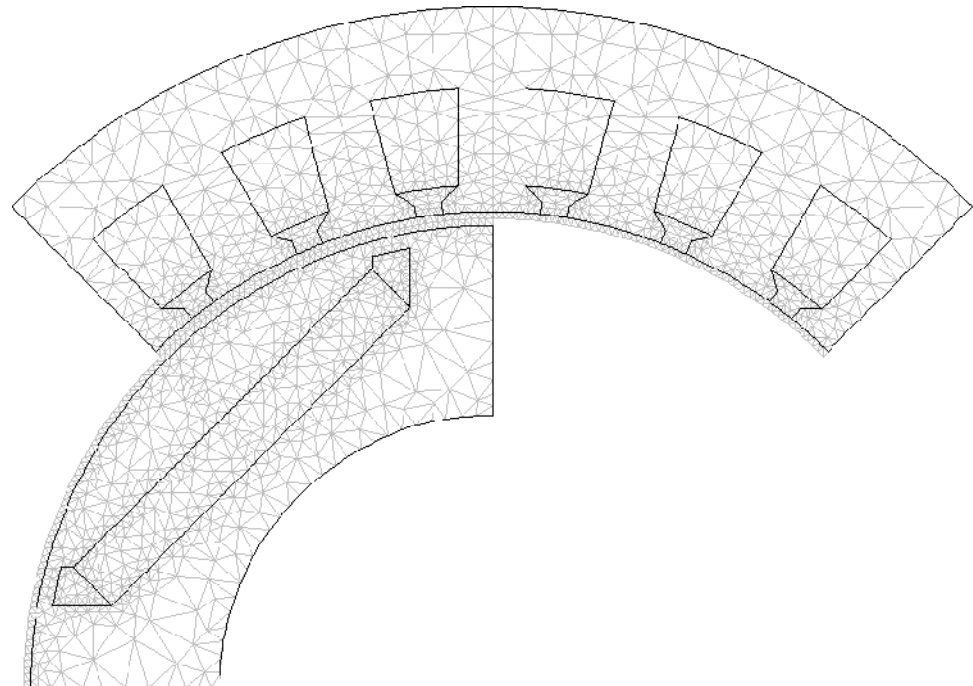
Modèles – Approche numérique

- ▶ Calcul de la solution physique en une multitude de points
- ▶ Méthodes avec ou sans maillage

Avantages	Inconvénients
Au plus proche de la réalité <i>(peu d'hypothèses)</i>	Coûteux à évaluer (3D - temporel)
Précis	Nécessite un environnement de calcul
Réutilisable	Difficulté pour la dérivation

- ▶ Méthode des Éléments Finis

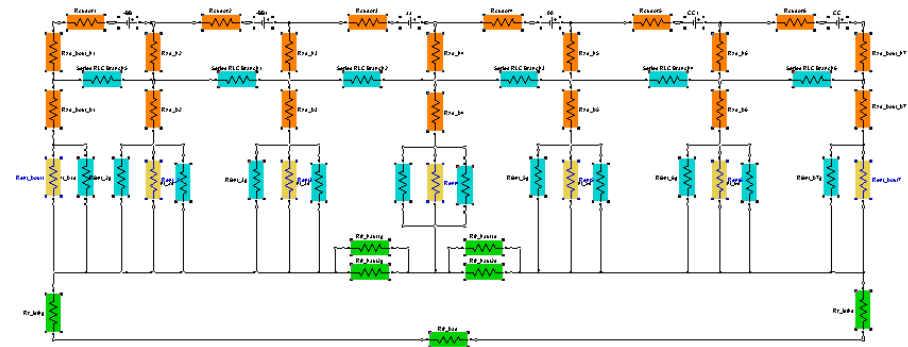
- ▶ **Modélisation de référence**
- ▶ **Permet la modélisation multiphysique des actionneurs**
 - ▶ **Magnétique**
 - ▶ **Thermique**
 - ▶ **Mécanique**



Modèles – A. semi-numérique

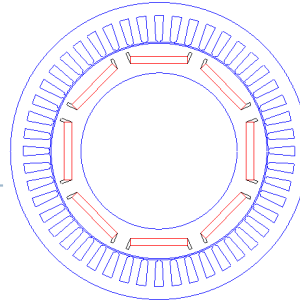
- ▶ Calcul de la solution physique par décomposition en tubes de flux
- ▶ Méthodes nodales
- ▶ Modélisation intermédiaire
- ▶ **Permet la modélisation multiphysique des actionneurs**
 - ▶ Électrique
 - ▶ Magnétique
 - ▶ Thermique
- ▶ **Offre une solution intéressante à la modélisation tridimensionnelle**
 - ▶ Magnétique
 - ▶ Thermique

Avantages	Inconvénients
Aussi proche de la réalité <i>Que l'on veut</i>	Coûteux et délicat à construire <i>(pb des flux non canalisés)</i>
Aussi précis <i>Que l'on veut</i>	Nécessite un environnement de calcul
	Difficilement réutilisable



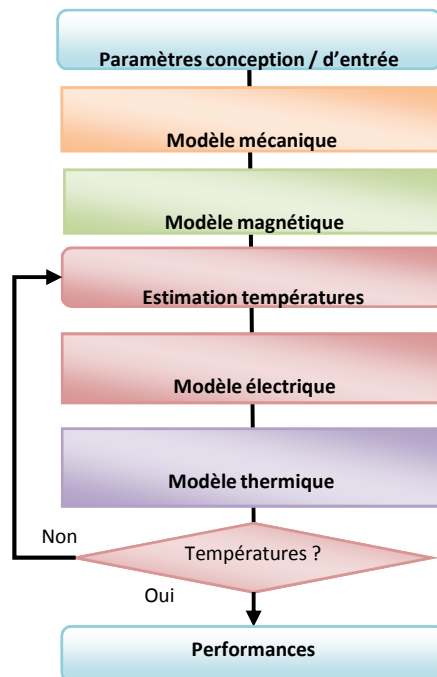
MSAPI - Réseau de reluctance axe q

Modélisation - Exemple



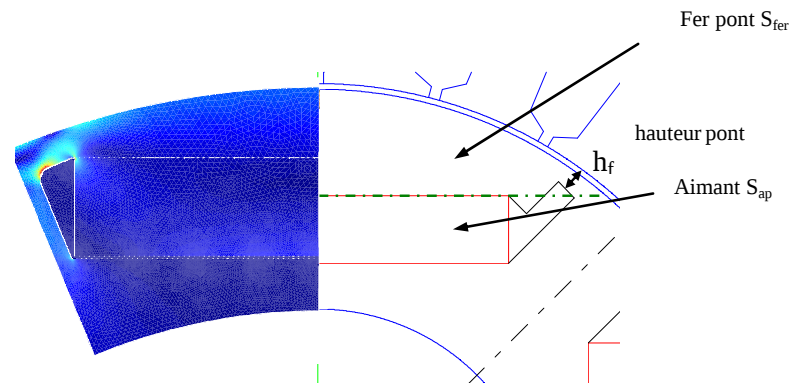
► Projet M2EI

- Modélisation multiphysique – MSAPI
- Fonction alerno-démarreur
- Enchainement des modèles
 - Couplages naturels et faibles



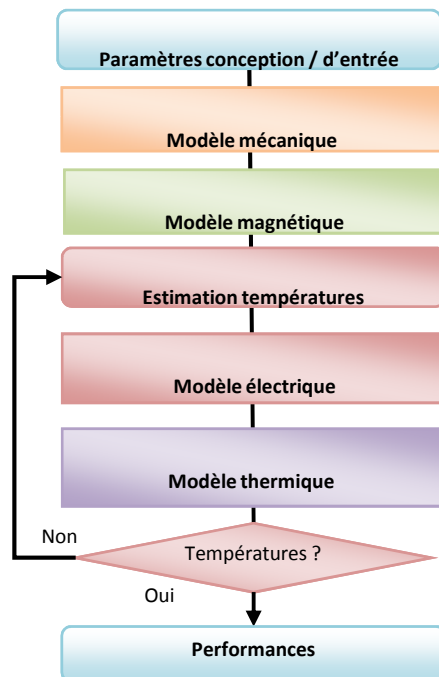
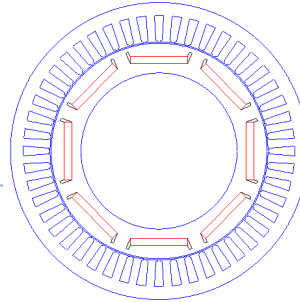
► Modèle mécanique

- Calcul statique de résistance du pont magnétique aux forces centrifuges
- Rôle de vérification de ce critère



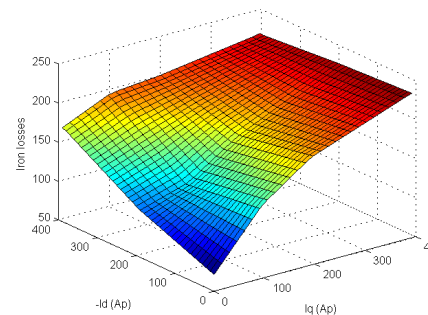
Modélisation - Exemple

► Projet M2EI

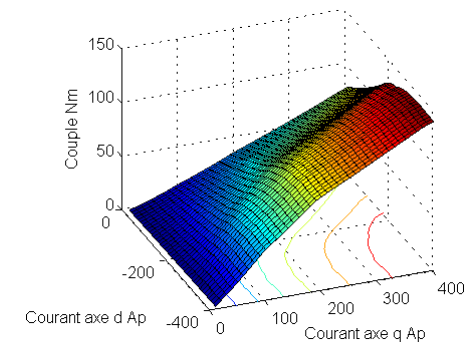


► Modèle magnétique

- Approche combinée 2 axes dq (Park)
- Cartographique de flux
- Évaluation des grandeurs magnétiques
 - Couple / Pertes fer, ...



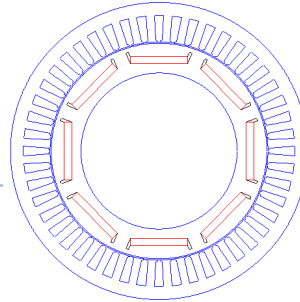
Pertes fer



Couple

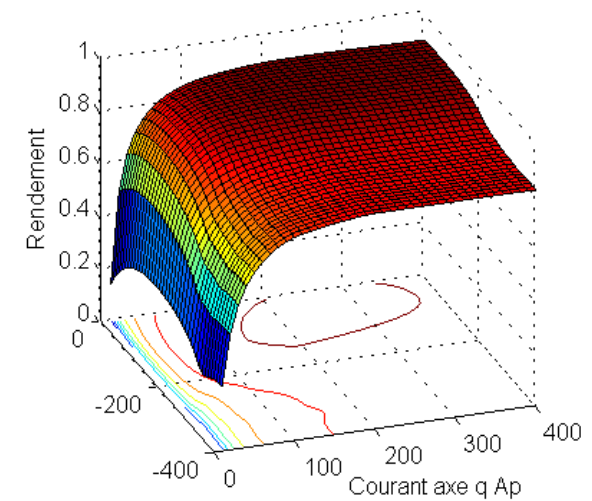
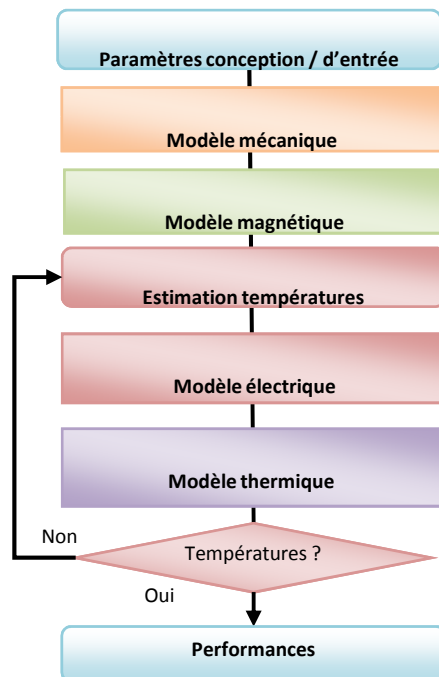
Modélisation - Exemple

► Projet M2EI



► Modèle électrique

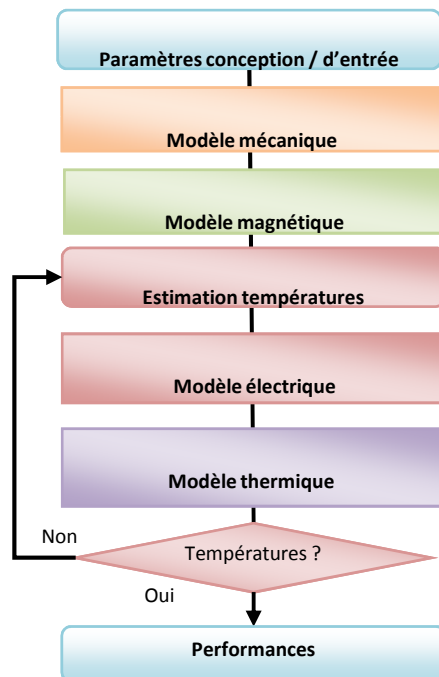
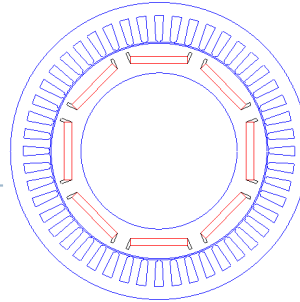
- Basé sur la cartographie de flux
- Génération d'une commande (grandeurs électriques)
 - Rendement maximal



Rendement

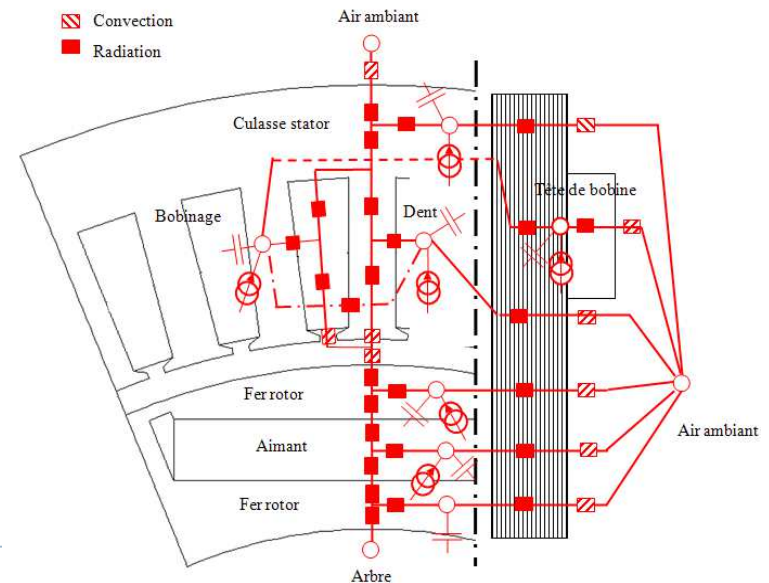
Modélisation - Exemple

► Projet M2EI

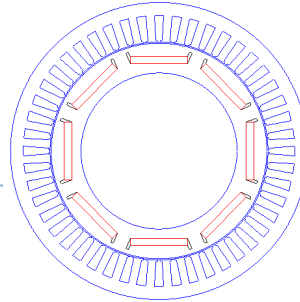


► Modèle thermique

- Modèle nodal tridimensionnel non linéaire
- Estimations analytiques:
 - Des coefficient de conduction de bobinage
 - Des coefficient de convection (*entrefer, ailettes, chignon, ...*)

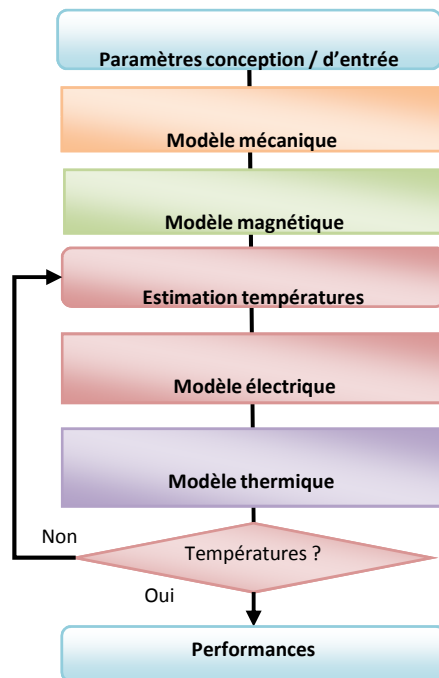


Modélisation - Exemple

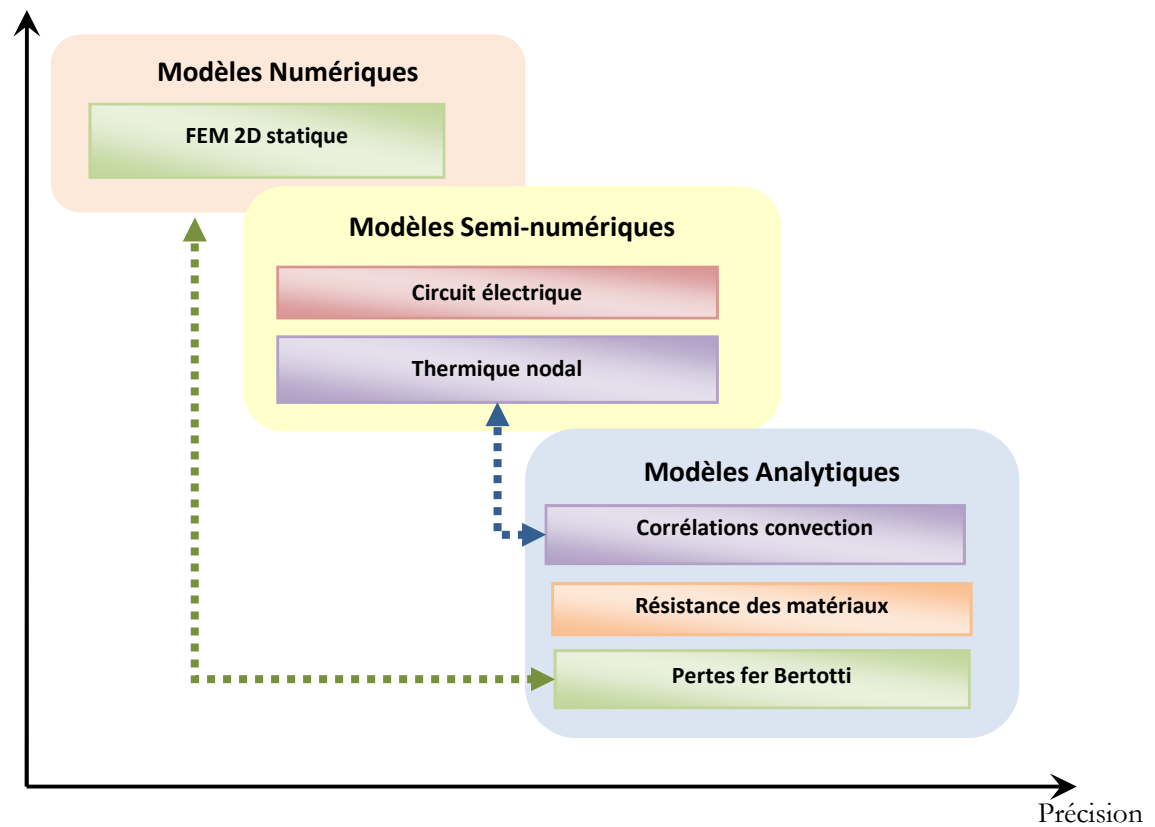


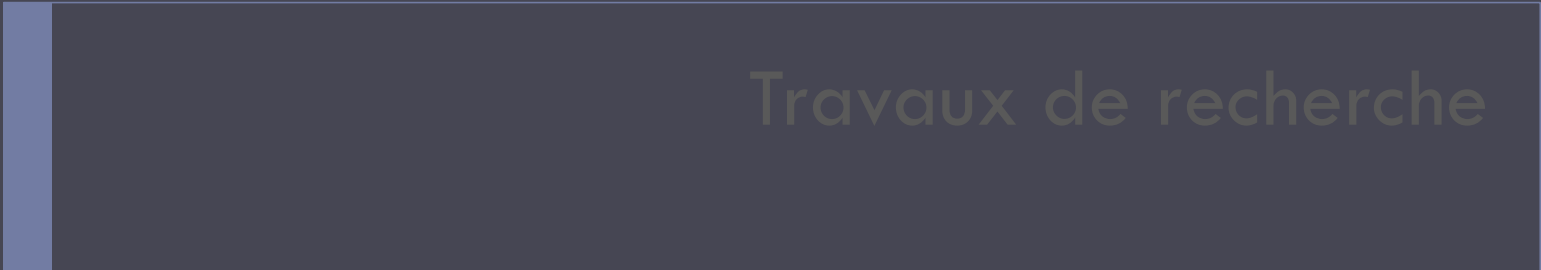
► Projet M2EI

► Types de modèles



Temps de calcul



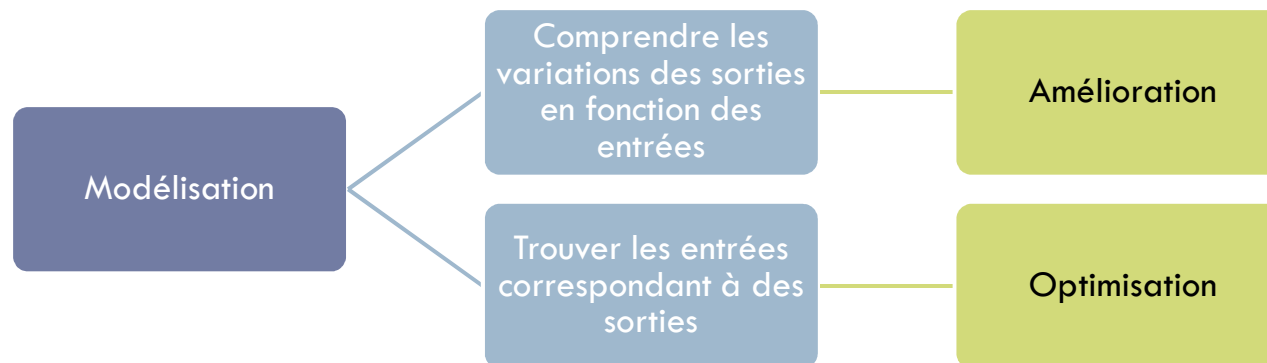
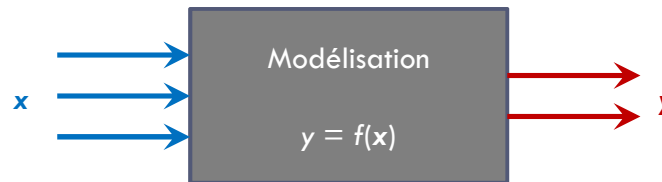


Travaux de recherche

Dimensionnement par Optimisation

Dimensionnement...

- Utilisation d'une modélisation d'un système

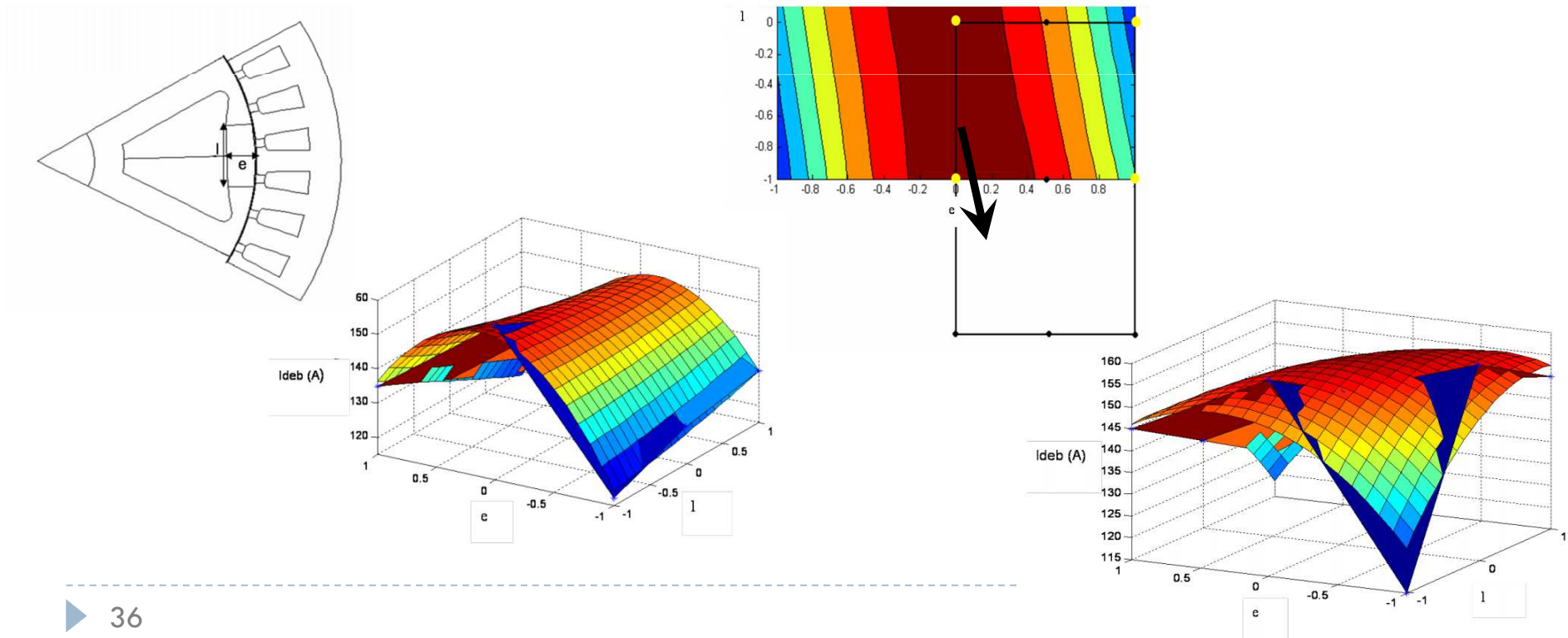


Amélioration

- ▶ **Comprendre et évaluer** les variations des sorties en fonction des entrées
- ▶ Pourquoi ?
 - ▶ Les modélisations (multiphysiques) sont complexes
 - ▶ Les liaisons entre les entrées et les sorties sont difficiles
 - ▶ A apprécier / A quantifier
- ▶ Nécessité d'outils supplémentaires aider à la compréhension des liaisons entre variables
- ▶ Méthode des Plans d'Expériences
 - ▶ Détermination d'une liaison mathématique simple entre les entrées et les sorties
- ▶ Réalisation d'une série d'expériences différentes (*plan d'expériences*)
 - ▶ Ensemble de modalités de valeurs des entrées
- ▶ Déduction des valeurs des sorties pour ces valeurs d'entrées

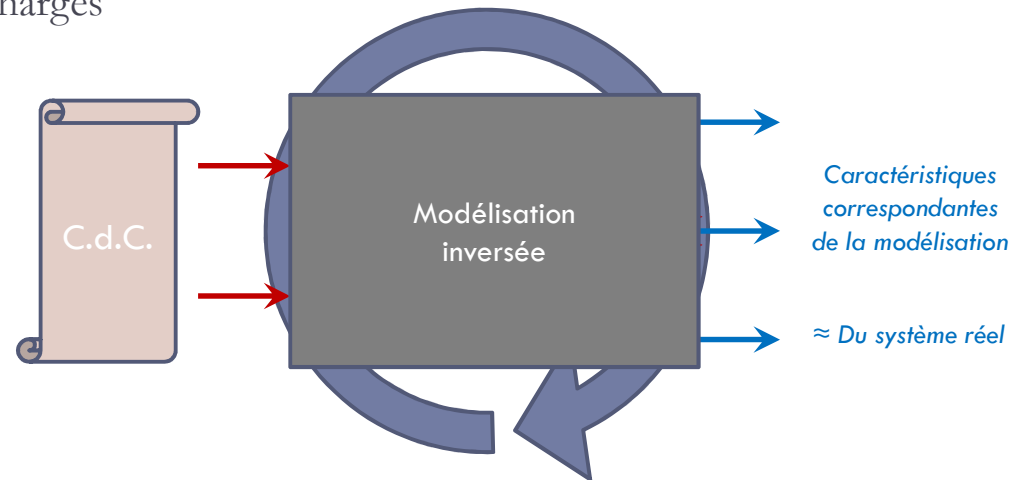
Amélioration

- ▶ Méthode des Plans d'Expériences – Surfaces de réponses
 - ▶ Prise en compte des variations des sorties en fonction des entrées jugées influentes
 - ▶ Fonctions de liaisons polynomiales
 - ▶ 1^{er} ordre / 2nd ordre
 - ▶ Leur simplicité permet de déduire des directions privilégiées d'améliorations possibles

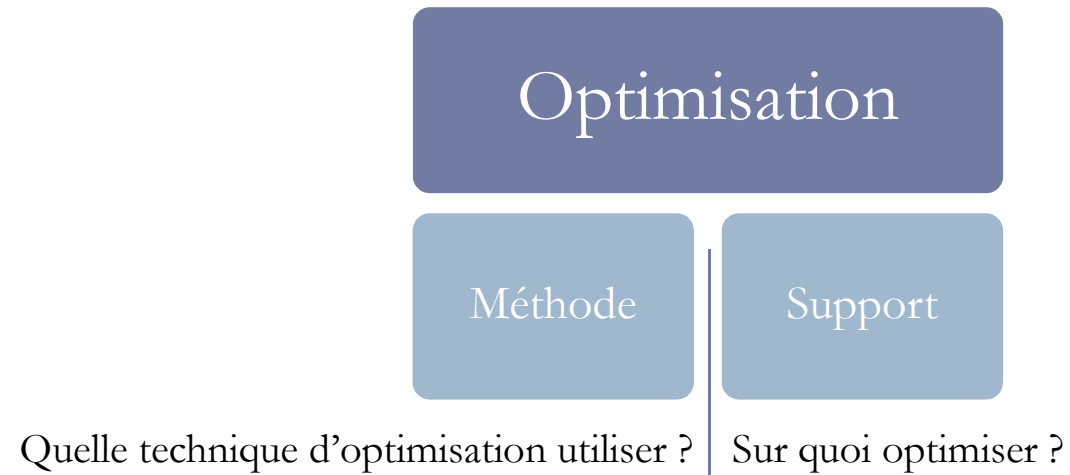


Amélioration → Optimisation

- ▶ Amélioration
 - ▶ Processus simple
 - ▶ Généralement en 1 étape
 - ▶ Ne garantit pas l'augmentation des performances...
- ▶ Extension du concept: **Optimisation**
 - ▶ Tout faire pour bénéficier d'améliorations effectives des performances
 - ▶ Itératif, convergent
 - ▶ Processus plus complexe
- ▶ But: Déterminer la bonne (meilleure ?) définition d'un système tel qu'il présente les performances attendues
 - ▶ Selon un cahier des charges

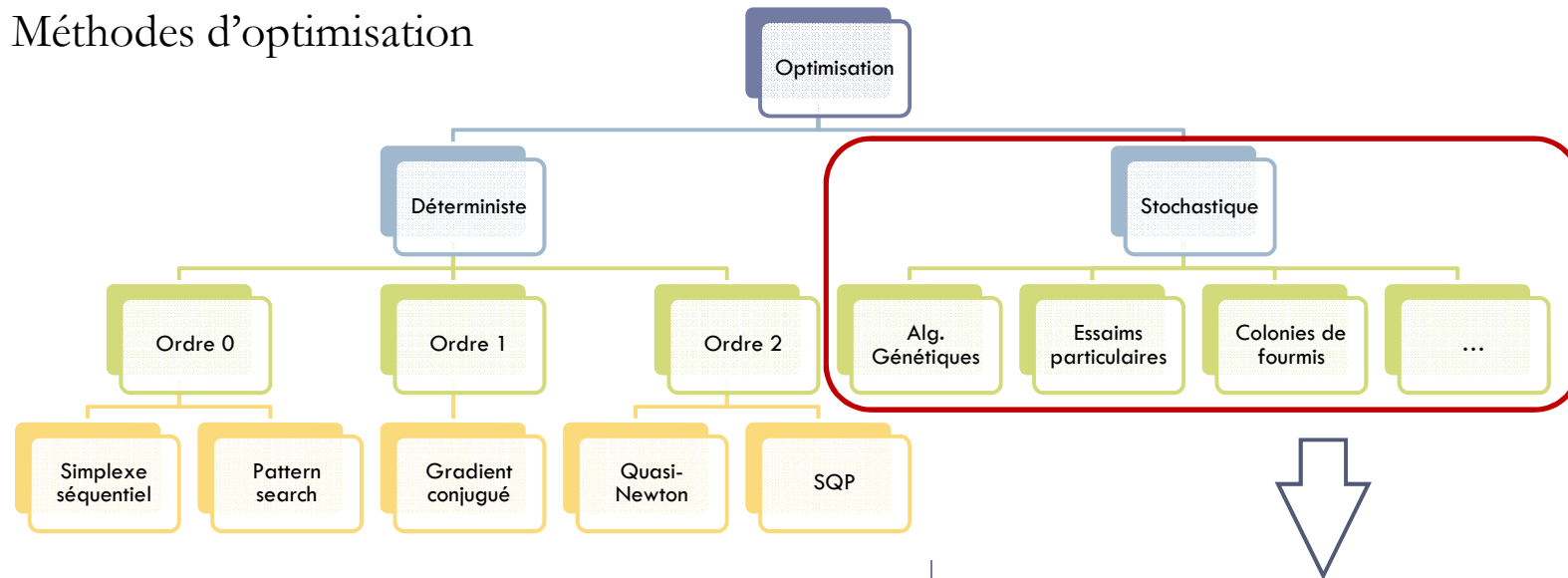


Optimisation



Optimisation- Méthodes

► Méthodes d'optimisation



Avantages	Inconvénients
« Unicité » de la solution	Coût limité
Optimum local	Précises
	Simples à régler

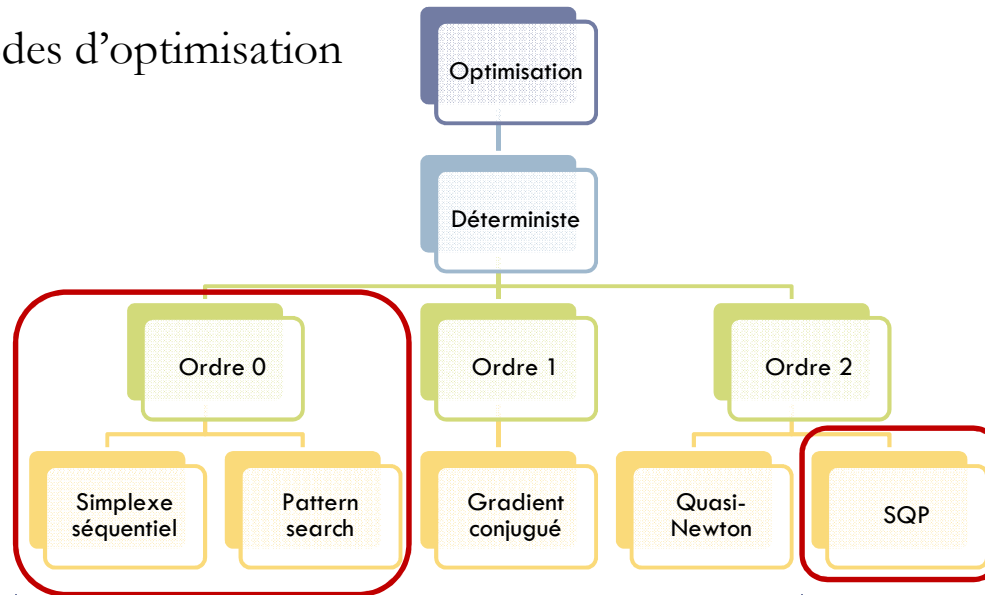
► Voie privilégiée

Avantages	Inconvénients
Exhaustivité de la recherche	(Très) coûteuses
Ensemble de solutions (Plusieurs optimums – Ensemble de Pareto)	Peu précises
Optimum global	Délicates à régler

► Voie non utilisée

Optimisation- Méthodes

► Méthodes d'optimisation



► Ordre des dérivées utilisées

Avantages	Inconvénients
Robustes <i>(peu sensibles au bruit numérique)</i>	Coût moyen
Facilement projetables sur des grilles <i>(incertitudes)</i>	Prise en compte des limites

► Voie privilégiée

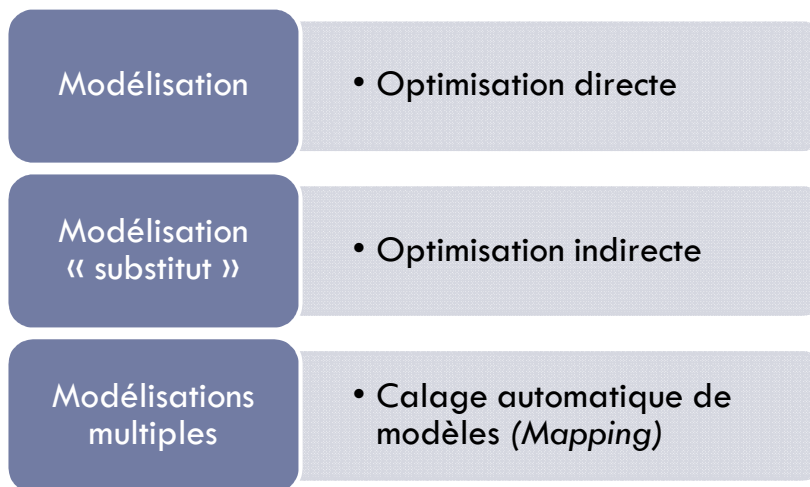
Avantages	Inconvénients
Coût faible	Moins robustes
	Respect des limites <i>(lagrangien augmenté)</i>

► Solution utile

Optimisation - Supports

- ▶ Supports d'optimisation

- ▶ Sur quoi appliquer les méthodes d'optimisation ?
- ▶ Comment choisir ?



- ▶ Modélisations de faible coût

- ▶ Relations analytiques
- ▶ Réseaux nodaux simples
- ▶ Peu de couplages

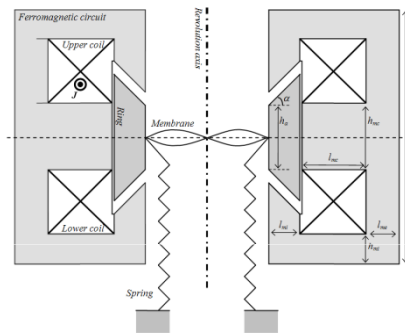
- ▶ Modélisations lourdes

- ▶ Approches numériques
 - ▶ 3D / temporelles
- ▶ Couplages prépondérants

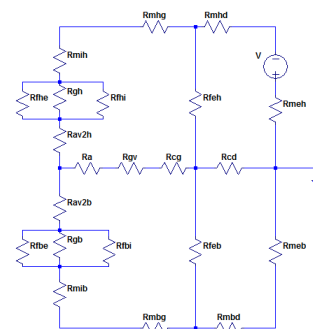
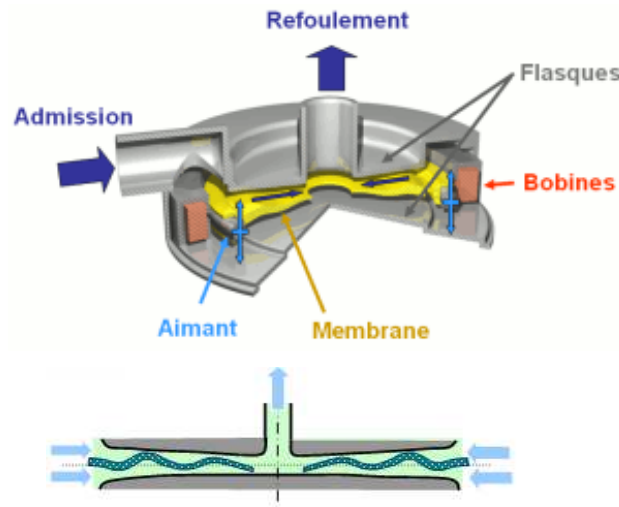
Optimisation directe

- La modélisation est utilisée directement pour calculer les sorties (performances) en fonction des entrées (caractéristiques) du système modélisé

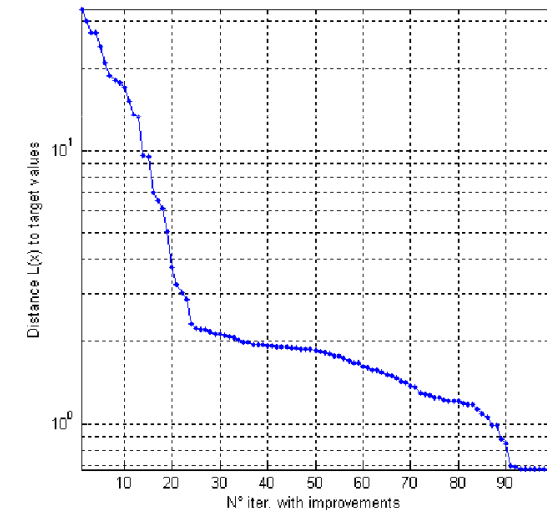
Avantages	Inconvénients
Accès direct à la modélisation (<i>fiable</i>)	Selon la modélisation, coût pouvant être important
Ne nécessite rien d'autre	



Structure axisymétrique résonnante



Modèle nodal magnétique



Optimisation par l'algorithme du Simplexe Séquentiel

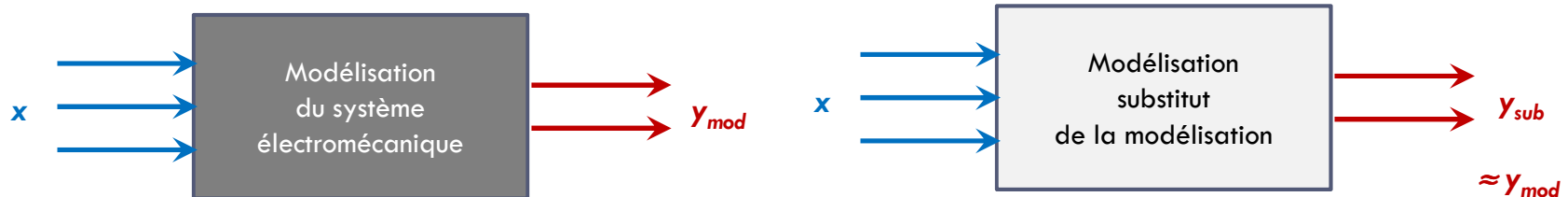
[350 évaluations – 24min 33s]

Optimisation indirecte

- ▶ L'optimisation directe est trop coûteuse dès que les coûts des évaluations de la modélisation deviennent trop élevés...

Avantages	Inconvénients
Accélération du processus d'optimisation	Nécessite la construction du substitut
Compréhension des liens entrées – sorties (Meth. Plans d'Exp.)	(Faible) Qualité du substitut pour un nombre d'entrées important

- ▶ Substitution à la modélisation (*multiphysique, proche de la réalité*) :
- ▶ Un objet mathématique équivalent, (plus) **rapide**:
 - ▶ Modélisation substitut
 - ▶ Calculé à partir d'évaluations de la modélisation



- ▶ Solution appliquée partiellement
 - ▶ Sur les parties électriques et magnétiques (*cartographies de flux*)

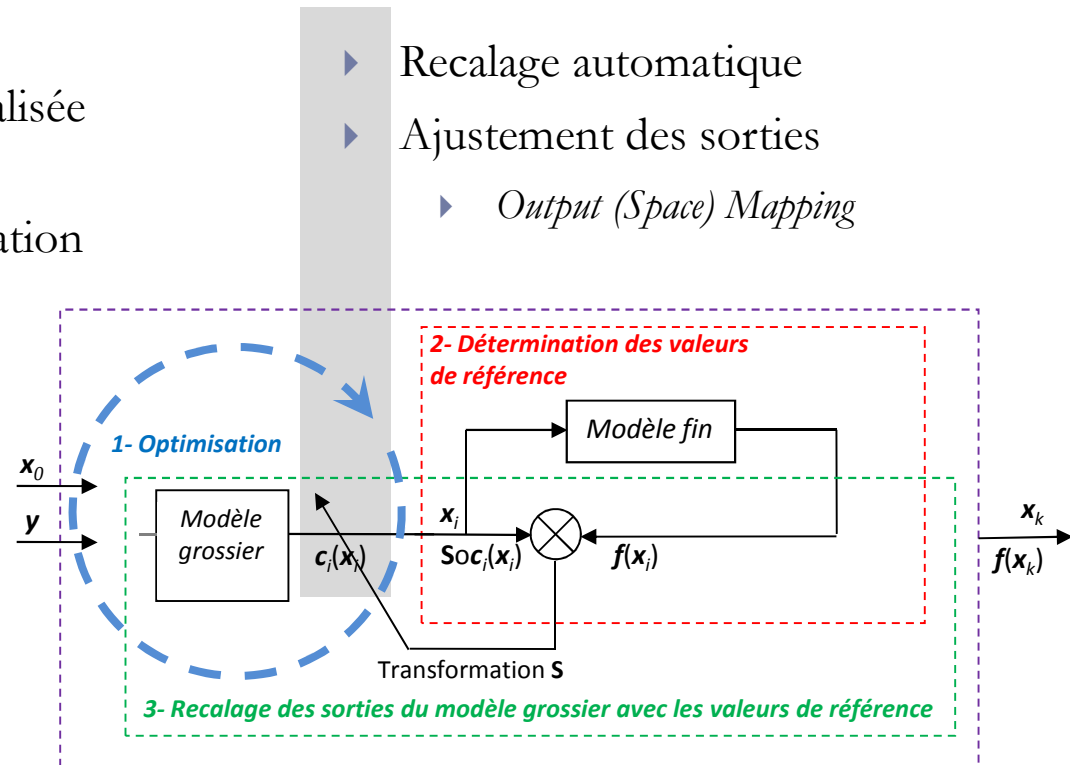
Optimisation multi-modélisations

- ▶ La modélisation est très lourde: le nombre de ses évaluations doit être limité au maximum
- ▶ Ses résultats (fiables par hypothèse) sont exploités
- ▶ Modélisation « *fine* »

Avantages	Inconvénients
Ne fait pas de compromis précision/rapidité	Nécessite la construction d'une seconde modélisation
(Seule ?) solution exploitable pour les modélisations lourdes	Repose sur plusieurs optimisations internes successives

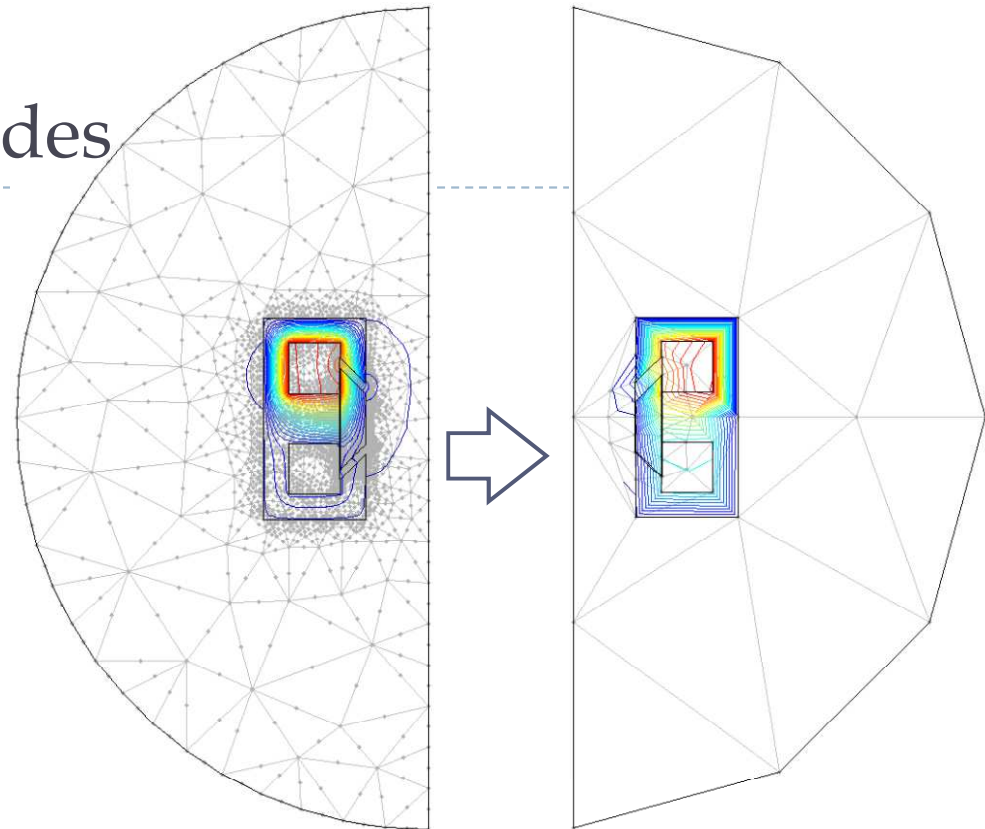
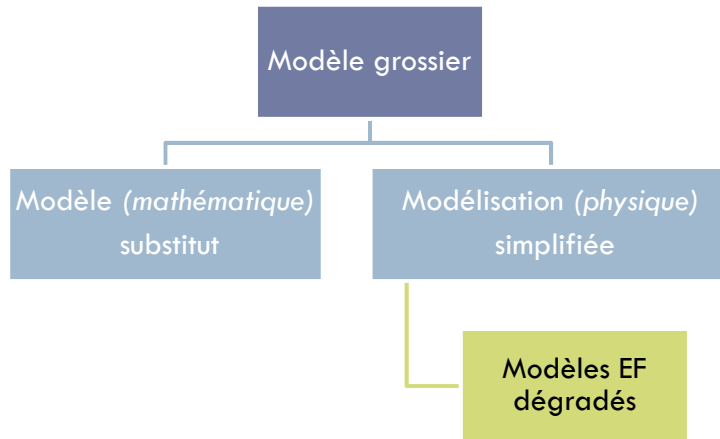
- ▶ L'optimisation ne peut pas être réalisée sur la modélisation
- ▶ Utilisation d'une seconde modélisation rapide
- ▶ Modélisation « *grossière* »

- ▶ Approche de *Space Mapping*



Modèles physiques rapides

► Nature du modèle grossier ?



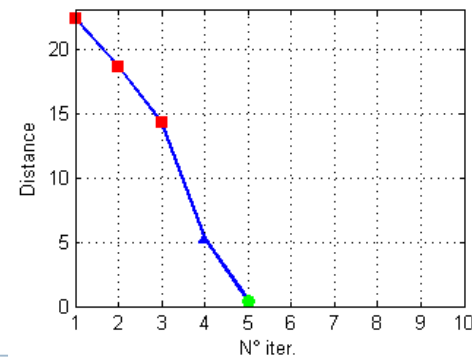
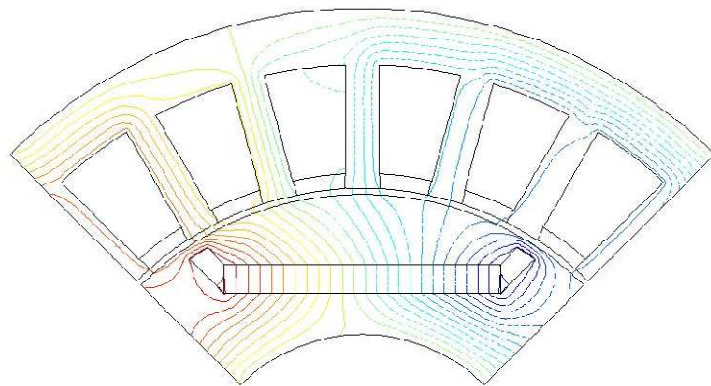
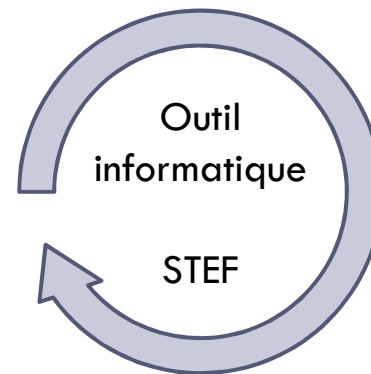
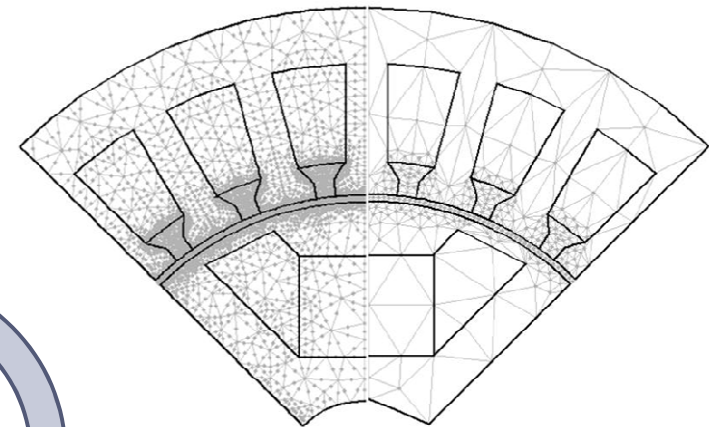
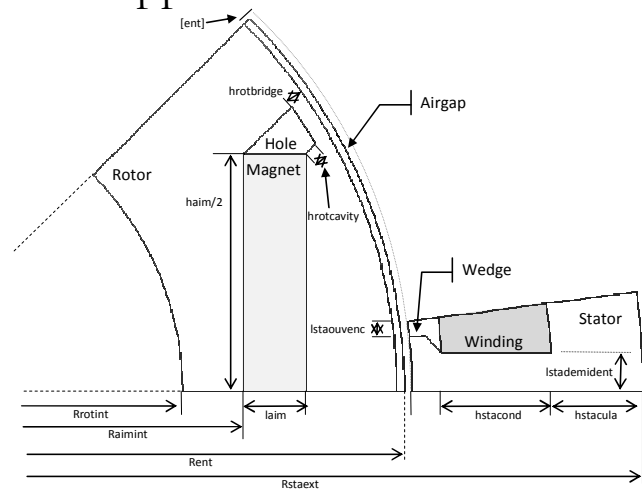
► Degrés de liberté

- Maillage
 - Nombre de nœuds / éléments
 - Type d'éléments
- Précision de la solution
- Matériaux
 - Non linéarité → linéarité
- Propriétés physiques
- Couplages

	Modèle fin	Modèle grossier	Ratio
Nb nœuds	6830	77	1/89
Nb éléments	3366	142	1/24
Type élément	Triangulaire 6 nœuds (T6)	Triangulaire 3 nœuds (T3)	-
P.e.c. infini	Transformation de Kelvin	Condition asymptotiques	-
Tps résolution	3.1 s	0.033 s	1/94
Tps construction + résolution	4.3 s	0.068 s	1/63

Space Mapping

- Application sur le dimensionnement d'une MSAPI



Convergence - Output SM

Modèle fin: 5 évaluations

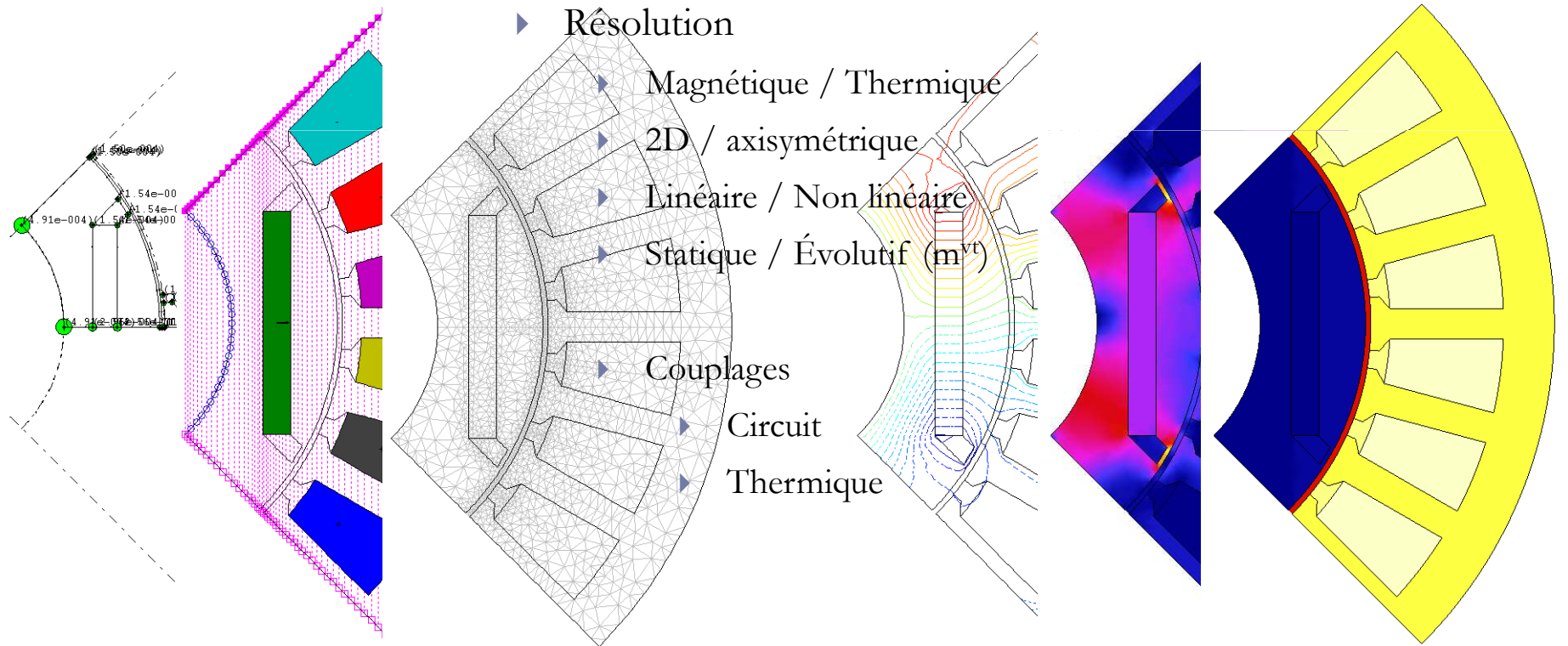
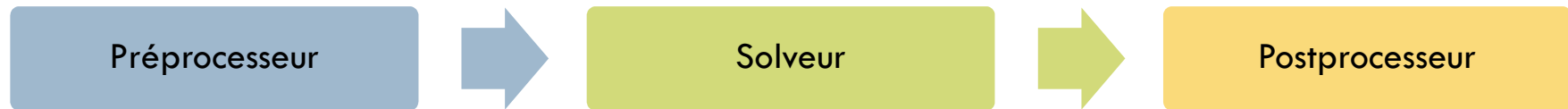
Modèle grossier: 1748 év.

[10 min 59s]

STEF

▸ Solveur Temporel Éléments Finis

▸ Matlab





Bilan & Perspectives

Bilan

- ▶ Le dimensionnement: Répondre à de nombreux compromis - Faire des choix
 - ▶ Modélisation / Optimisation
- ▶ Ces travaux: Une sélection parmi les outils existants
 - ▶ Critère supplémentaire: **efficacité** de la démarche de dimensionnement
- ▶ Modélisation
 - ▶ Multiphysique / Multi modèles
 - ▶ Nature des modèles dépend de la physique décrite
- ▶ Optimisation
 - ▶ Méthodes déterministes
 - ▶ Méthodes les plus robustes
 - ▶ Space Mapping
- ▶ Choix réalisés, compte tenu:
 - ▶ Des types de problèmes considérés (*essentiellement 2D*)
 - ▶ Des outils informatiques → STEF

Perspectives

- ▶ Peut-on aller plus loin ?
- ▶ Considérer des modélisations naturellement (très) lourdes
 - ▶ Machines tridimensionnelles
 - ▶ Problèmes temporels / avec mouvement
 - ▶ Prise en compte des aspects vibrations / acoustiques
 - ▶ Intégration d'informations issues de mesures
 - ▶ ...
- ▶ Prendre en compte des incertitudes
 - ▶ Dans la modélisation
 - ▶ Transmission des incertitudes des entrées sur les sorties
 - ▶ Au cours de l'optimisation
- ▶ [Exploiter la technologie...]

Merci de votre attention

