

## Développement d'outils de conception de Machines polyphasées à aimants basés sur l'Approche multimachine



*Franck SCUILLER, Institut de Recherche de l'Ecole Navale*

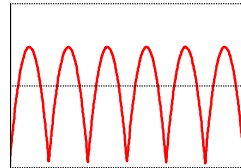
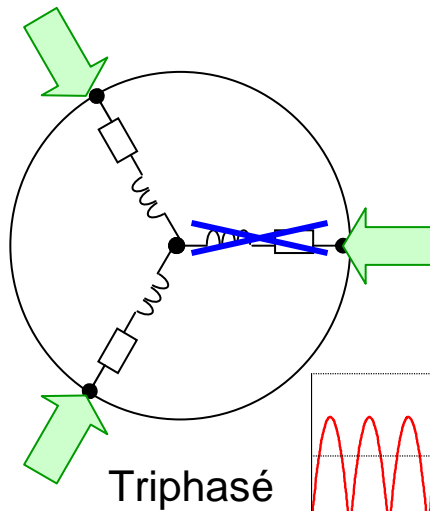
### Encadrement

*Jean-Frédéric CHARPENTIER (IRENav), Eric SEMAIL (L2EP), Stéphane CLENET (L2EP)*

# Introduction

## Contexte

### Développement d'outils de conception de Machines polyphasées à aimants basés sur l'Approche multimachine



**Forte puissance**

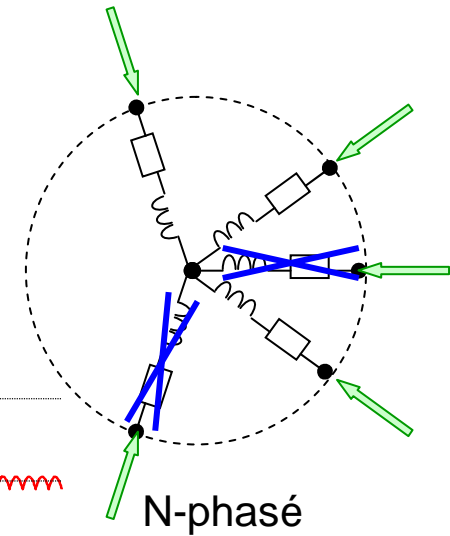
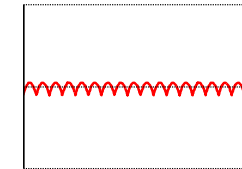
Fractionnement de la puissance

**Sureté de fonctionnement**

Fonctionnement en marche dégradée

**Discrétion acoustique**

Qualité du couple



BPC Mistral

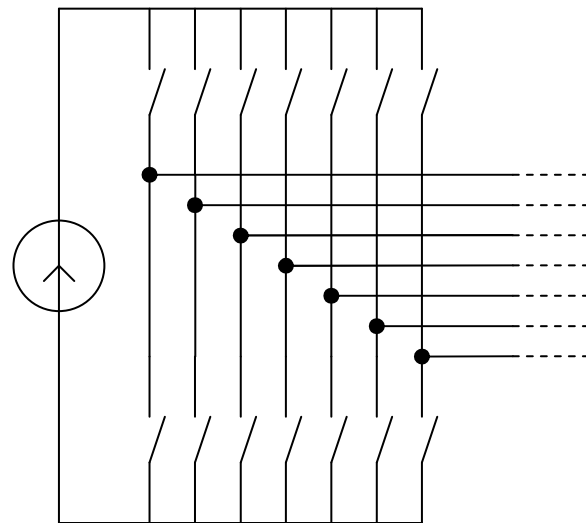
- Automobile
- Traction ferroviaire
- Propulsion Navale**

Sous-marin Scorpène



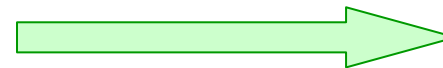
# Introduction Problématique

Développement d'outils de conception de  
Machines polyphasées à aimants basés sur  
l'Approche multimachine

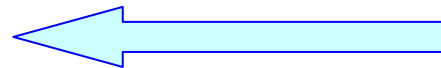


Onduleur de tension

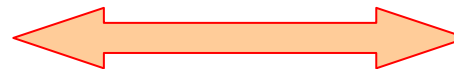
Alimentation d'un système  
fortement couplé



Contraintes

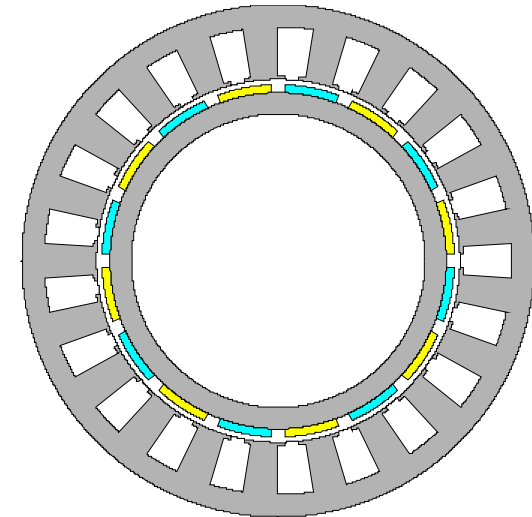


Conception adaptée



**ANALYSER**

{ constantes de temps d'ordres de  
grandeur différents }



Machine polyphasée à  
aimants déposés

Développer des démarches de conception basées sur la décomposition multimachine

# Introduction

## Plan de la présentation

### Décomposition Multimachine

- Description (SEMAIL-2000, KESTELYN-2003)
  - Analyse du comportement de l'ensemble convertisseur-machine en alimentation MLI (ROBERT-DEHAULT-2003)
    - Stratégies d'alimentation et de conception (PARSA-2003, MARTIN-2003)

### Conception Multimachine

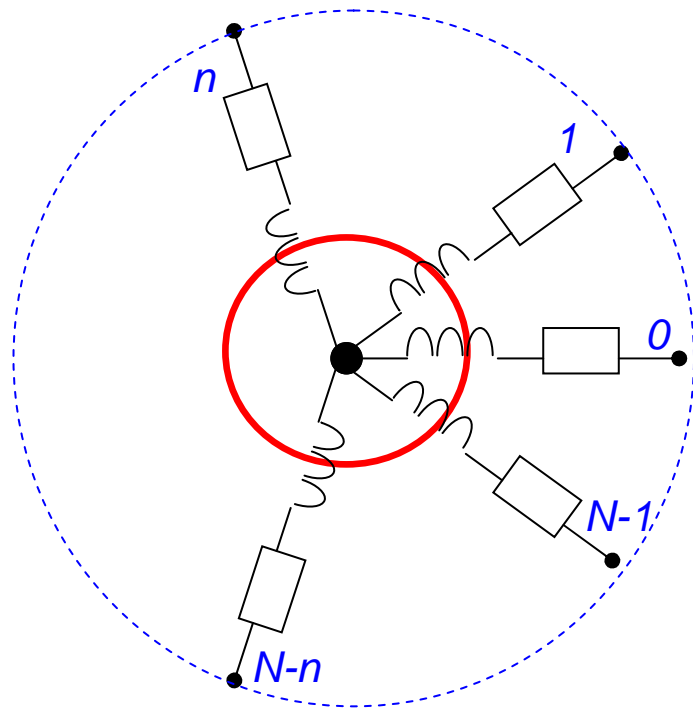
- Objectifs et grandeurs de conception
  - Démarche de conception choisie
    - Moyens nécessaires pour la mettre en œuvre

### Bobinage Multimachine

- Modélisation du bobinage
  - Bobinage fictif et propriétés associées
    - Liens avec les grandeurs de machines fictives
      - Exemple

## Hypothèses

- Machine à  $N$  phases identiques et régulièrement décalées
- Entrefer lisse
- Saturation non prise en compte (modèle linéaire)



Matrice d'inductance  
symétrique et circulante

$$\begin{pmatrix} \phi_{ss,0} \\ \phi_{ss,1} \\ \dots \\ \phi_{ss,N-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_0 & m_1 & \dots & m_{N-1} \\ m_{N-1} & m_0 & \dots & m_{N-2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_1 & m_2 & \dots & m_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_0 \\ i_1 \\ \dots \\ i_{N-1} \end{pmatrix}$$

Transformation orthonormale  
(Fortescue, Concordia)

$$M_{ss} = {}^t P \cdot \text{diag}(M_0, \dots, M_k, \dots, M_{N-1}) \cdot P$$

espaces propres orthogonaux  
droites ou plans

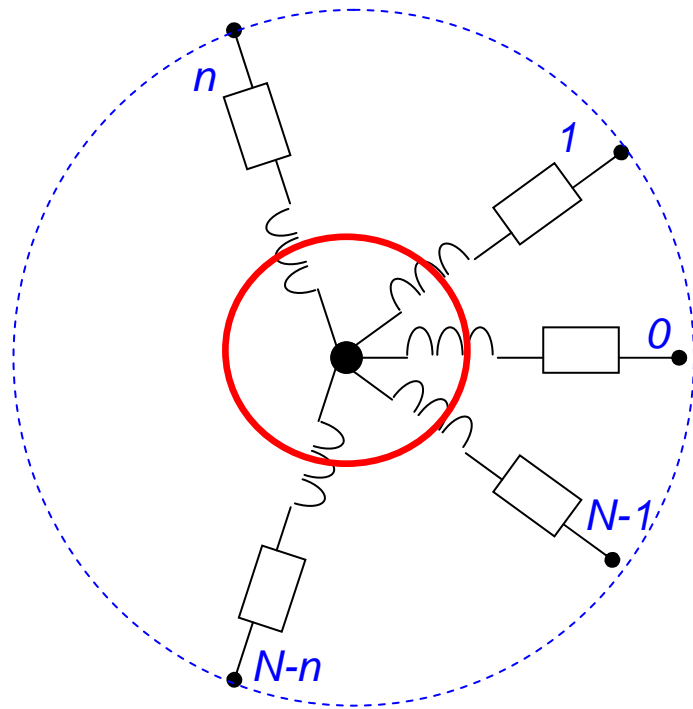
Equations projetées dans les  
espaces propres sont découplées

# Décomposition multimachine

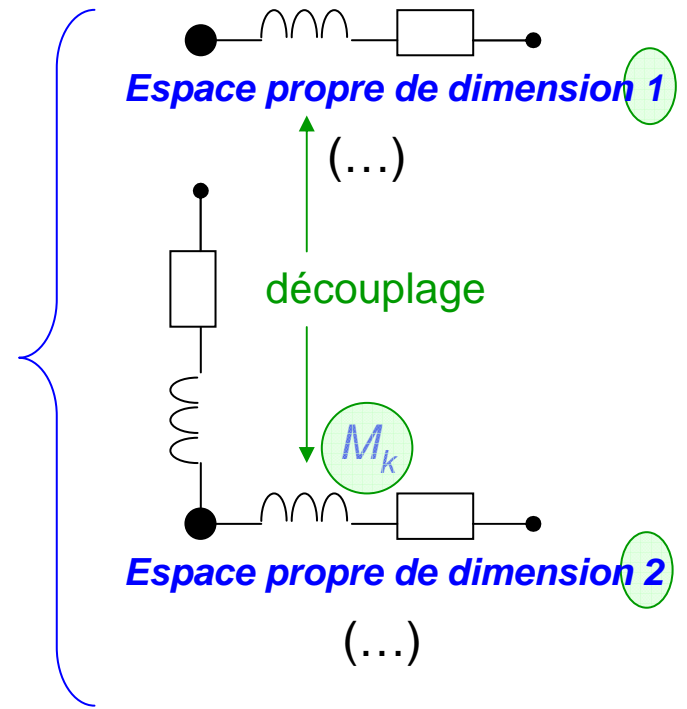
## Construction des Machines fictives

Machine à  $N$  phases identiques régulièrement décalées et à entrefer lisse

$N_f$  machines fictives monophasées et diphasées, magnétiquement découplées, mécaniquement couplées



Transformée orthonormale  $P$   
 Concordia généralisée  $C_N$

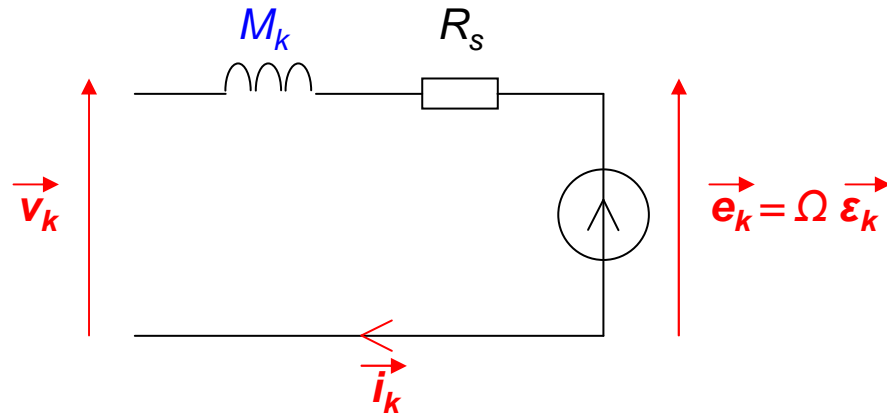


Equations projetées dans les espaces propres sont découplées

Assimilation de chaque espace propre à une machine fictive

# Décomposition multimachine

## Grandeurs de Machines fictives



$$P_k = \vec{v}_k \cdot \vec{i}_k$$

$$T_k = \vec{\epsilon}_k \cdot \vec{i}_k$$

Projection des grandeurs électromagnétiques vectorielles de phase sur l'espace propre de définition (inductance cyclique  $M_k$ )

- Vecteur tension de phase  $\vec{v}$   $\longrightarrow$  Vecteur tension fictive  $\vec{v}_k$
- Vecteur fem de phase  $\vec{e}$   $\longrightarrow$  Vecteur fem fictive  $\vec{e}_k$
- Vecteur courant de phase  $\vec{i}$   $\longrightarrow$  Vecteur courant fictif  $\vec{i}_k$

Vecteurs propres orthonormaux : conservation du produit scalaire

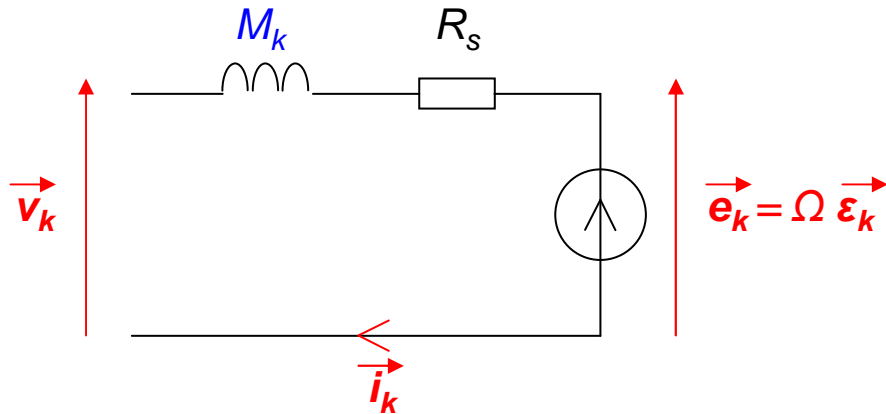
- Puissance totale  $P$
- Couple EM total  $T$

$$P = \vec{v} \cdot \vec{i} = \sum \vec{v}_k \cdot \vec{i}_k$$

$$T = \vec{\epsilon} \cdot \vec{i} = \sum \vec{\epsilon}_k \cdot \vec{i}_k$$

# Décomposition multimachine

## Notion de famille d'harmoniques



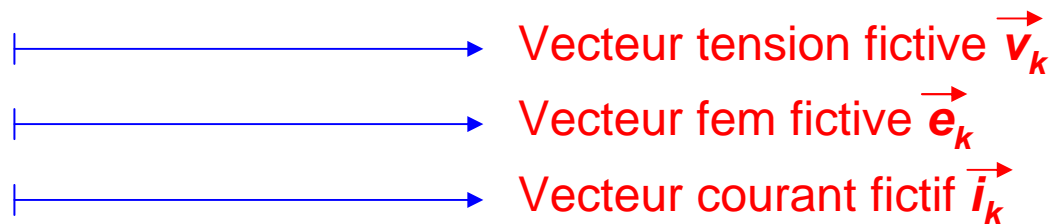
$$P_k = \vec{v}_k \cdot \vec{i}_k$$

$$T_k = \vec{\epsilon}_k \cdot \vec{i}_k$$

$$F_N(M_k) = ZN \pm k$$

Projection des grandeurs électromagnétiques vectorielles de phase sur l'espace propre de définition (inductance cyclique  $M_k$ )

- Vecteur tension de phase  $\vec{v}$
- Vecteur fem de phase  $\vec{e}$
- Vecteur courant de phase  $\vec{i}$



Vecteurs périodiques

DSF

Familles d'harmoniques

Distribution des harmoniques





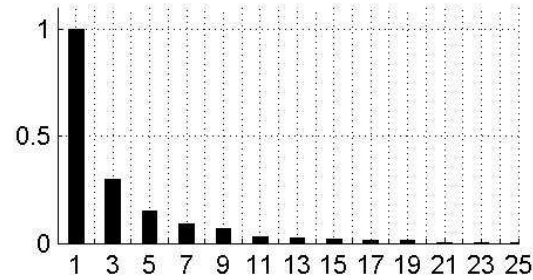
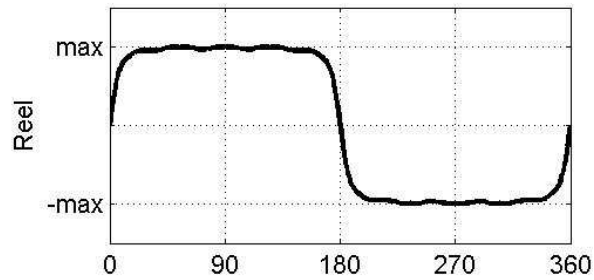
# Décomposition multimachine

## Notion de famille d'harmoniques

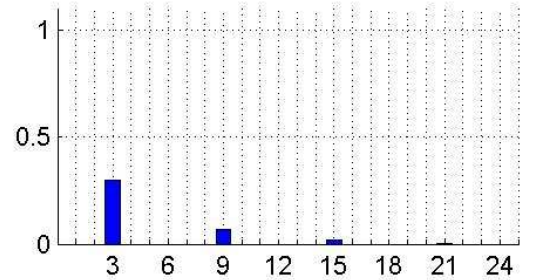
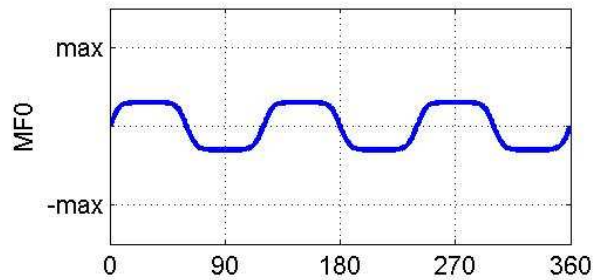


Exemple d'une machine triphasée  $N = 3$

$N_f = 2$

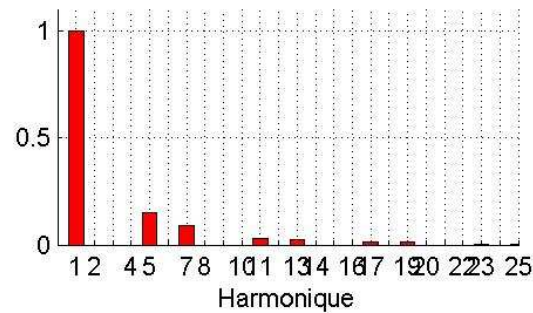
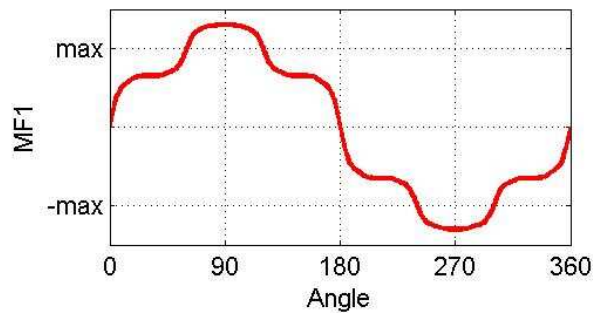


DSF d'un signal de phase



Machine homopolaire d'inductance  $M_0$

$F_3(M_0) = \{ 3, 6, 9, \dots \}$



Machine principale d'inductance  $M_1$

$F_3(M_1) = \{ 1, 2, 4, 5, 7, \dots \}$



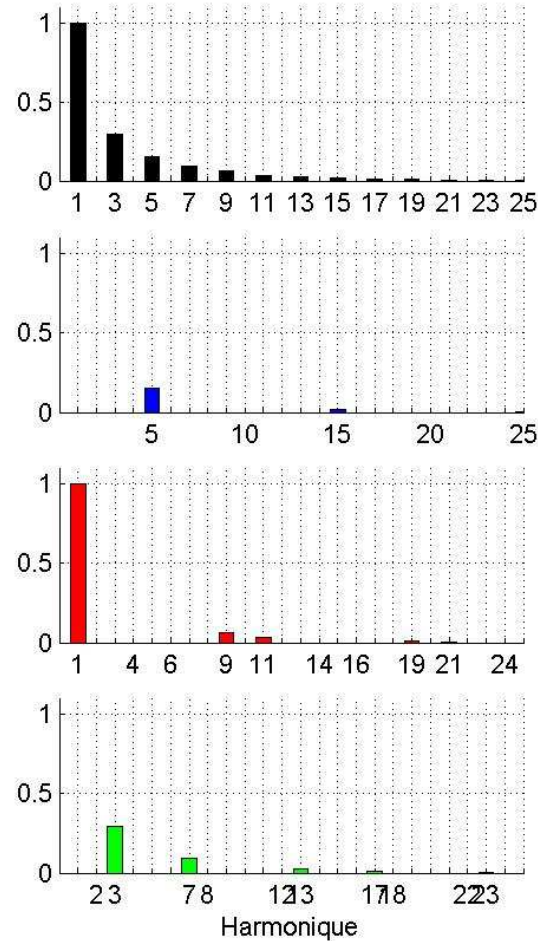
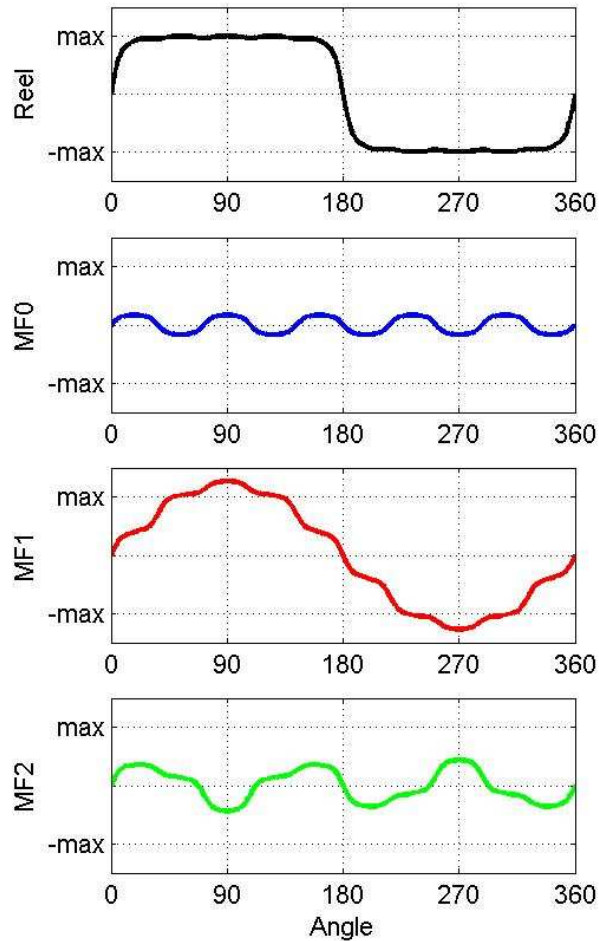
# Décomposition multimachine

## Notion de famille d'harmoniques



Exemple d'une machine pentaphasée  $N = 5$

$N_f = 3$



DSF d'un signal de phase

Machine homopolaire d'inductance  $M_0$

$$F_5(M_0) = \{ 5, 10, 15, \dots \}$$

Machine principale d'inductance  $M_1$

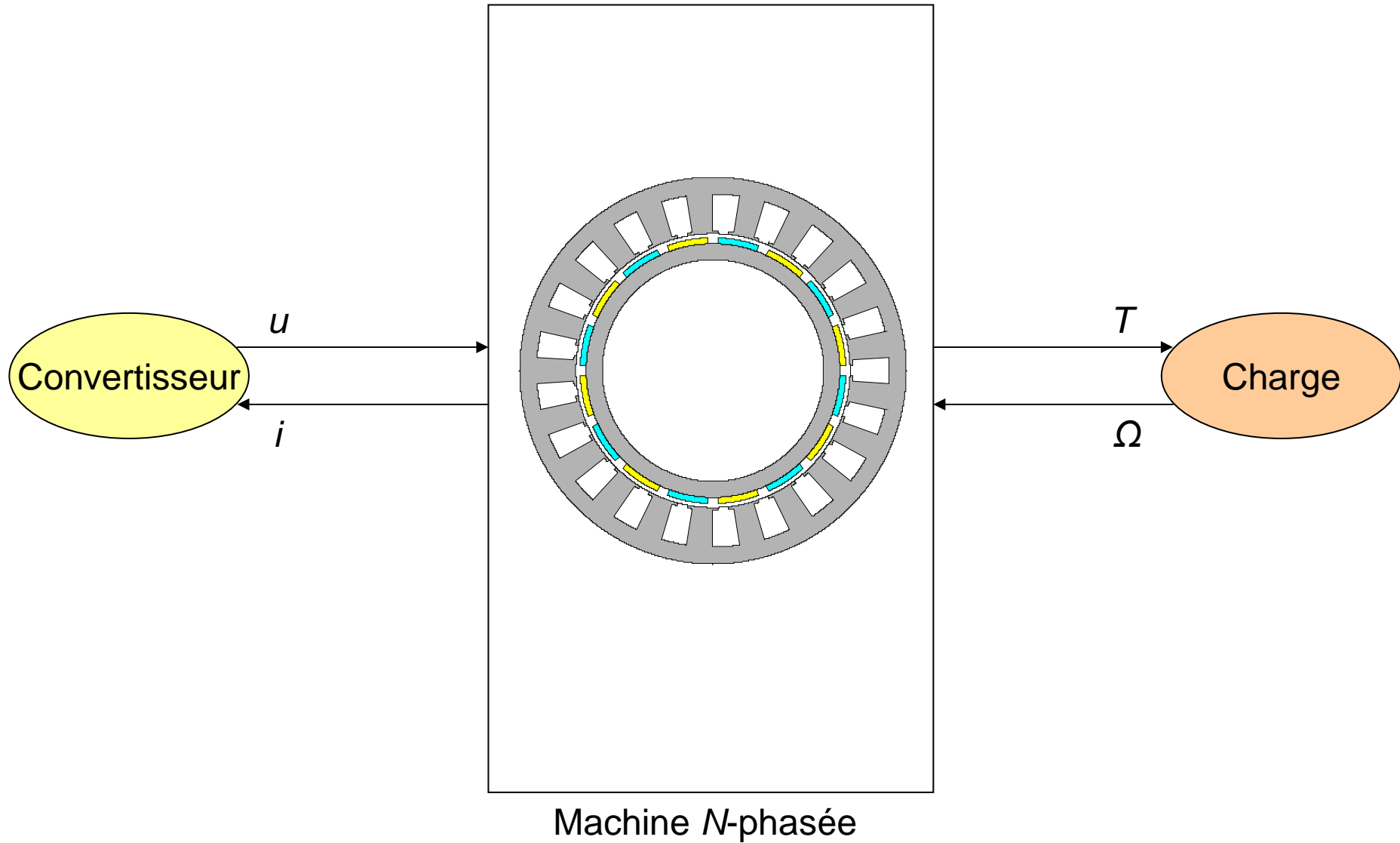
$$F_5(M_1) = \{ 1, 4, 6, 9, \dots \}$$

Machine secondaire d'inductance  $M_2$

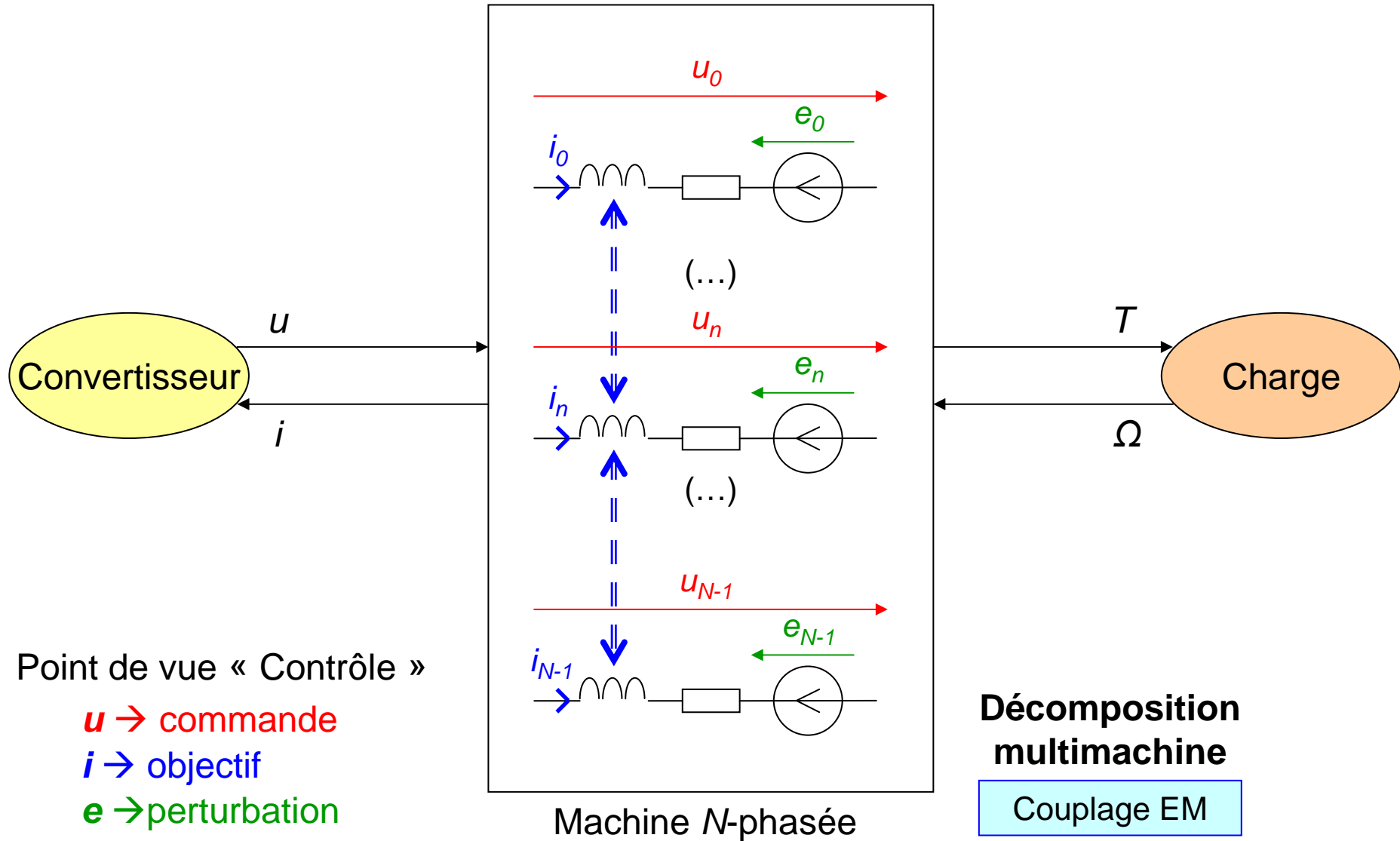
$$F_5(M_2) = \{ 2, 3, 7, 8, \dots \}$$

# Décomposition multimachine

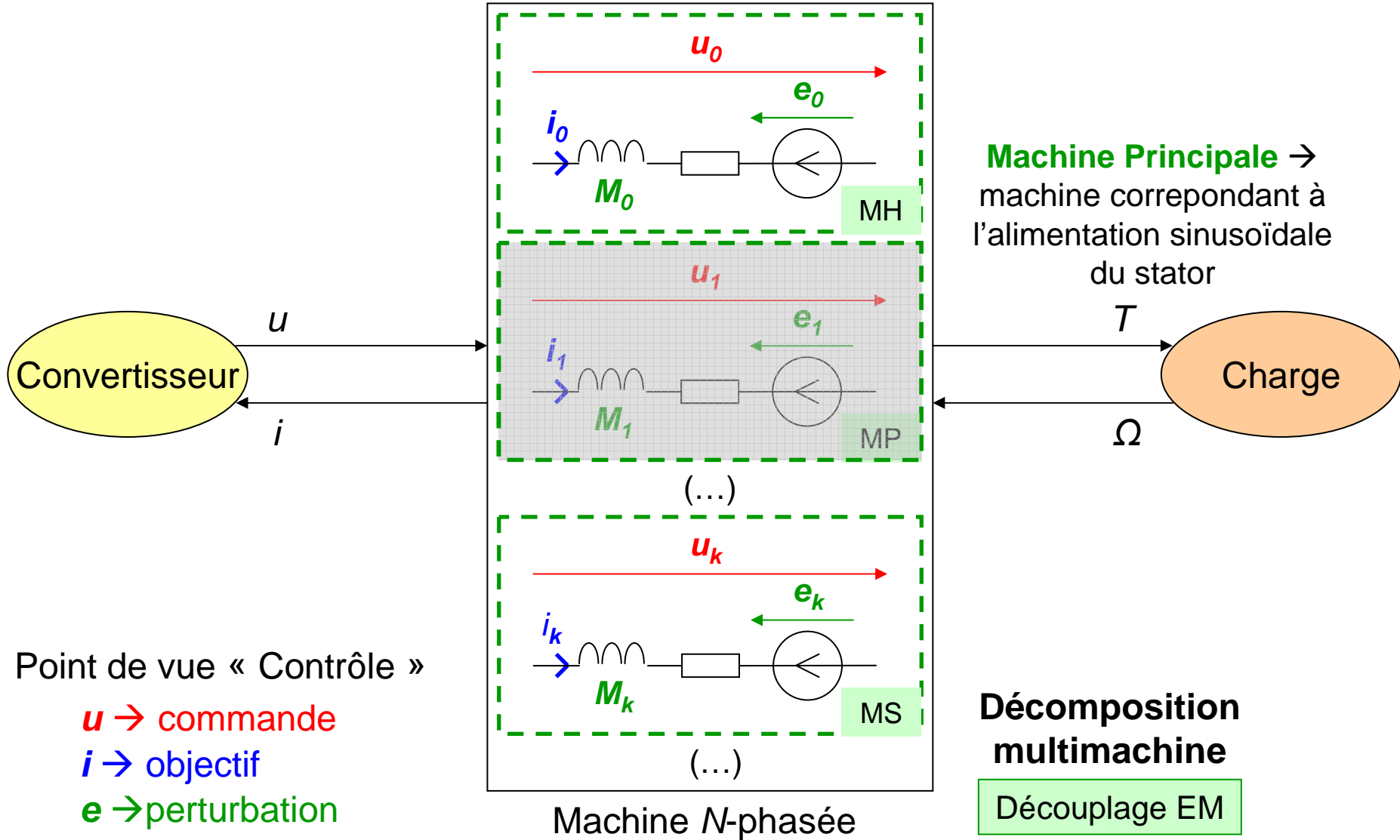
## Analyse du comportement en alimentation MLI



## Analyse du comportement en alimentation MLI

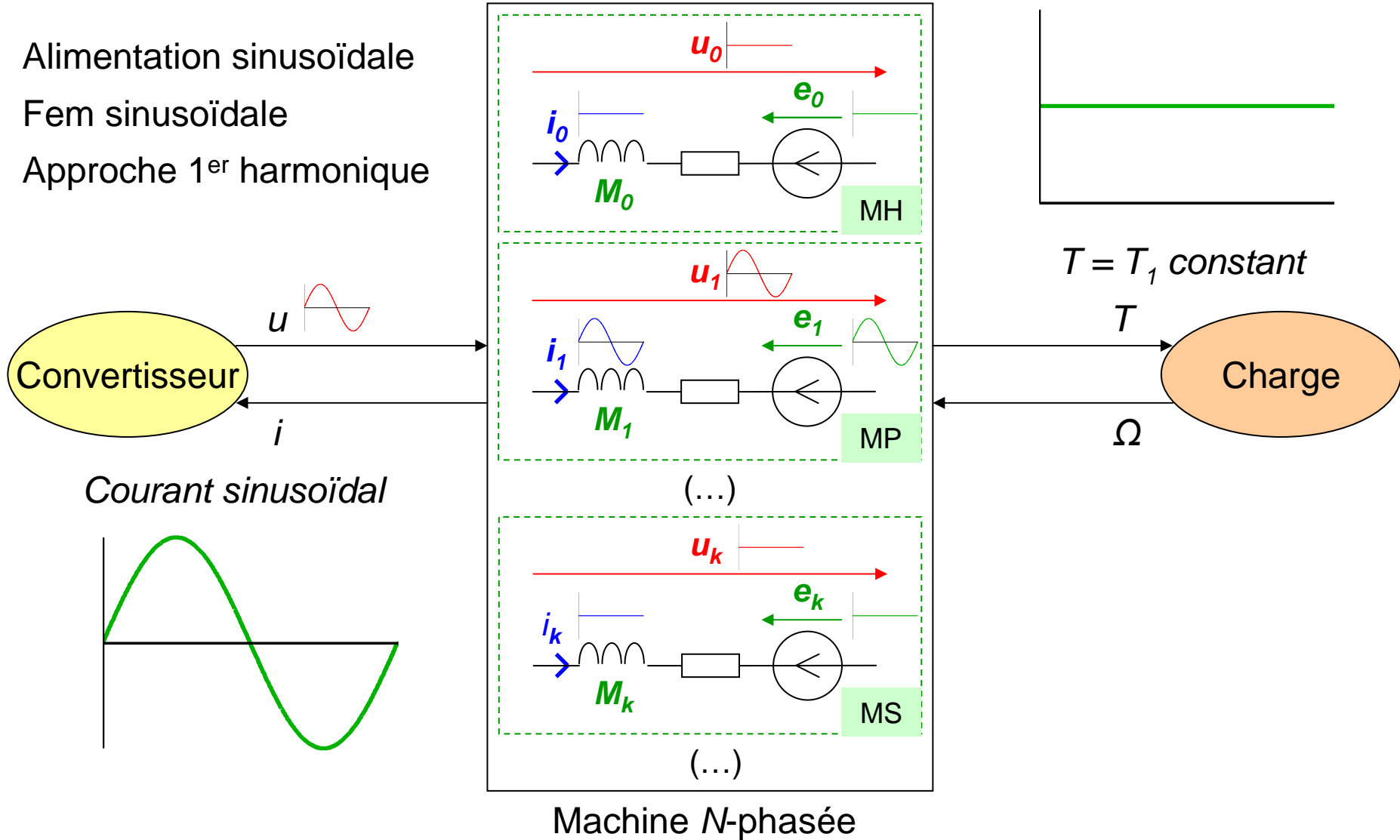


## Analyse du comportement en alimentation MLI



## Analyse du comportement en alimentation MLI

Alimentation sinusoïdale  
 Fem sinusoïdale  
 Approche 1<sup>er</sup> harmonique

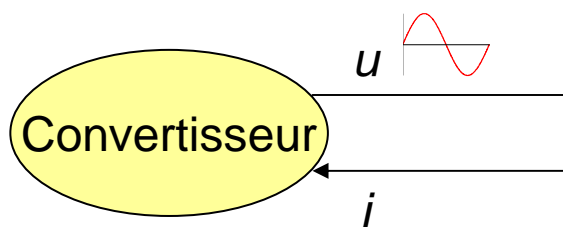


## Analyse du comportement en alimentation MLI

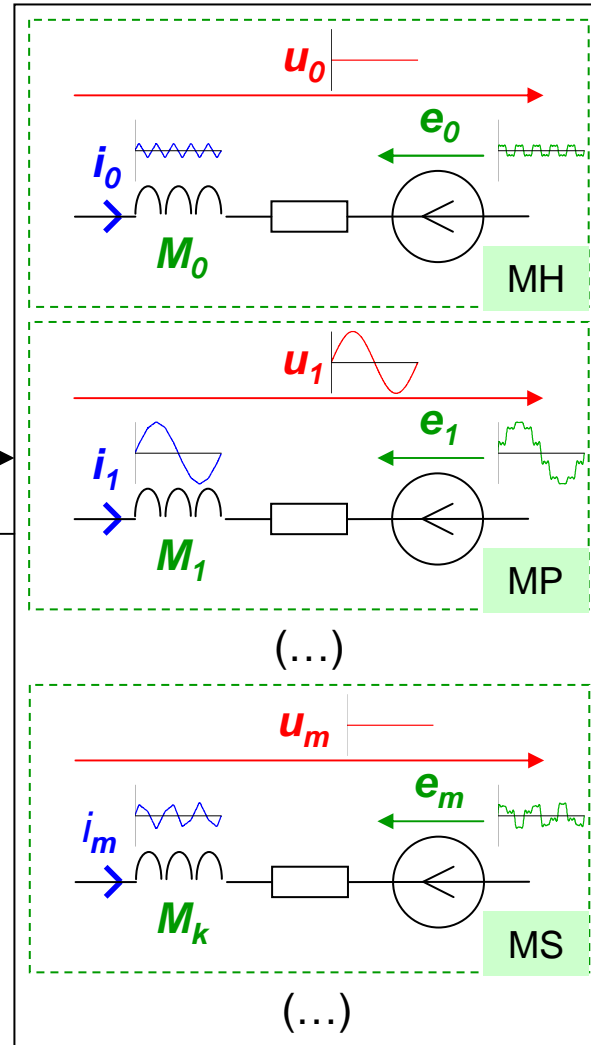
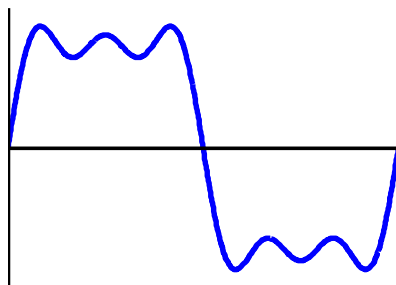
Alimentation sinusoïdale

Fem non sinusoïdale

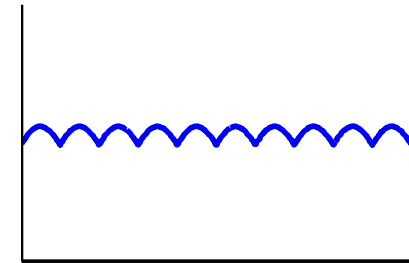
Approche 1<sup>er</sup> harmonique



*Courant non sinusoïdal*



Machine N-phasée



$$T = \sum T_k \text{ fluctuant}$$

$T$

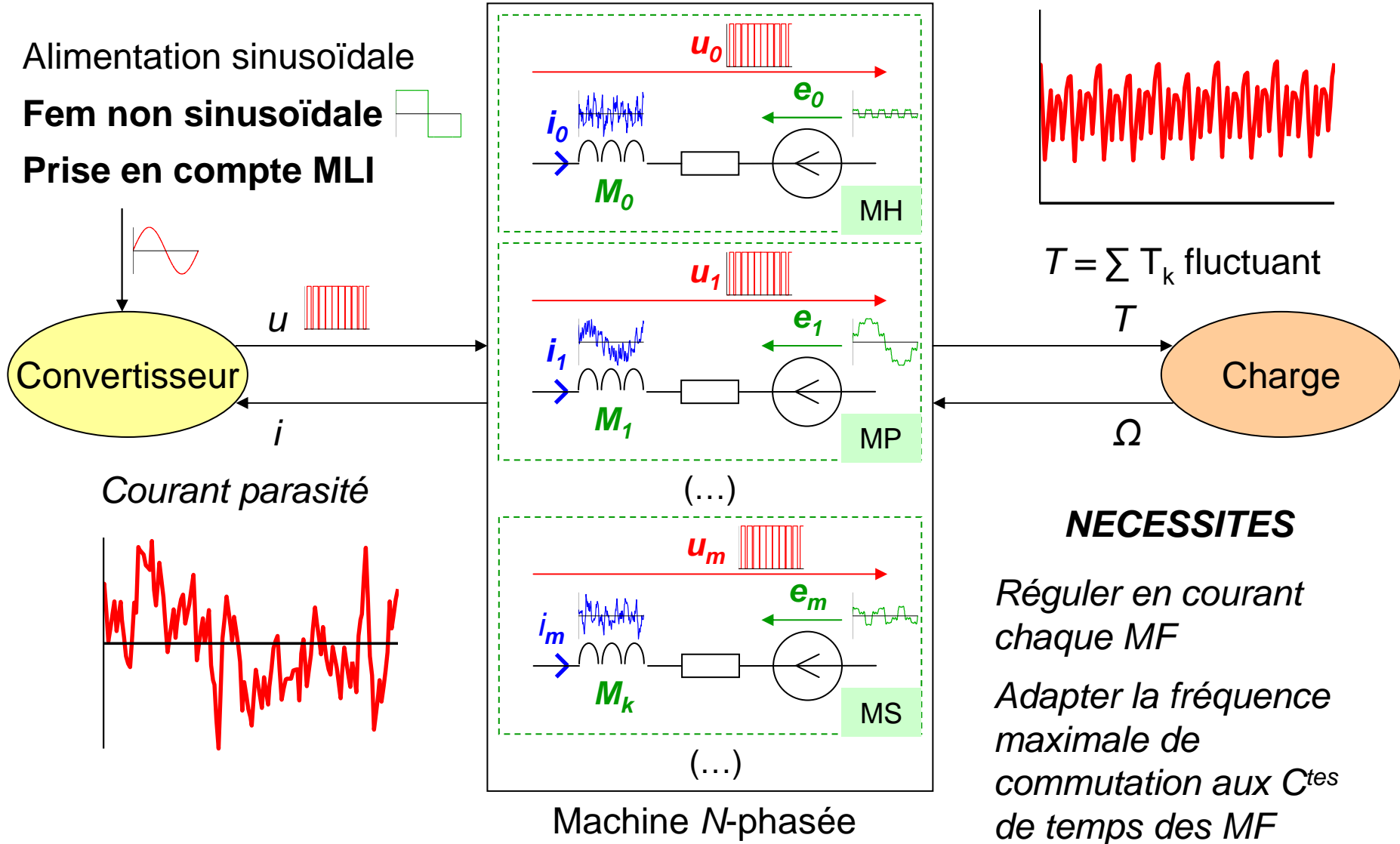
Charge

$\Omega$

**NECESSITES**

*Réguler en courant chaque MF*

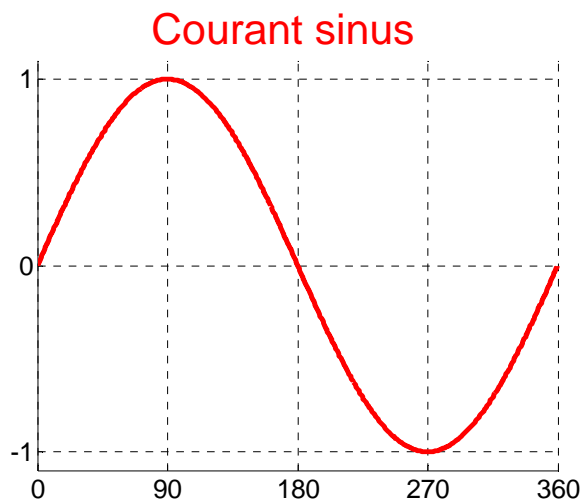
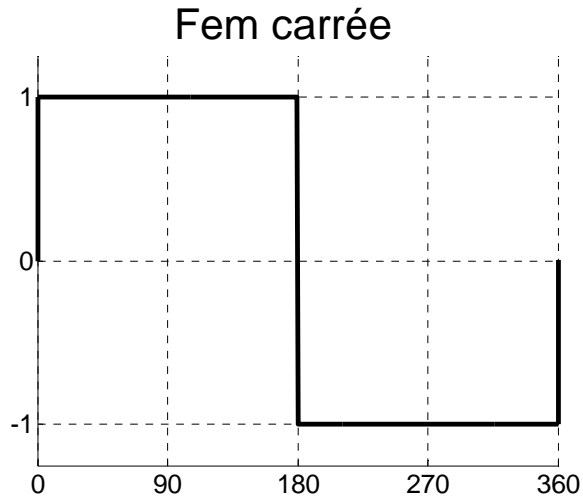
## Analyse du comportement en alimentation MLI





# Décomposition multimachine

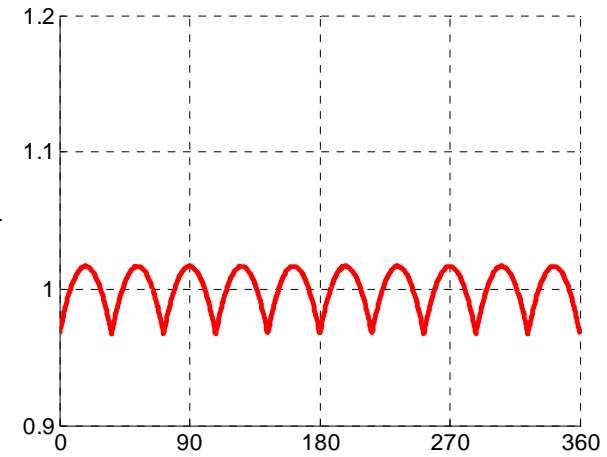
## Machines fictives et densité de couple



$$T = \vec{\epsilon} \cdot \vec{i} = \sum \vec{\epsilon}_k \cdot \vec{i}_k$$

Alimentation

Alimentation  
Machine Principale  
(fondamental)



$$T = T_1 = \vec{\epsilon}_1 \cdot \vec{i}_1$$

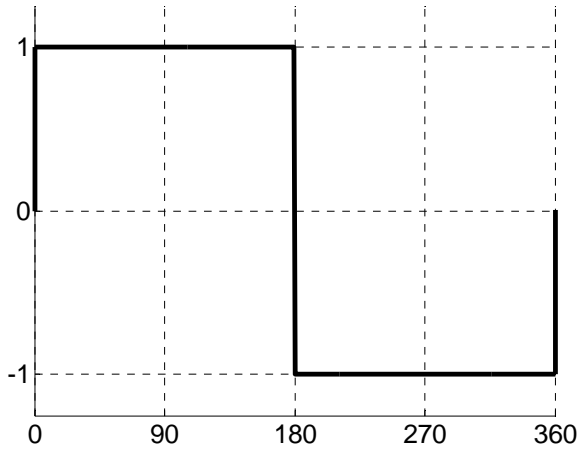
Réguler en courant  
chaque MF

Améliorer la densité de couple

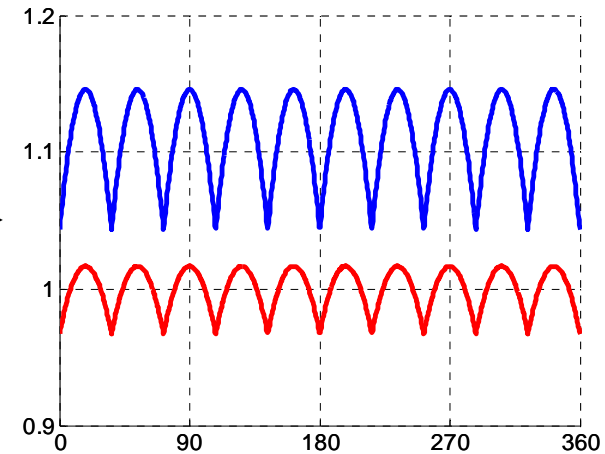
# Décomposition multimachine

## Machines fictives et densité de couple

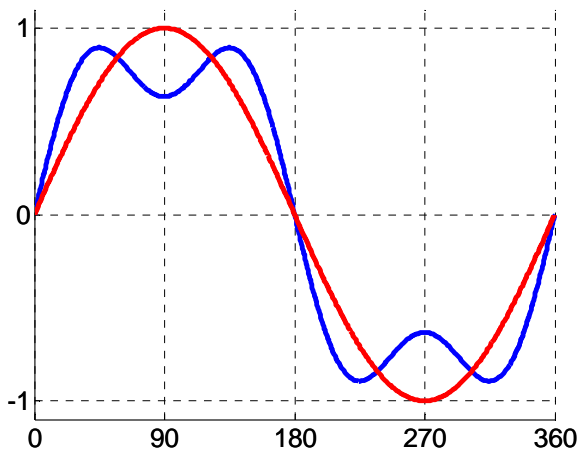
Fem carrée



$$T = \vec{\epsilon} \cdot \vec{i} = \sum \vec{\epsilon}_k \cdot \vec{i}_k$$



Courant sinus 1 et 3



Alimentation

Alimentation Machine Secondaire (harmonique 3)

Stratégie

Pertes Joule maintenues  
 $f\{i\}_3 / f\{i\}_1 = f\{\epsilon\}_3 / f\{\epsilon\}_1 = 1/3$

$$T = T_1 = \vec{\epsilon}_1 \cdot \vec{i}_1$$

$$T = T_1 + T_2 = \vec{\epsilon}_1 \cdot \vec{i}_1 + \vec{\epsilon}_2 \cdot \vec{i}_2$$

+

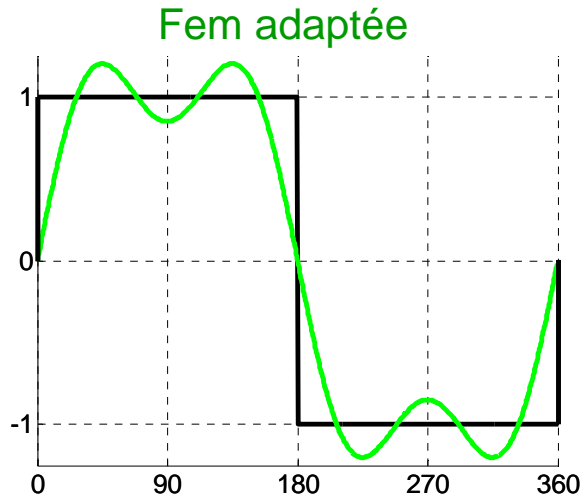
Couple moyen augmenté (11 %)

-

Ondulation augmentée

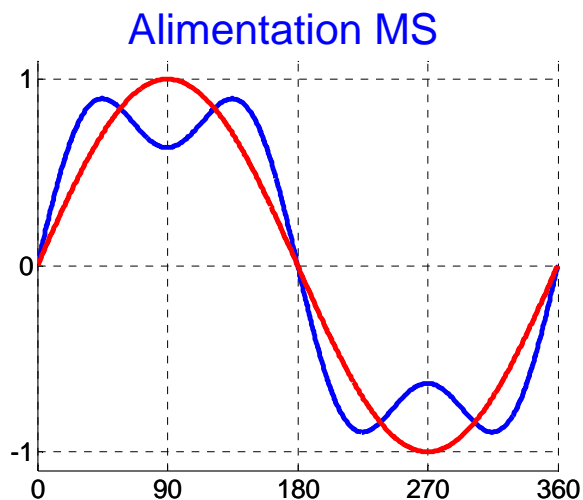
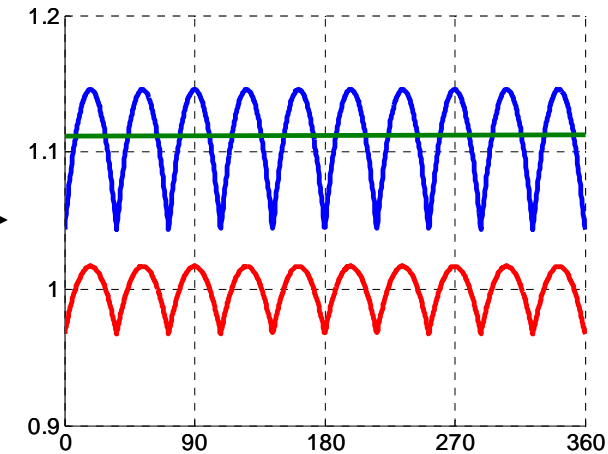
# Décomposition multimachine

## Machines fictives et densité de couple



Conception

$$T = \vec{\varepsilon} \cdot \vec{i} = \sum \vec{\varepsilon}_k \cdot \vec{i}_k$$



Alimentation

Alimentation  
Machine Secondaire  
(harmonique 3)

$$T = T_1 = \vec{\varepsilon}_1 \cdot \vec{i}_1$$

$$T = T_1 + T_2 = \vec{\varepsilon}_1 \cdot \vec{i}_1 + \vec{\varepsilon}_2 \cdot \vec{i}_2$$

$$T = T_1 + T_2 = \vec{\varepsilon}_1 \cdot \vec{i}_1 + \vec{\varepsilon}_2 \cdot \vec{i}_2$$

Stratégie

Pertes Joule maintenues  
 $f\{i\}_3 / f\{i\}_1 = f\{\varepsilon\}_3 / f\{\varepsilon\}_1 = 1/3$

Adaptation conception  
 → Fem fictives sinus



# Conception multimachine

## Plan de la présentation



### Décomposition Multimachine

- Description
  - Analyse du comportement de l'ensemble convertisseur-machine en alimentation MLI
    - Stratégies d'alimentation et de conception

### Conception Multimachine

- Objectifs et grandeurs de conception
  - Démarche de conception choisie
    - Moyens nécessaires pour la mettre en œuvre

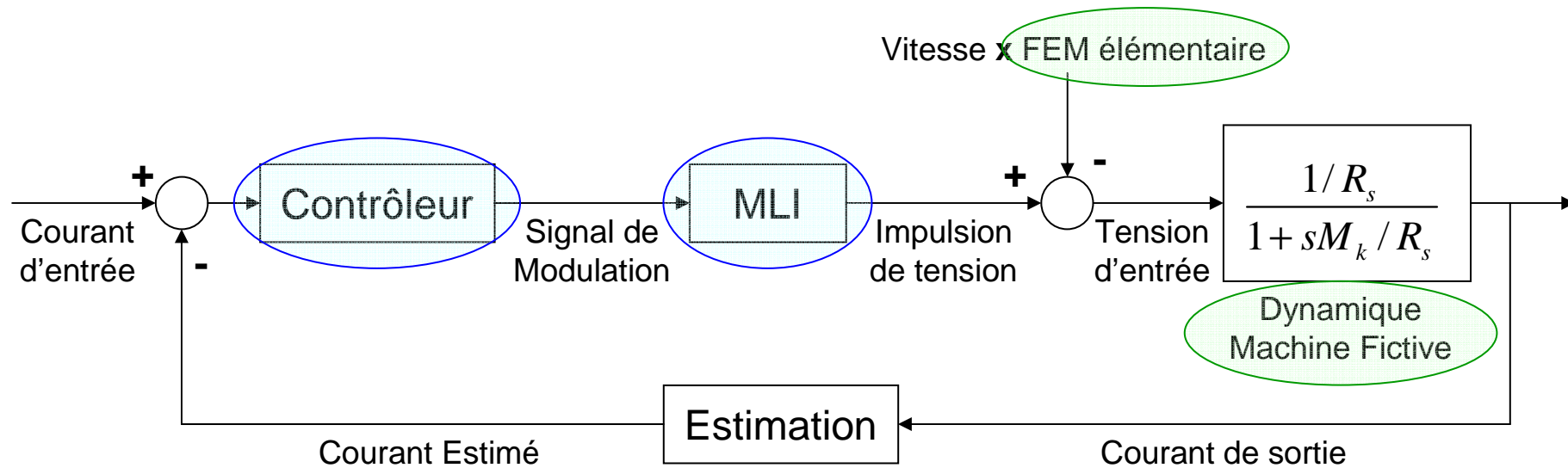
### Bobinage Multimachine

- Modélisation du bobinage
  - Bobinage fictif et propriétés associées
    - Liens avec les grandeurs de machines fictives
      - Exemple

# Conception multimachine

## Objectifs et grandeurs de conception

### Schéma de contrôle du courant d'une Machine fictive

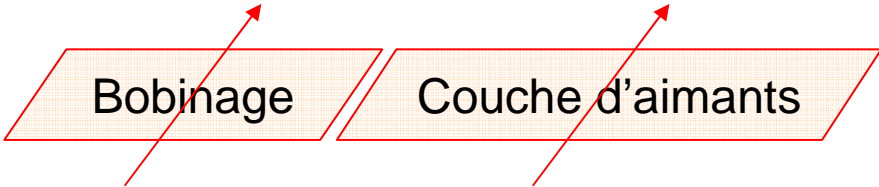


### Commande

Faciliter la correction + Dimensionner raisonnablement l'actionneur

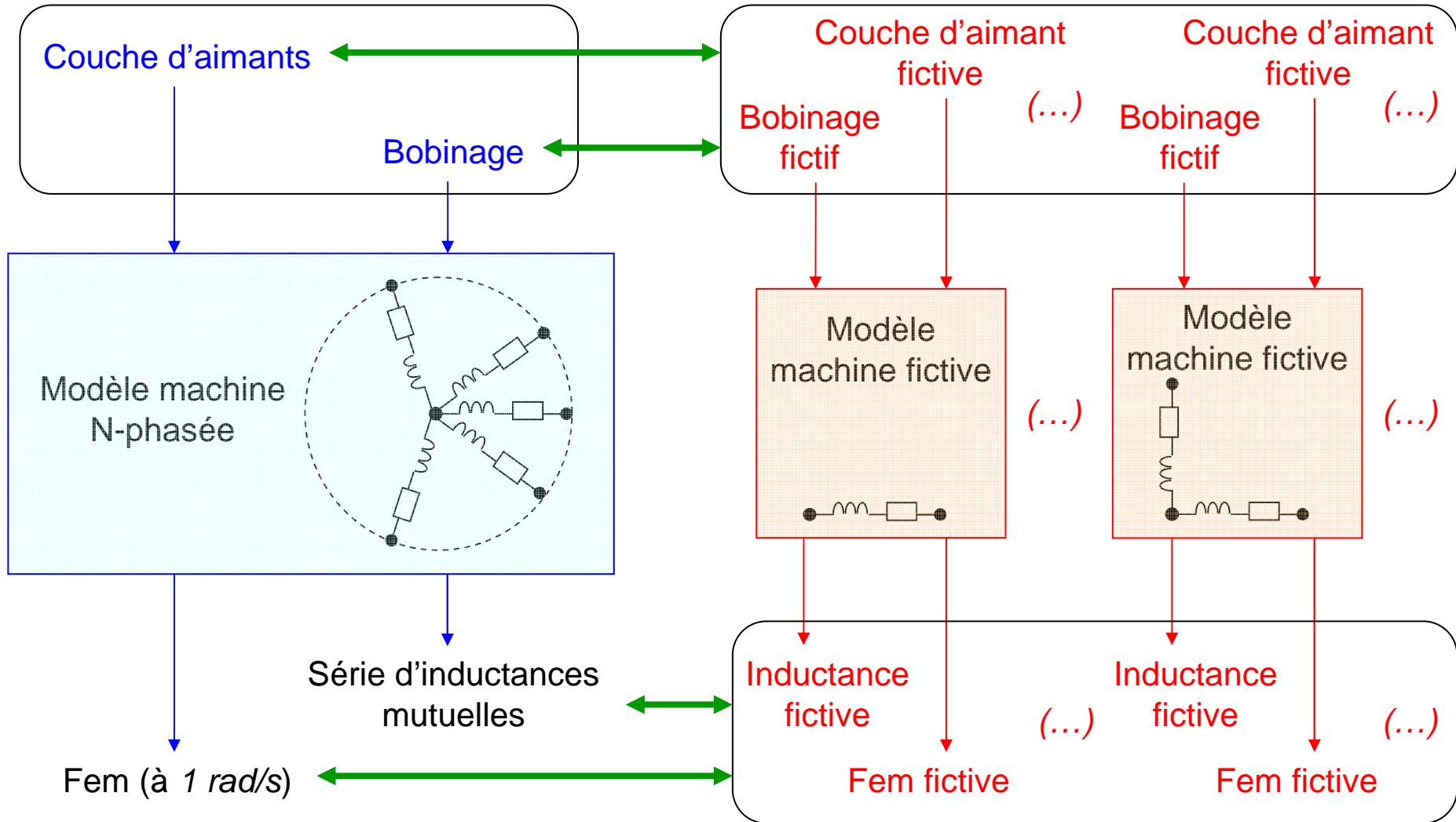
### Conception

Dynamique raisonnable + Perturbations réduites



# Conception multimachine Démarche

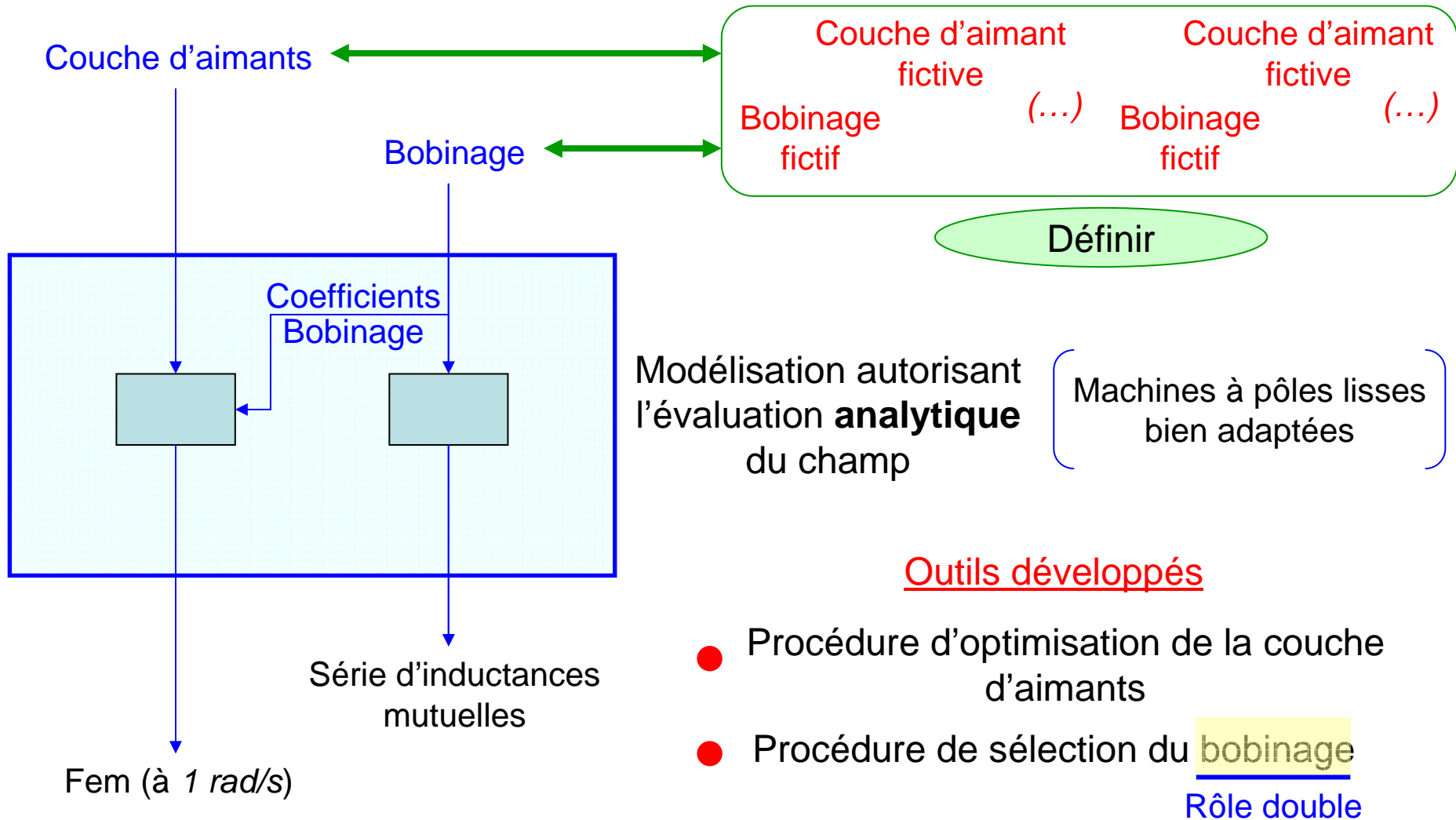
## PARAMETRES



## OBJECTIFS

# Conception multimachine

## Nécessités



# Bobinage Multimachine

## Plan de la présentation

### Décomposition Multimachine

- Description
  - Analyse du comportement de l'ensemble convertisseur-machine en alimentation MLI
    - Stratégies d'alimentation et de conception

### Conception Multimachine

- Objectifs et grandeurs de conception
  - Démarche de conception choisie
    - Moyens nécessaires pour la mettre en œuvre

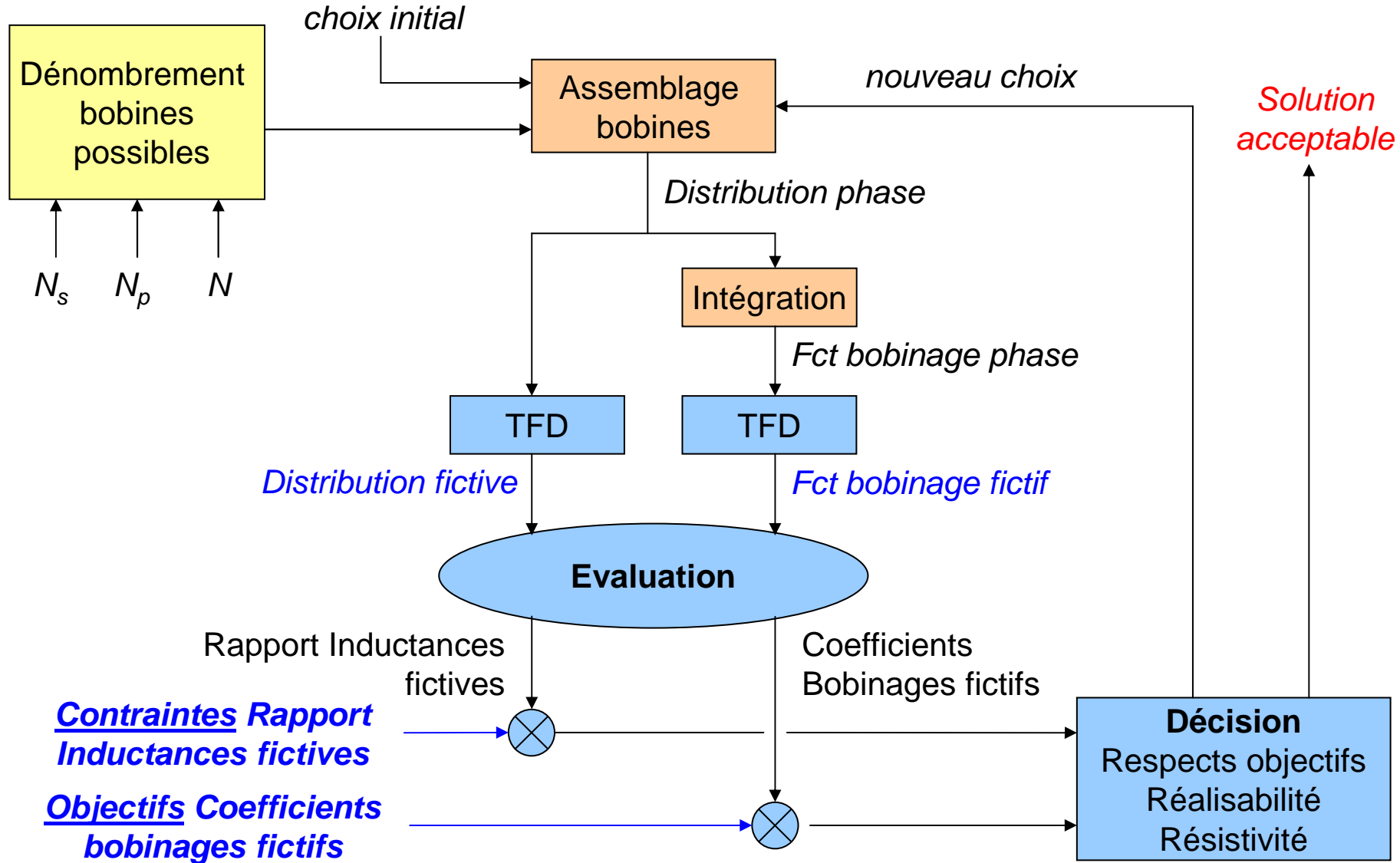
### Bobinage Multimachine

- Modélisation du bobinage
  - Bobinage fictif et propriétés associées
    - Liens avec les grandeurs de machines fictives
      - Exemple



# Bobinage multimachine

## Synoptique de la procédure de sélection

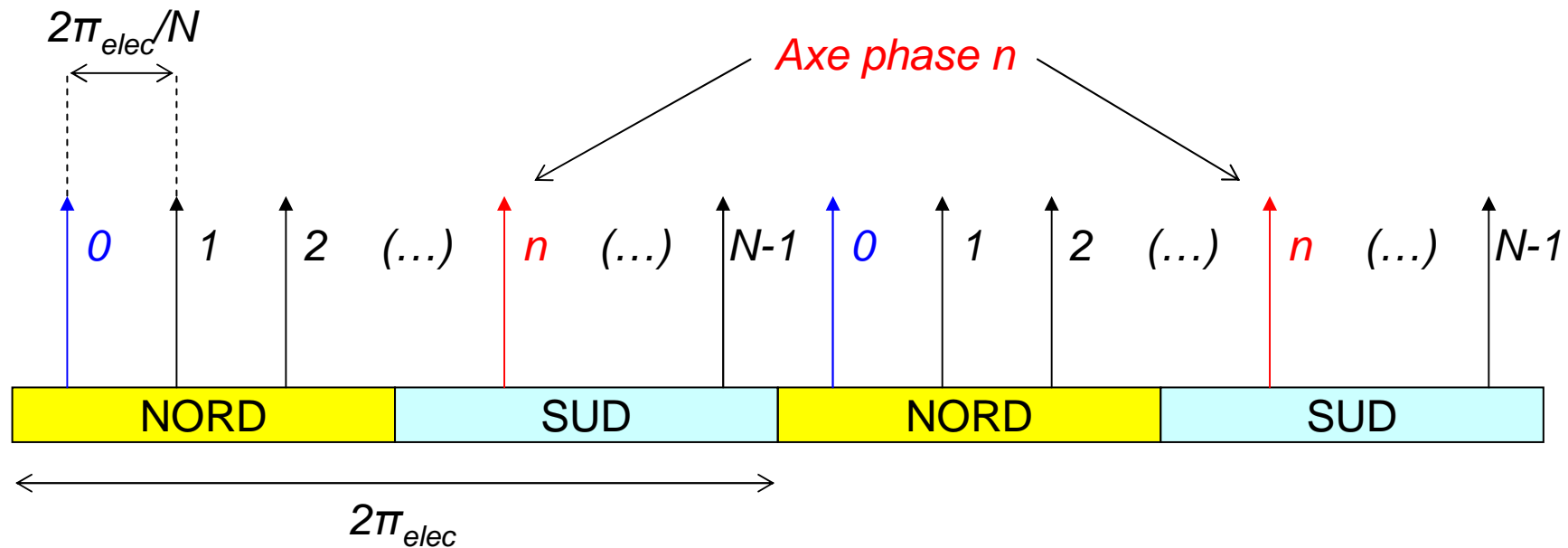


# Bobinage multimachine

## Bobinage polyphasé équilibré

Assemblage bobines

Bobinage polyphasé : connexion des plusieurs bobines générant des axes de phase régulièrement espacés



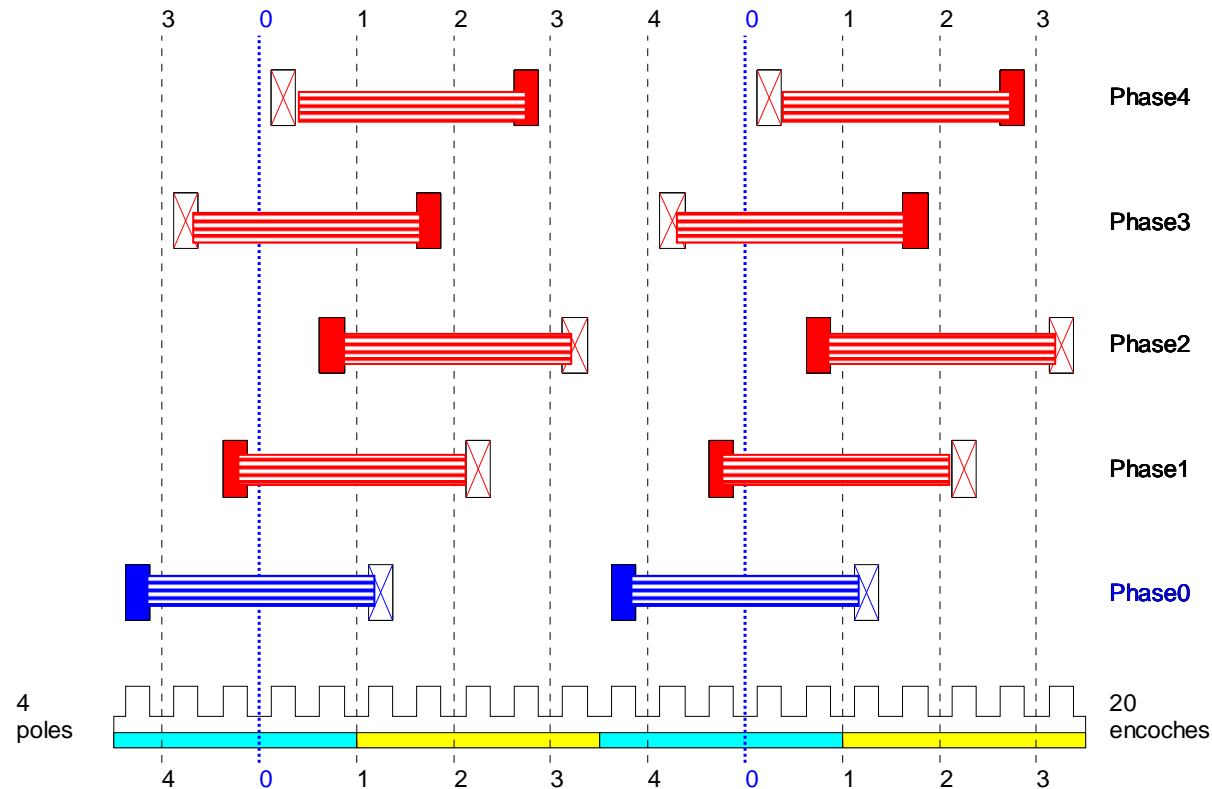
# Bobinage multimachine

## Bobinage polyphasé équilibré

Assemblage bobines

Exemple : 20 encoches, 4 pôles, 5 phases, monocouche, diamétral

Bobinage polyphasé : connexion des plusieurs bobines générant des axes de phase régulièrement espacés





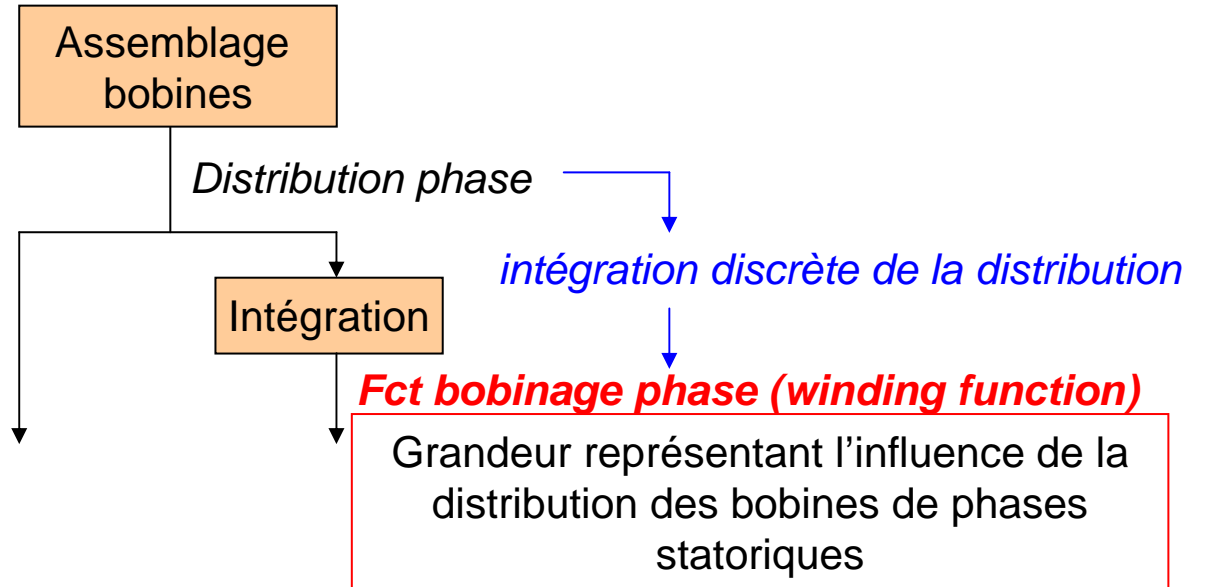
# Bobinage multimachine

## Modélisation du bobinage de phase

$b_0$

$B =$

0.5	-0.5	-0.5	0.5	0.5
0.5	-0.5	-0.5	-0.5	0.5
0.5	0.5	-0.5	-0.5	0.5
0.5	0.5	-0.5	-0.5	-0.5
0.5	0.5	0.5	-0.5	-0.5
-0.5	0.5	0.5	-0.5	-0.5
-0.5	0.5	0.5	0.5	-0.5
-0.5	-0.5	0.5	0.5	-0.5
-0.5	-0.5	0.5	0.5	0.5
-0.5	-0.5	-0.5	0.5	0.5
0.5	-0.5	-0.5	0.5	0.5
0.5	-0.5	-0.5	-0.5	0.5
0.5	0.5	-0.5	-0.5	0.5
0.5	0.5	-0.5	-0.5	-0.5
0.5	0.5	0.5	-0.5	-0.5
-0.5	0.5	0.5	-0.5	-0.5
-0.5	0.5	0.5	0.5	-0.5
-0.5	-0.5	0.5	0.5	-0.5
-0.5	-0.5	-0.5	0.5	0.5
-0.5	-0.5	-0.5	0.5	0.5



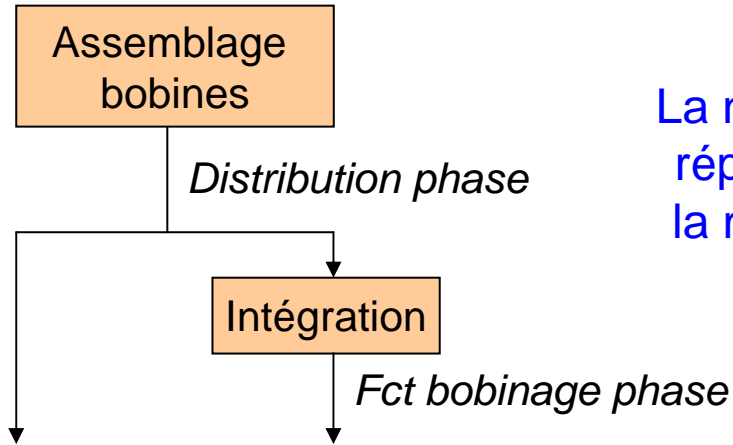
Construction d'une matrice de fonction de bobinage  $(N_s \times N)$ , notée  $B$

# Bobinage multimachine

## Modélisation du bobinage de phase

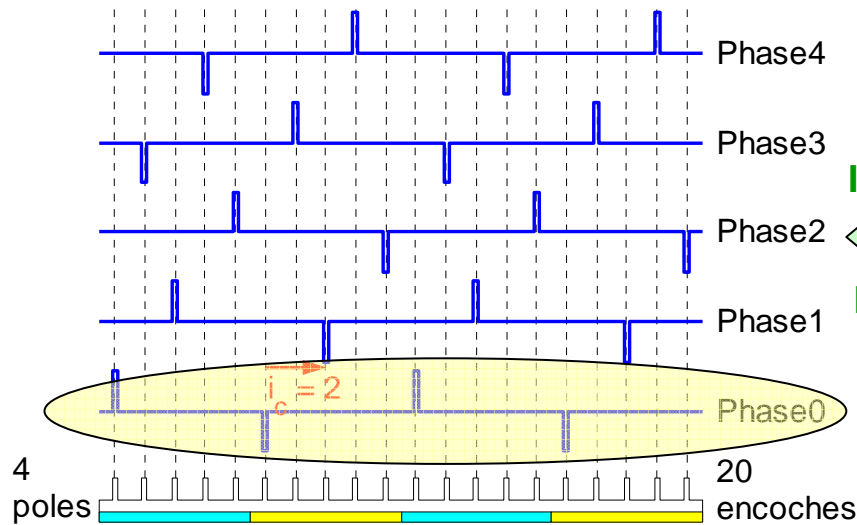
### Représentation

La connaissance d'un seul vecteur et d'un indice de circularité suffit à totalement caractériser le bobinage

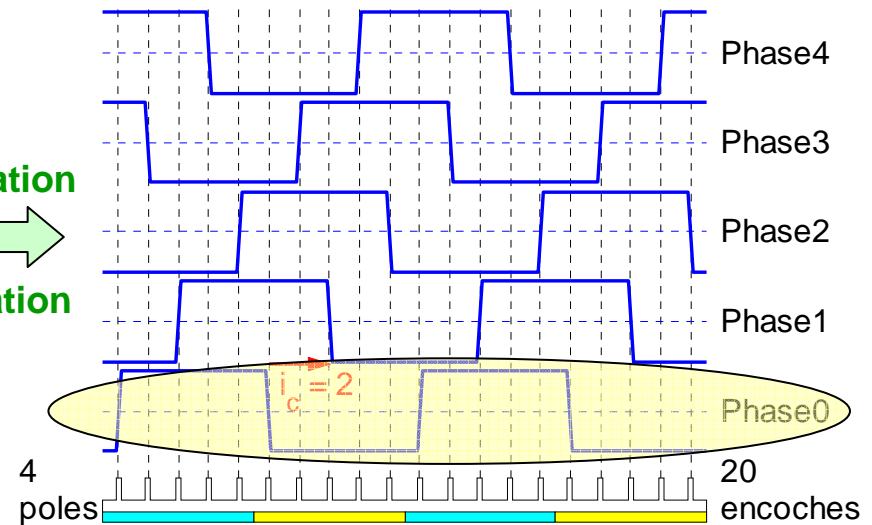


La notation matricielle répète plusieurs fois la même information

### Distributions de phase



### Fontions bobinage de phase





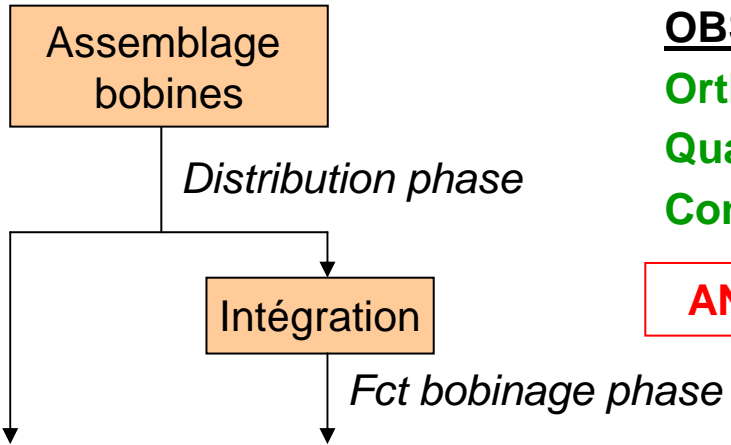
# Bobinage multimachine Construction du bobinage fictif



Écriture des matrices de bobinage dans la base propre de Concordia

définition initiale des bobinages fictifs

Exploiter la propriété de répétition d'informations de la notation matricielle

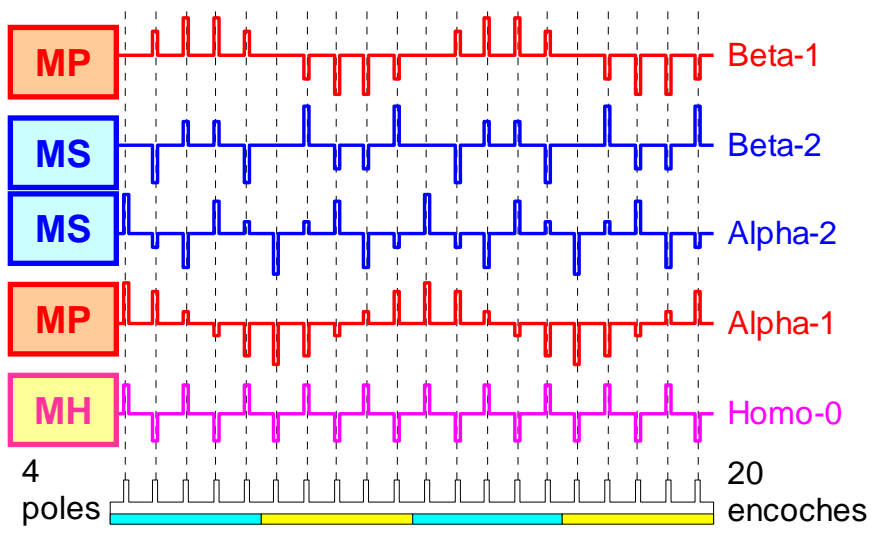


## OBSERVATIONS

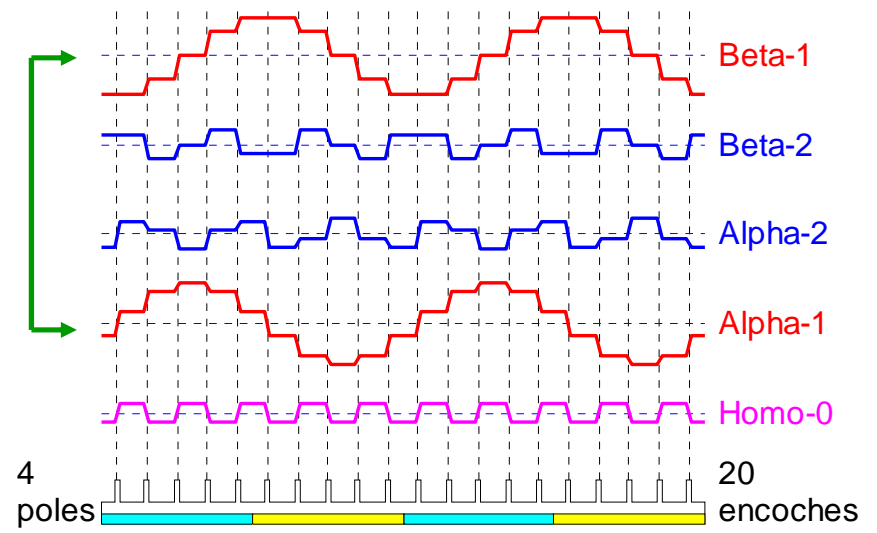
- Orthogonalité
- Quadrature
- Contenu harmonique

**ANALYSE PAR TFD**

### Distributions fictives



### Fonctions bobinage fictif



# Bobinage multimachine

## Analyse du bobinage fictif

### CONSTRUCTION PAR TFD

- Suppression des redondances
- Analyse qualitative des propriétés des bobinages fictifs

Assemblage bobines

Distribution phase

Intégration

Fct bobinage phase

Distribution des harmonique de force magnétomotrice

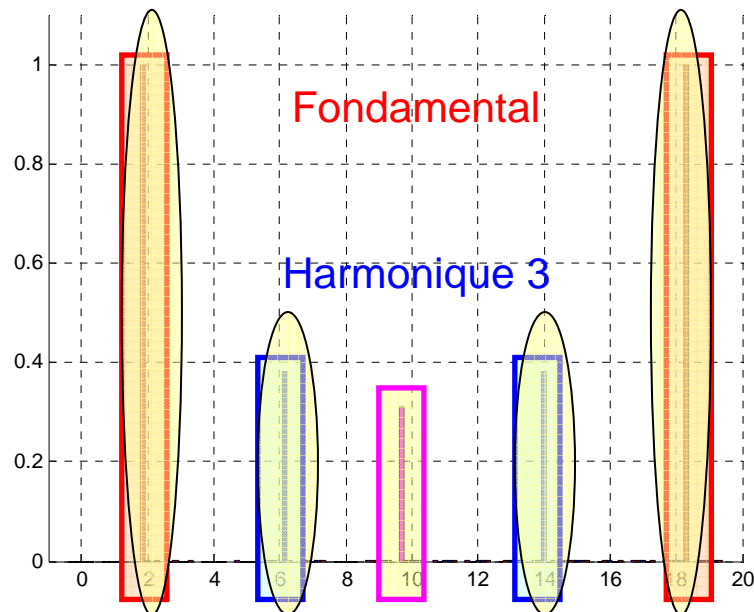
Famille étendue d'harmoniques

MH

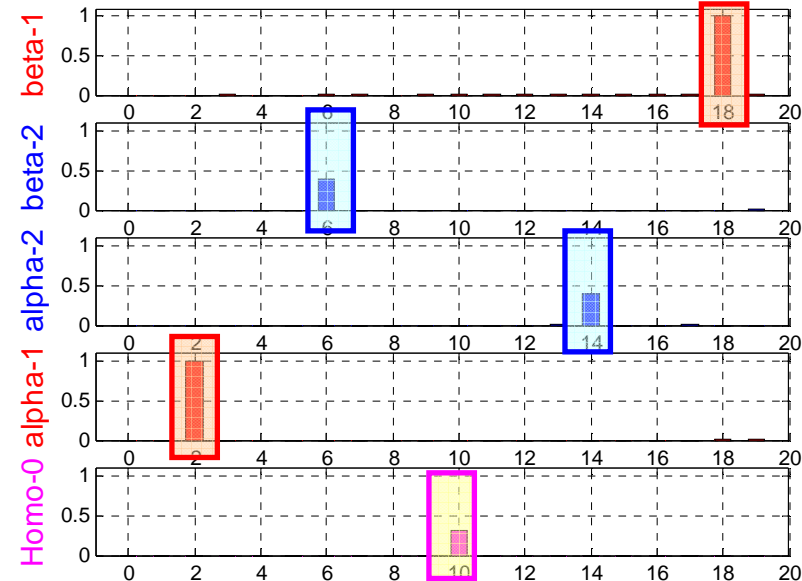
MP

MS

TFD(Fct bobinage phase réelle)



TFD(Fct bobinage fictif)

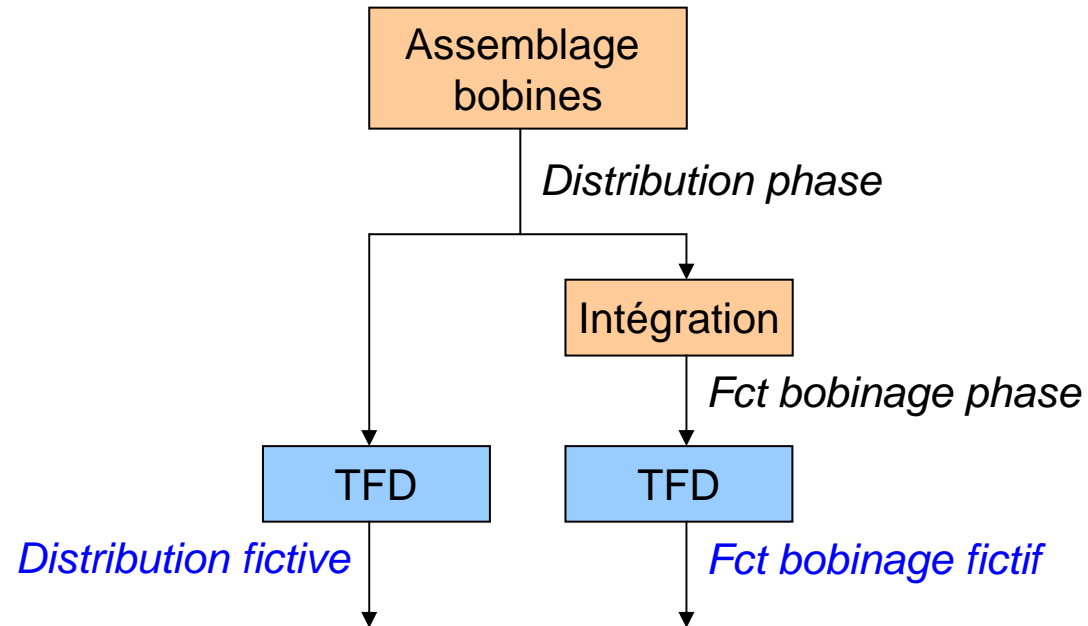




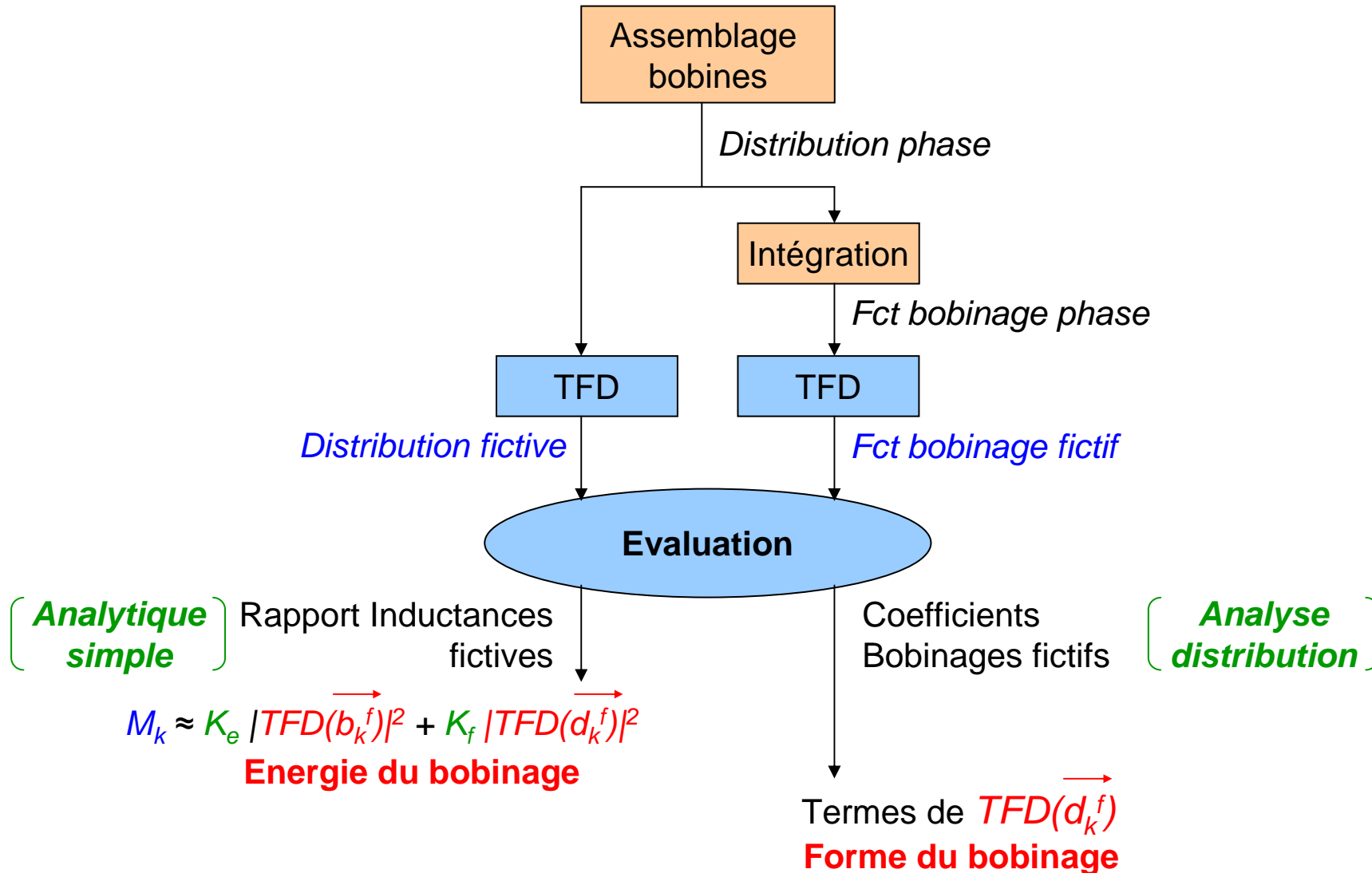


# Bobinage multimachine

## Construction du bobinage fictif



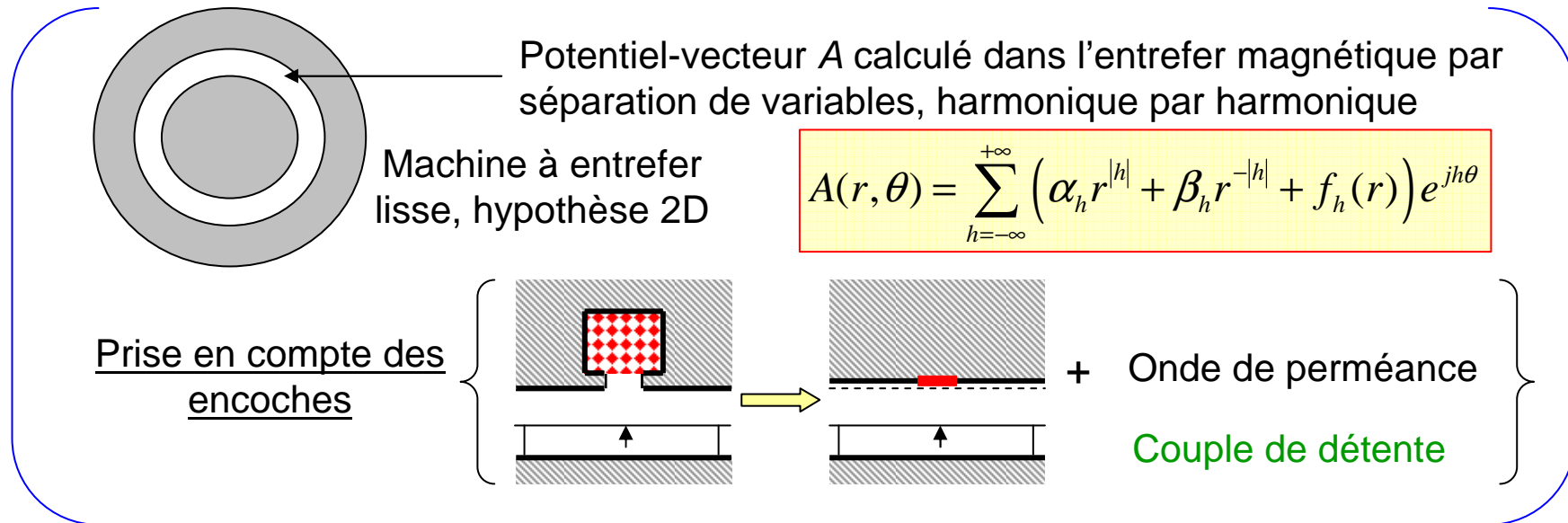
# Bobinage multimachine Evaluation



# Bobinage multimachine Evaluation

Calcul Analytique Affiné

[ KONE-1993, ZHU-1993 ]



Evaluation

[ Analytique simple ]

Rapport Inductances fictives

Coefficients Bobinages fictifs

[ Analyse distribution ]

$$M_k \approx K_e |\overrightarrow{TFD}(b_k^f)|^2 + K_f |\overrightarrow{TFD}(d_k^f)|^2$$

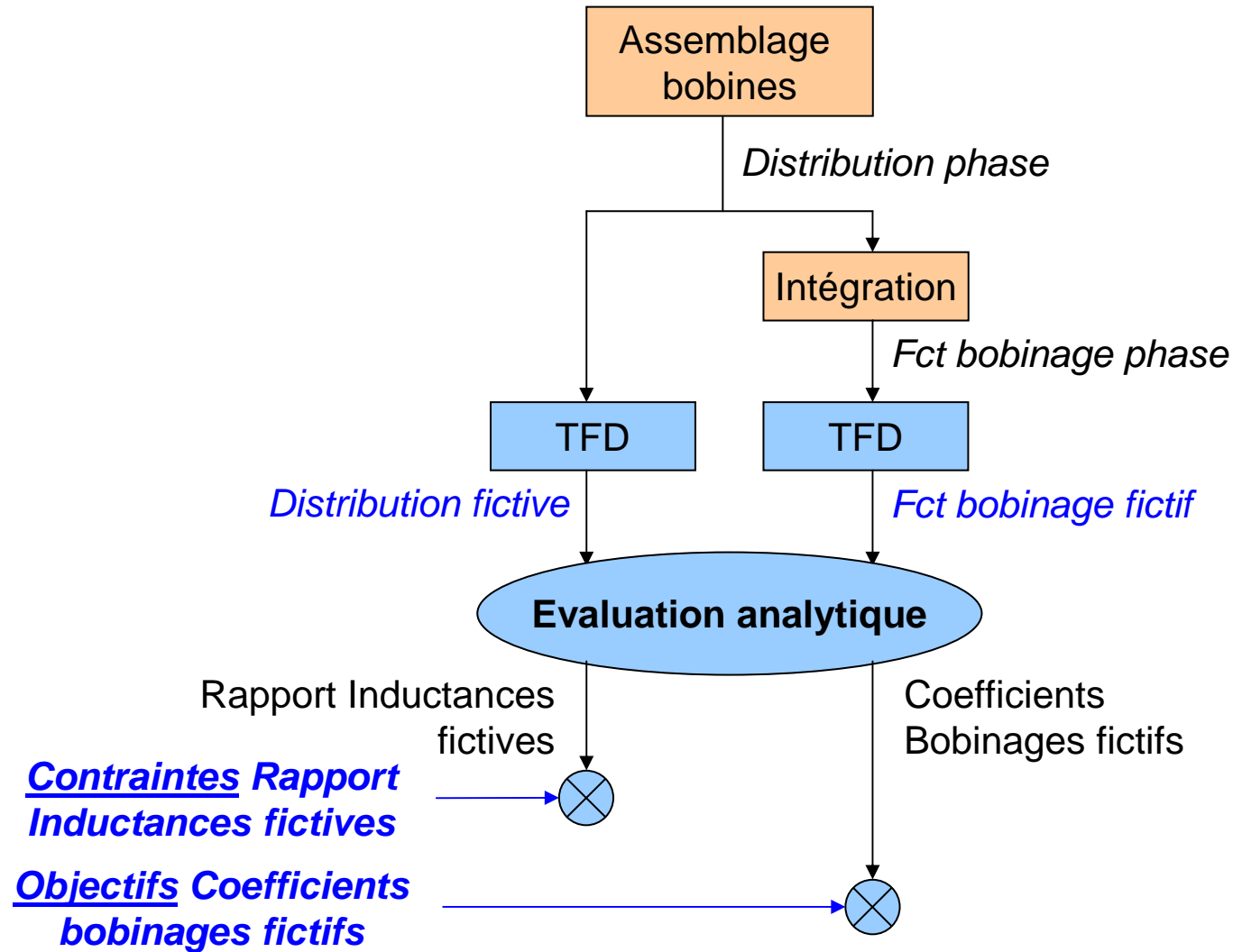
Energie du bobinage

Termes de  $\overrightarrow{TFD}(d_k^f)$

Forme du bobinage

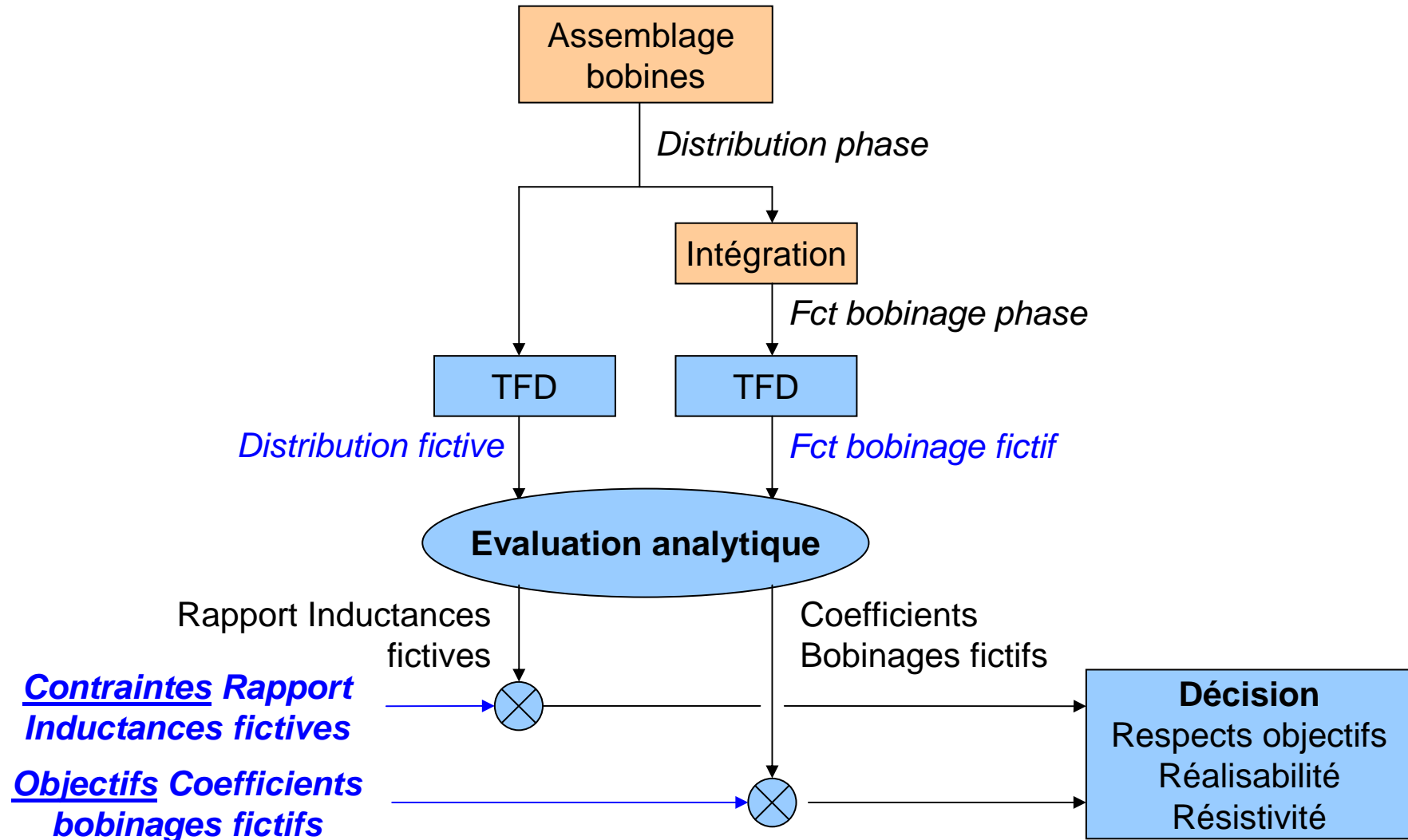
# Bobinage multimachine

## Définition des objectifs



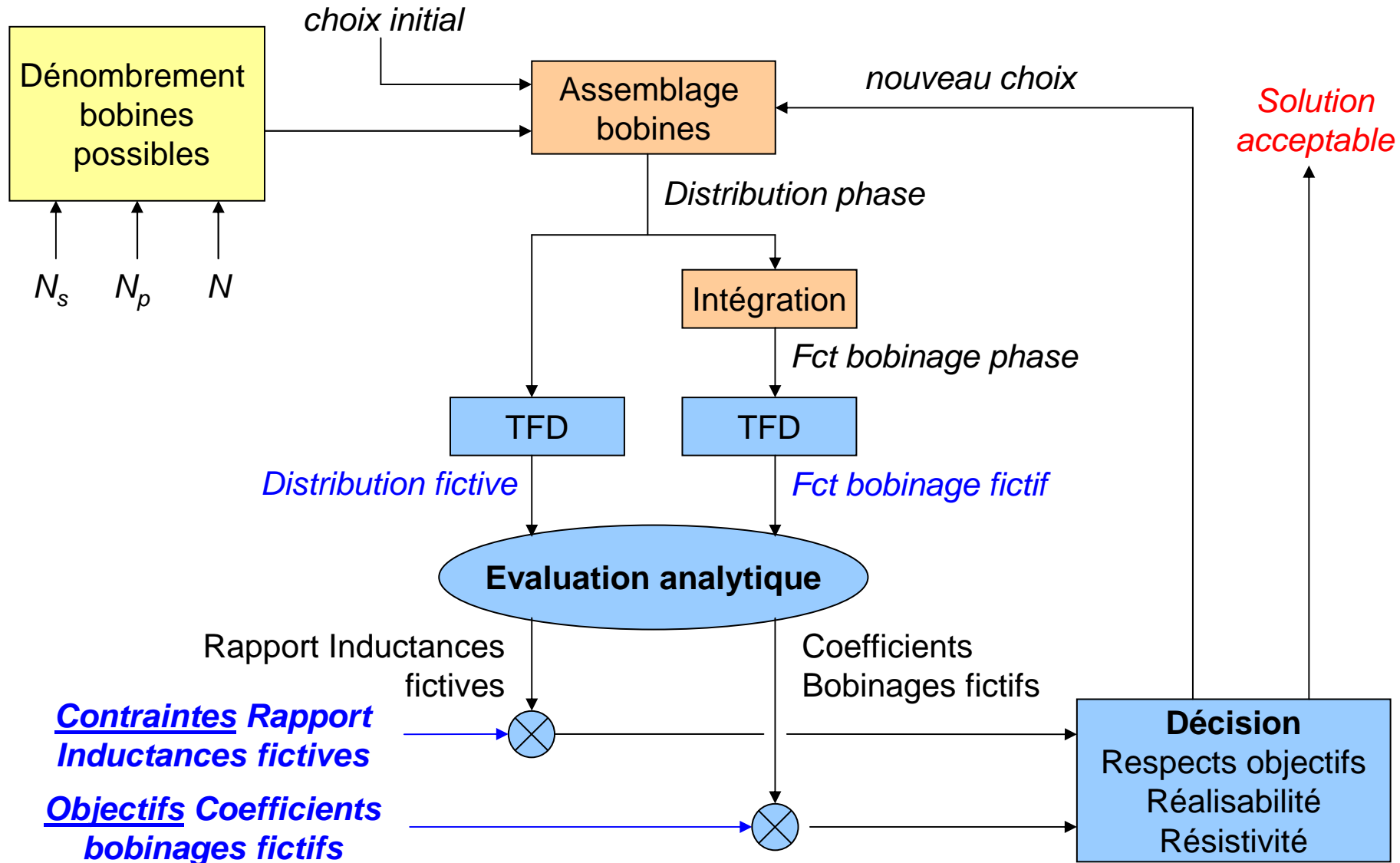


# Bobinage multimachine Décision





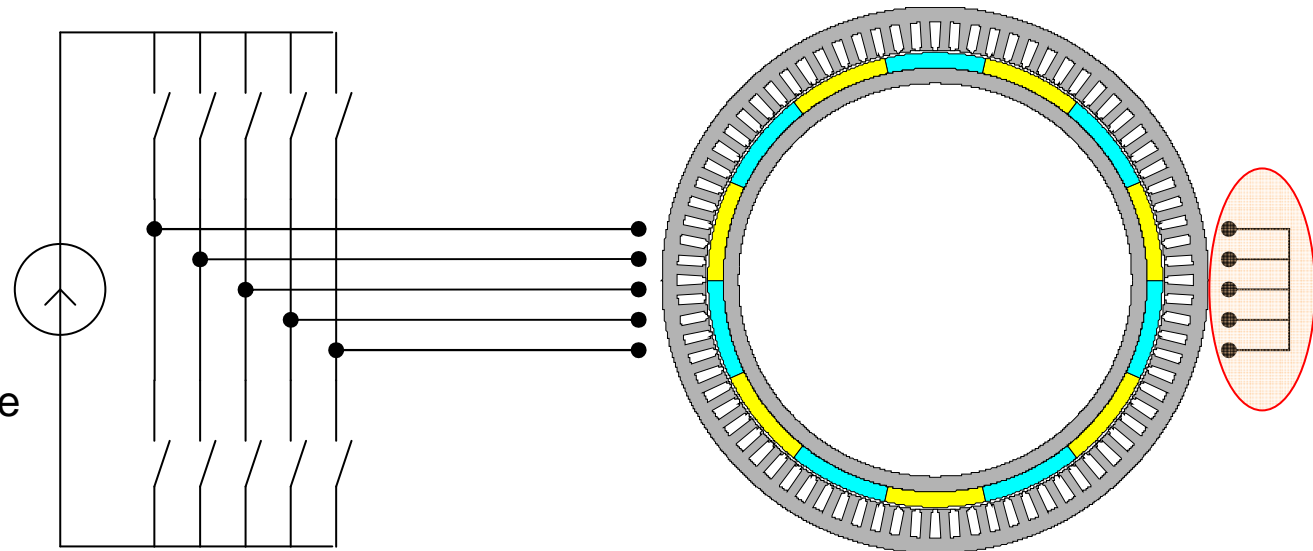
# Bobinage multimachine Bouclage de la procédure



# Exemple : moteur 5 phases

## Description et objectifs

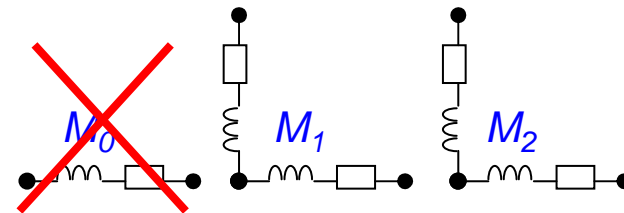
Propulseur Pod (AUV) : 3.2 kW @ 500 tr/min



$N_s$	$N_p$	$N$
80	14	5

- Configuration fractionnaire
- Monocouche

Couplage étoile



**Contraintes Rapport Inductances fictives**

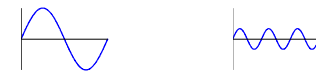
$$|\overrightarrow{TFD}(b_1^f)|^2 \approx |\overrightarrow{TFD}(b_2^f)|^2$$

$M_1 \approx M_2$

**Objectifs Coefficients bobinages fictifs**

Critère sur  $\overrightarrow{TFD}(d_1^f)$  et  $\overrightarrow{TFD}(d_2^f)$

fem sinus



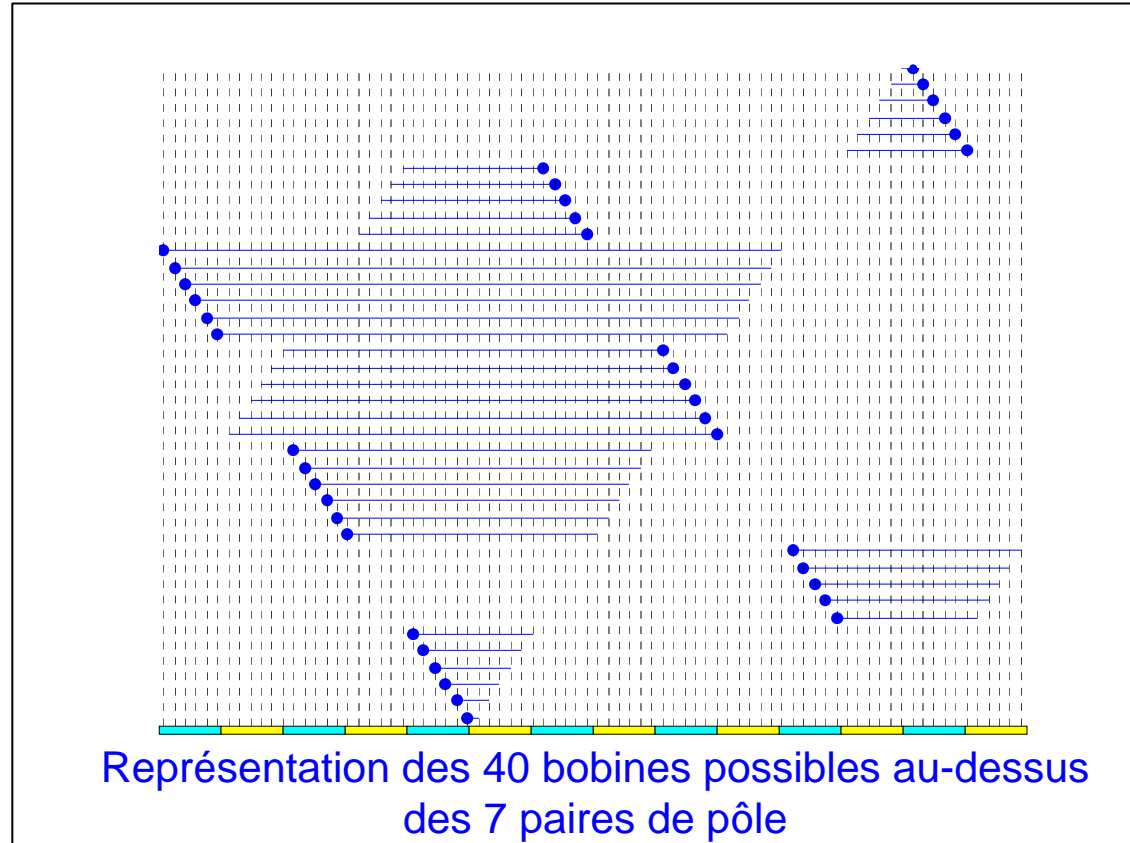
# Exemple : moteur 5 phases

## Procédure

Dénombrement bobines possibles

$N_s$     $N_p$     $N$   
80   14   5

8 bobines / phase



### UTILISATION DE LA PROCEDURE

Travailler autour de la configuration favorisant le mieux les harmoniques 1 et 3

$$\frac{M_2}{M_1} \approx \frac{|TFD(\vec{b}_2^f)|^2}{|TFD(\vec{b}_1^f)|^2} = 1$$

Critère sur  $TFD(\vec{d}_1^f)$  et  $TFD(\vec{d}_2^f)$

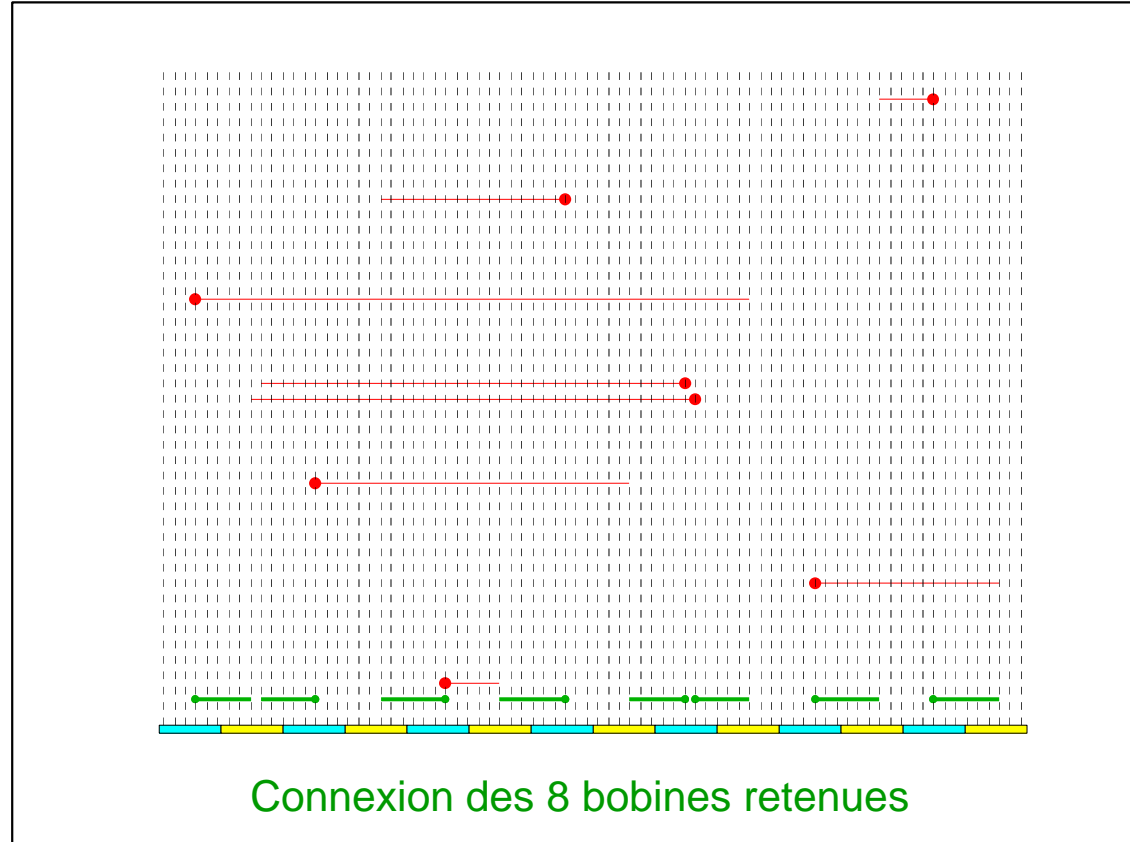




# Exemple : moteur 5 phases Choix retenu

Dénombrement bobines possibles

$N_s$	$N_p$	$N$
80	14	5

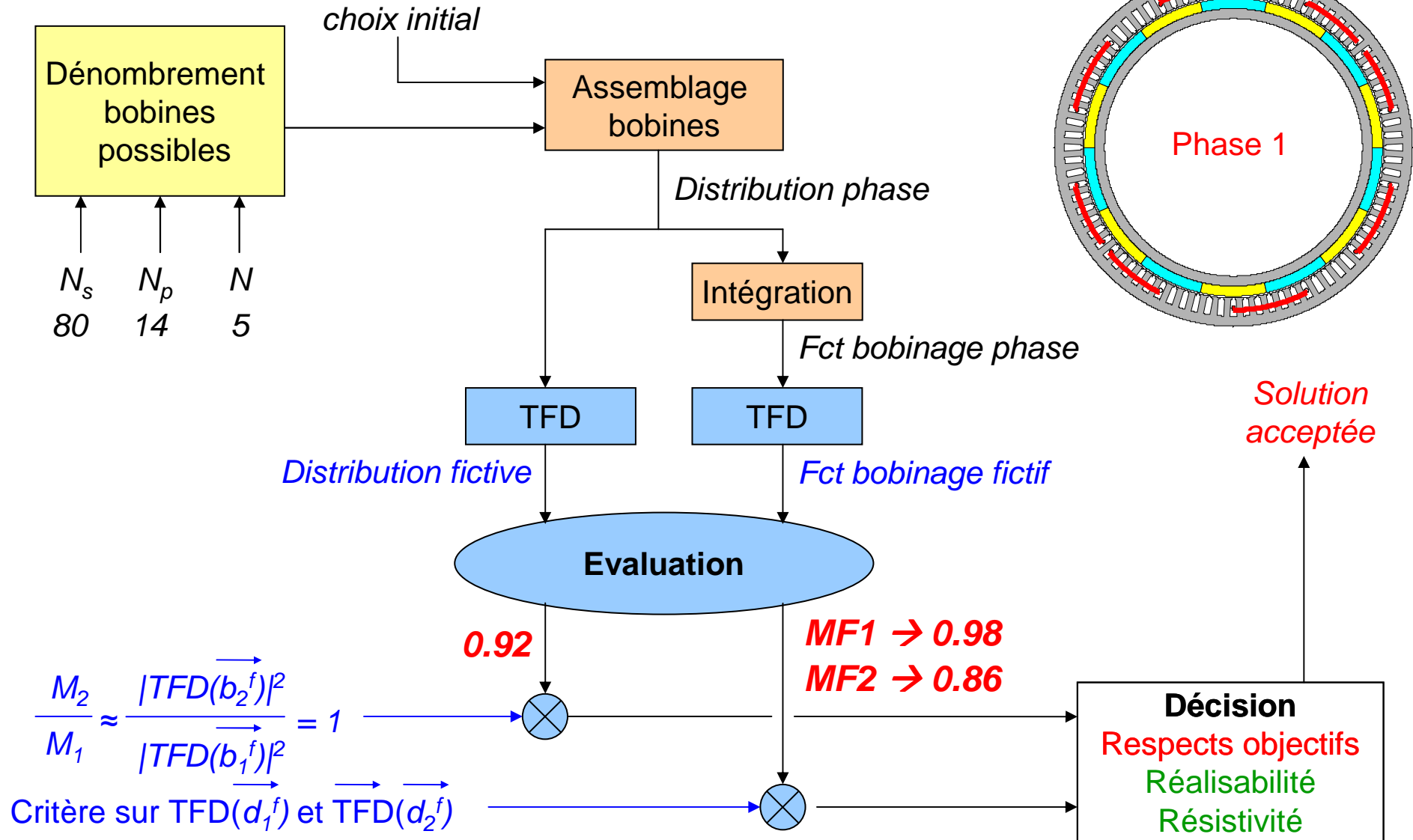


$$\frac{M_2}{M_1} \approx \frac{|TFD(\vec{b}_2^f)|^2}{|TFD(\vec{b}_1^f)|^2} = 1$$

Critère sur  $TFD(\vec{d}_1^f)$  et  $TFD(\vec{d}_2^f)$

# Exemple : moteur 5 phases

## Analyse quantitative de la solution

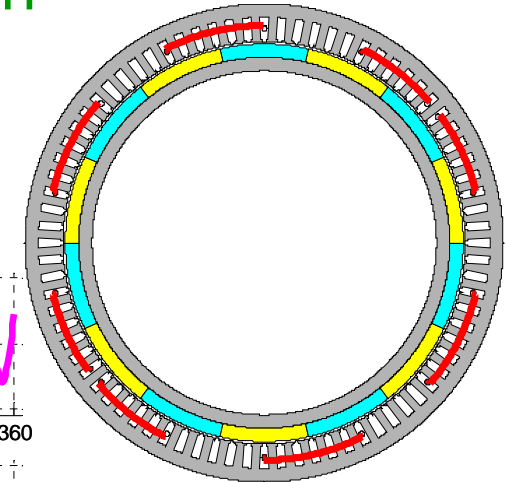
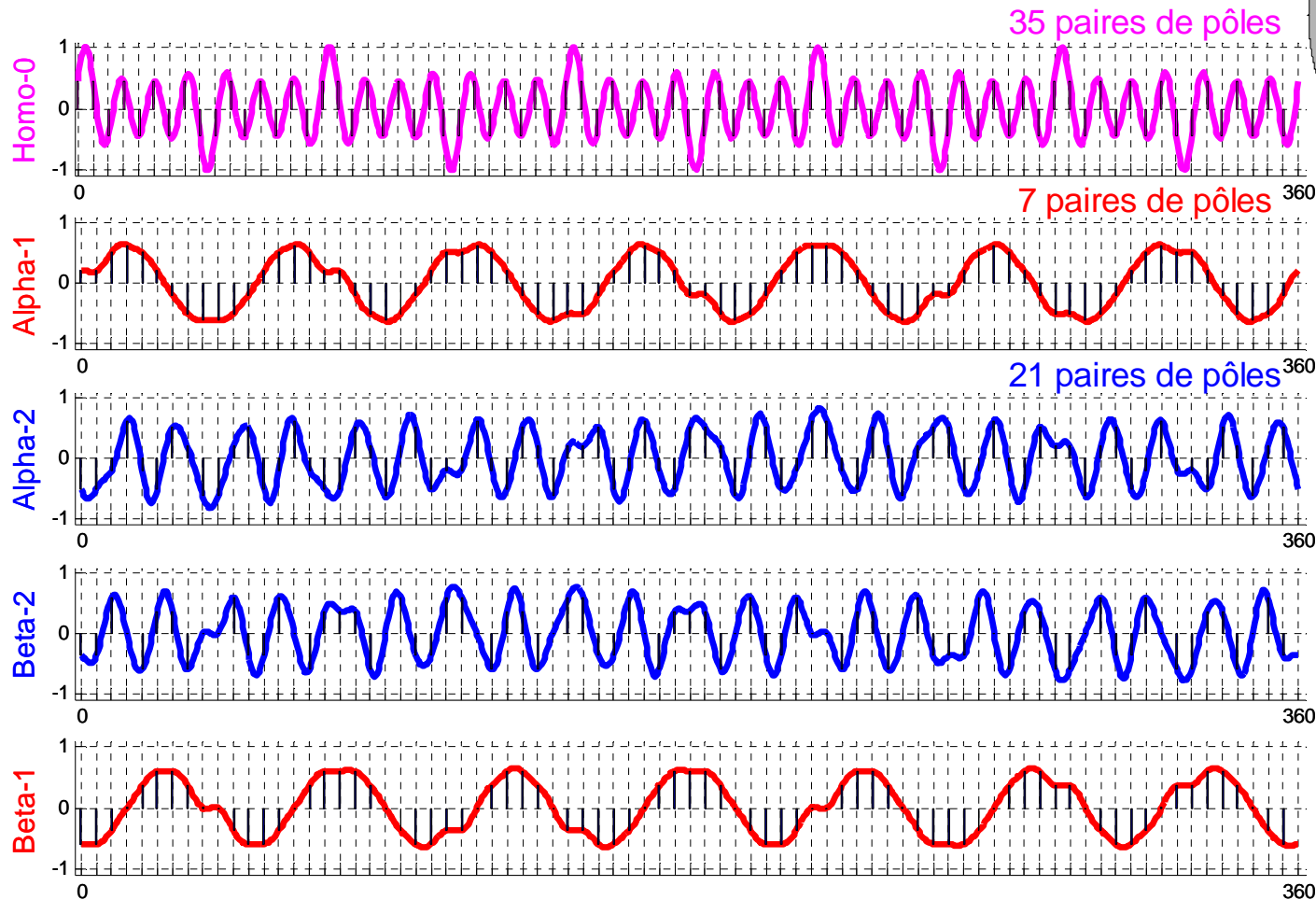


# Exemple : moteur 5 phases

## Analyse qualitative de la solution

Distribution de bobinages fictifs correspondants

→ ANALYSE PAR TFD



*Solution acceptée*

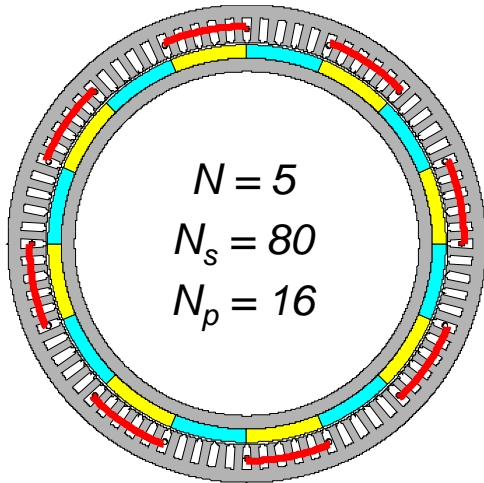
Equilibre des bobinages fictifs



Sous-harmoniques de FMM

# Exemple : moteur 5 phases

## Résultats

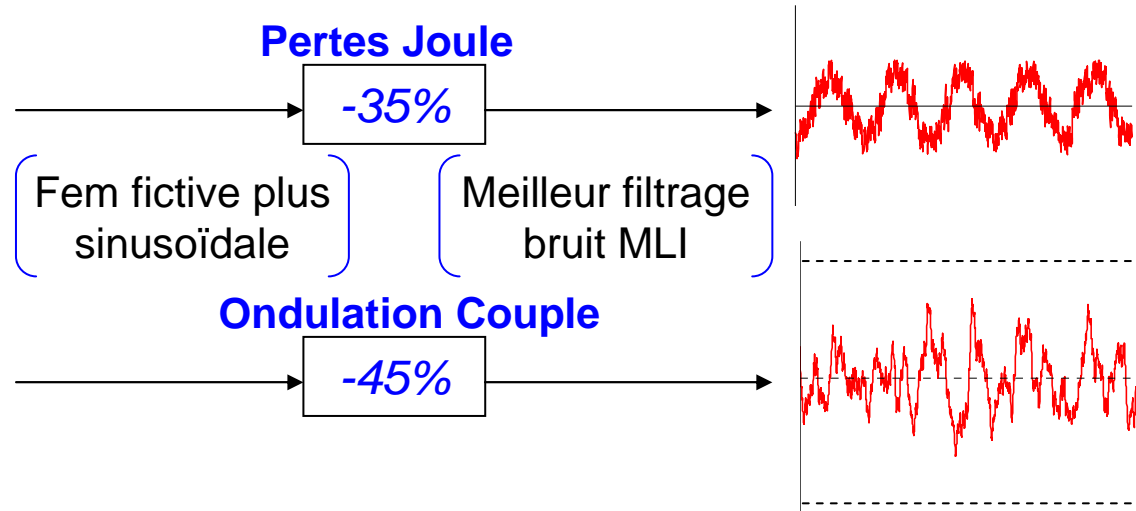
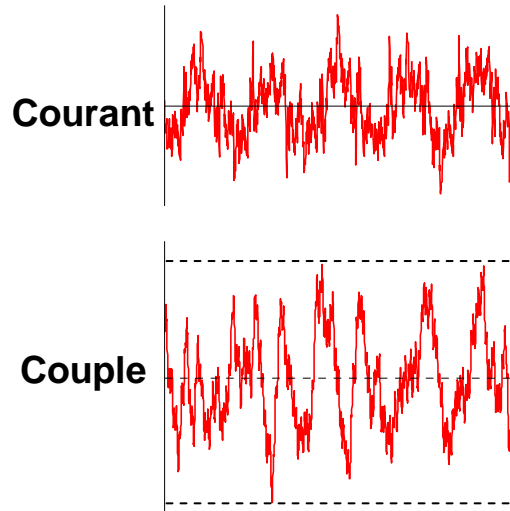
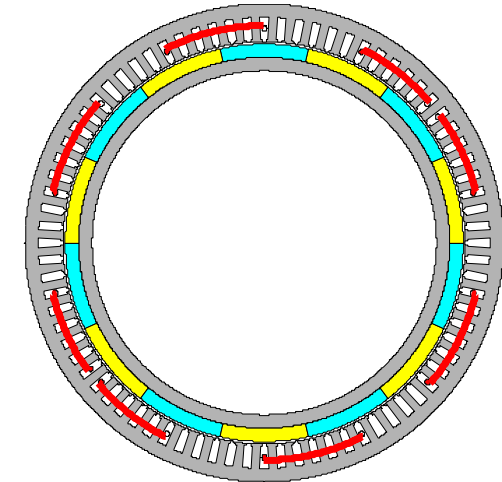


Machine de référence à bobinage conventionnel

### Résultats contrôlés numériquement

Simulation ensemble convertisseur-machine

$f_{MLI} = 2000 \text{ Hz}$





# Conclusion

## Synthèse

Machines fictives caractérisées par des grandeurs EM obtenues par projection sur espaces propres de définition

〔 Outil éprouvé pour l'analyse convertisseur-machine et la définition d'architectures de commande 〕

Extension de la notion de machine fictive

〔 grandeurs fictives de conception : bobinage et couche d'aimants 〕

Caractérisation des machines fictives par TFD

〔 concision des formulations (pas de redondance) 〕

〔 interprétation fréquentielle des changements de base définissant les machines fictives 〕

〔 analyse qualitative des bobinages fictifs 〕

Mise en œuvre de démarches de conception utilisant une évaluation analytique du champ

〔 Couche d'aimants  
Bobinage 〕

# Conclusion Perspectives

## Modélisation

- Modéliser la mutualisation liée aux têtes de bobine
- Modéliser les efforts radiaux engendrés par les configurations fractionnaires
- Modéliser les pertes fer
- Modéliser le comportement thermique

## Méthodes de conception

- Etudier le rebouclage automatique de la procédure de sélection
- Etudier de nouveaux paramétrages pour la procédure de sélection du bobinage
- Dans la procédure d'optimisation de la couche d'aimants, garantir la stabilité magnétique

→ Tester la faisabilité des solutions proposées  
(simulations affinées, expérimentations)