



POLYTECH.MONS

Journée d'étude en Électronique de  
Puissance - 19 mars 2009 - ULB

# Dimensionnement par optimisation de l'inductance couplée d'un convertisseur de type *Flyback*

Ir C. Versèle  
Dr Ir O. Deblecker  
Prof. Dr Ir J. Lobry

Service de Génie Electrique  
Faculté Polytechnique de Mons

19/03/2009

FACULTÉ POLYTECHNIQUE DE MONS



ACADÉMIE  
UNIVERSITAIRE  
WALLONIE-  
BRUXELLES

# Plan de la présentation

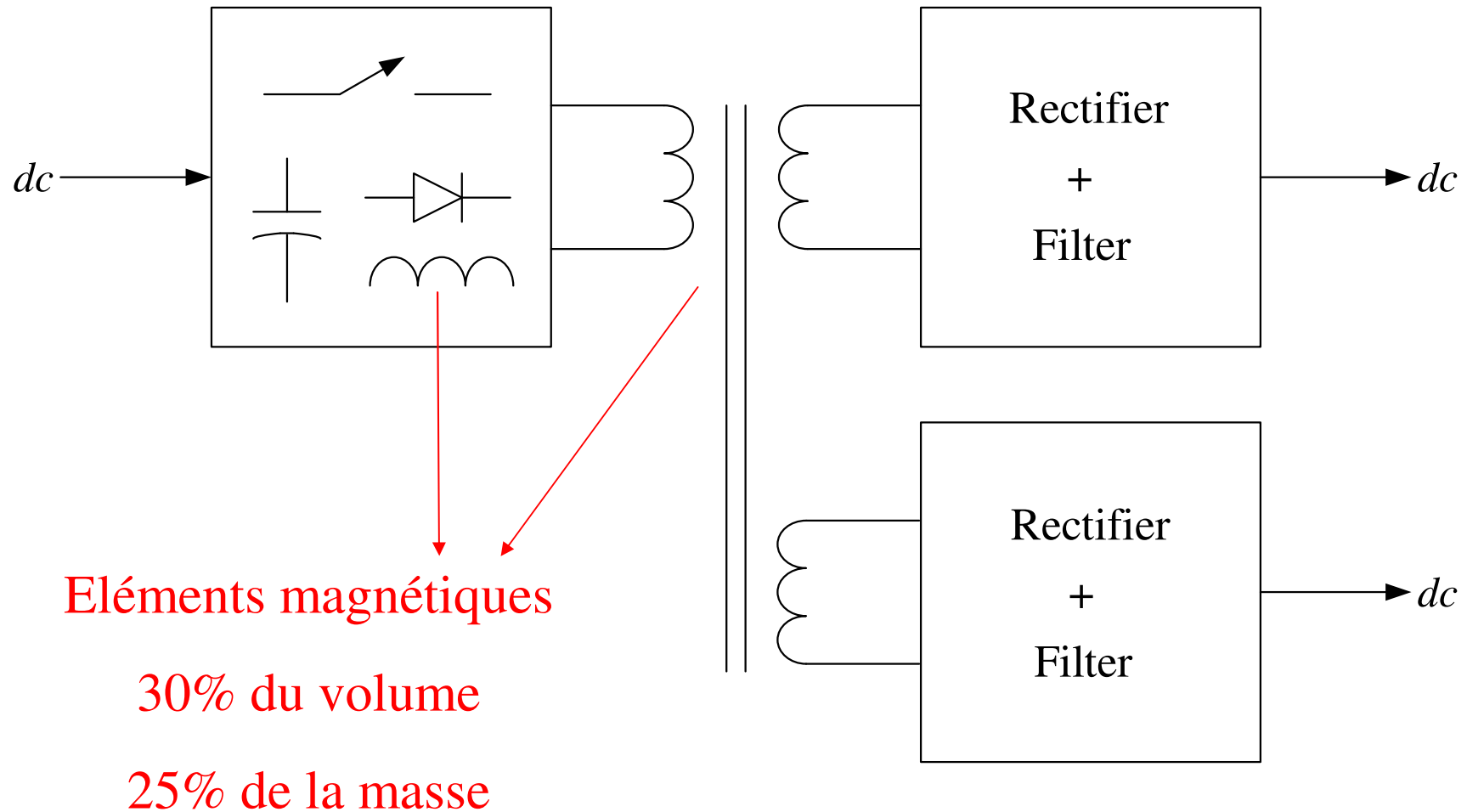
- Introduction / Contexte
- Optimisation multi-objectif par algorithmes génétiques
- Modélisation des éléments magnétiques
- Application : convertisseur *Flyback*
- Conclusion et perspectives

# Plan de la présentation

## ➤ **Introduction / Contexte**

- Optimisation multi-objectif par algorithmes génétiques
- Modélisation des éléments magnétiques
- Application : convertisseur *Flyback*
- Conclusion et perspectives

# Introduction / Contexte (1)



# Introduction / Contexte (2)

- Réduction des volume et masse des éléments magnétiques : augmentation de la fréquence **MAIS** augmentation des pertes
- Optimisation indispensable : problème multi-objectif
- Méthode d'optimisation par algorithmes génétiques
- Modélisation de l'élément magnétique (modèles analytiques)
  - Modèle géométrique
  - Modèle de pertes
  - Modèle thermique
- Application : inductance couplée d'un convertisseur *Flyback*

# Plan de la présentation

- Introduction / Contexte
- **Optimisation multi-objectif par algorithmes génétiques**
- Modélisation des éléments magnétiques
- Application : convertisseur *Flyback*
- Conclusion et perspectives

# Optimisation multi-objectif par algorithmes génétiques (1)

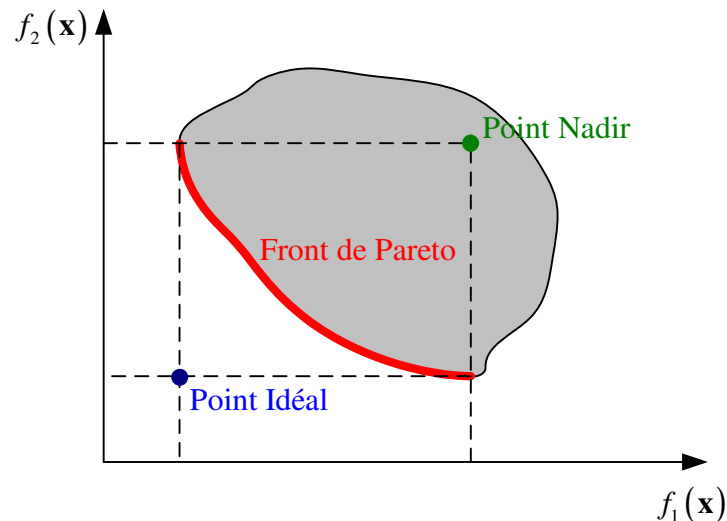
- Un problème d'optimisation multi-objectif peut être formulé de la façon suivante :

$$\begin{cases} \min / \max f_m(\mathbf{x}), & m = 1, 2, \dots, M; \\ g_j(\mathbf{x}) \geq 0, & j = 1, 2, \dots, J; \\ h_k(\mathbf{x}) = 0, & k = 1, 2, \dots, K; \\ x_i^L \leq x_i \leq x_i^U, & i = 1, 2, \dots, N. \end{cases}$$

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{N-1} \\ x_N \end{pmatrix} \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_{M-1} \\ f_M \end{pmatrix}$$

# Optimisation multi-objectif par algorithmes génétiques (2)

- Problème multi-objectif : solution n'est pas unique
- Ensemble des solutions non dominées constituent la *surface de compromis* ou *surface de Pareto* ou encore *front de Pareto* (problème à deux objectifs)

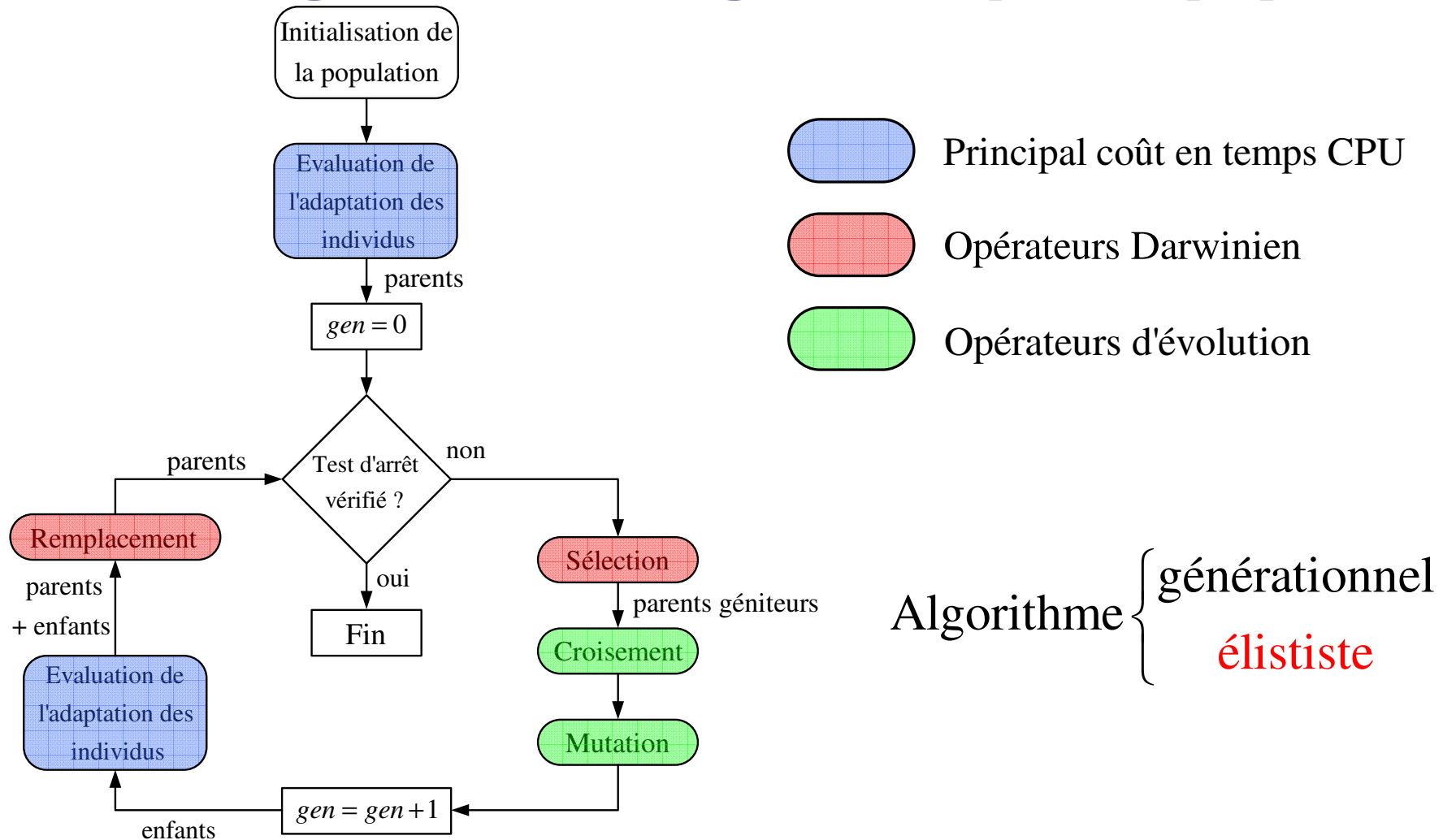


- Optimisation à l'aide d'algorithmes génétiques

# Optimisation multi-objectif par algorithmes génétiques (3)

- + Capacité de traiter les problèmes à variables continues, discrètes ou mixtes
- + Nécessitent uniquement de connaître la valeur des objectifs sans faire appel à leurs dérivées mais même sans exiger leurs expressions analytiques
- + Difficilement piégés par des optima locaux
- + Possibilité de traiter un grand nombre de paramètres
- + Efficaces pour une grande variété de problèmes
- + Preuves de leur efficacité pour les problèmes rencontrés en Génie Electrique (optimisation de machines électriques, de convertisseur électroniques de puissance, etc.)
- Temps de calcul peut être relativement long

# Optimisation multi-objectif par algorithmes génétiques (4)



# Optimisation multi-objectif par algorithmes génétiques (5)

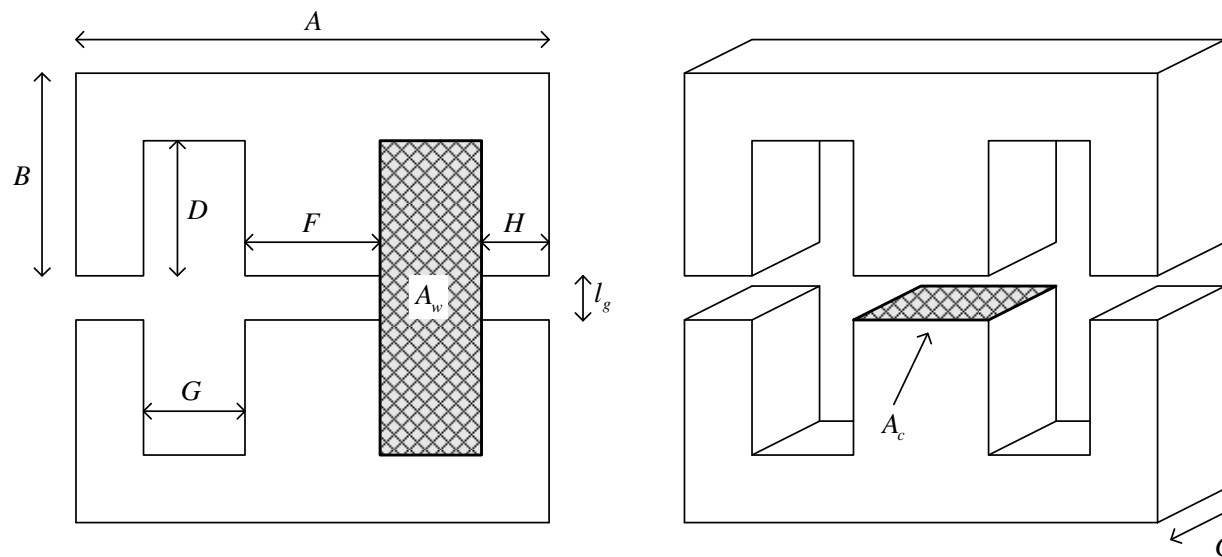
- Grand nombre d'algorithmes disponibles dans la littérature
- **NSGA-II** : *Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm*
- Algorithme élitiste → permet de conserver les meilleurs individus au cours de l'optimisation et améliore la convergence de l'algorithme
- Un des plus performants actuellement
- Utilisé pour optimiser un grand nombre de problèmes rencontrés dans les sciences de l'ingénieur et notamment en Génie Electrique
- Efficacité prouvée à travers un grand nombre de publications scientifiques

# Plan de la présentation

- Introduction / Contexte
- Optimisation multi-objectif par algorithmes génétiques
- **Modélisation des éléments magnétiques**
- Application : convertisseur *Flyback*
- Conclusion et perspectives

# Modélisation des éléments magnétiques (1)

- **Modèle géométrique** : basé sur le « produit des aires » :



$$A_p = A_c A_w = 2CDFG = \prod_{i=1}^3 2k_i F^4 \quad k_1 = \frac{C}{F} ; k_2 = \frac{D}{F} ; k_3 = \frac{G}{F}$$

$l_g \ll F$

Variables d'optimisation

# Modélisation des éléments magnétiques (2)

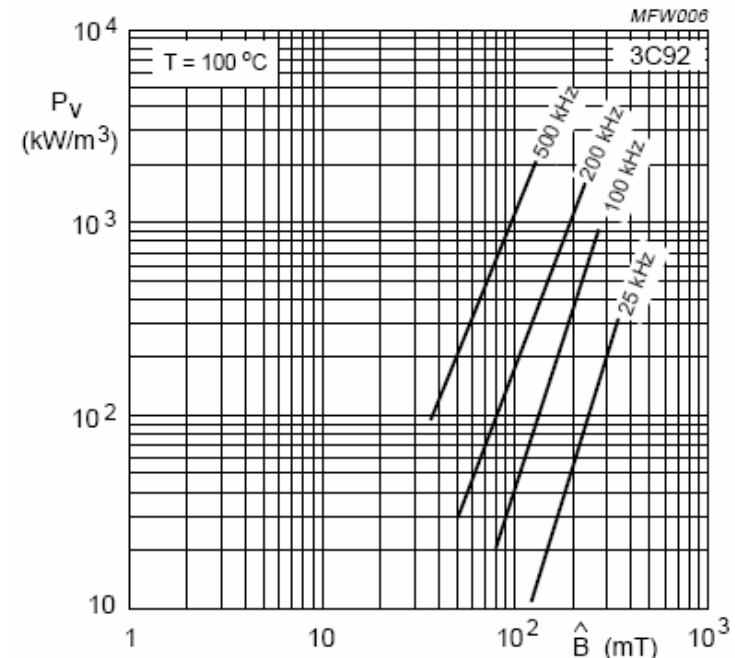
## ➤ Modèle de pertes :

### ➤ Pertes dans le noyau magnétique :

$$P_{Fe} = K_c \cdot V_{core} \cdot f^\alpha \cdot B_{ac}^\beta$$

### ➤ Pertes dans les bobinages :

$$P_{Cu} = \sum_{i=1}^n F_R(X_i) \cdot R_{dc,i} \cdot I_{i,rms}^2$$



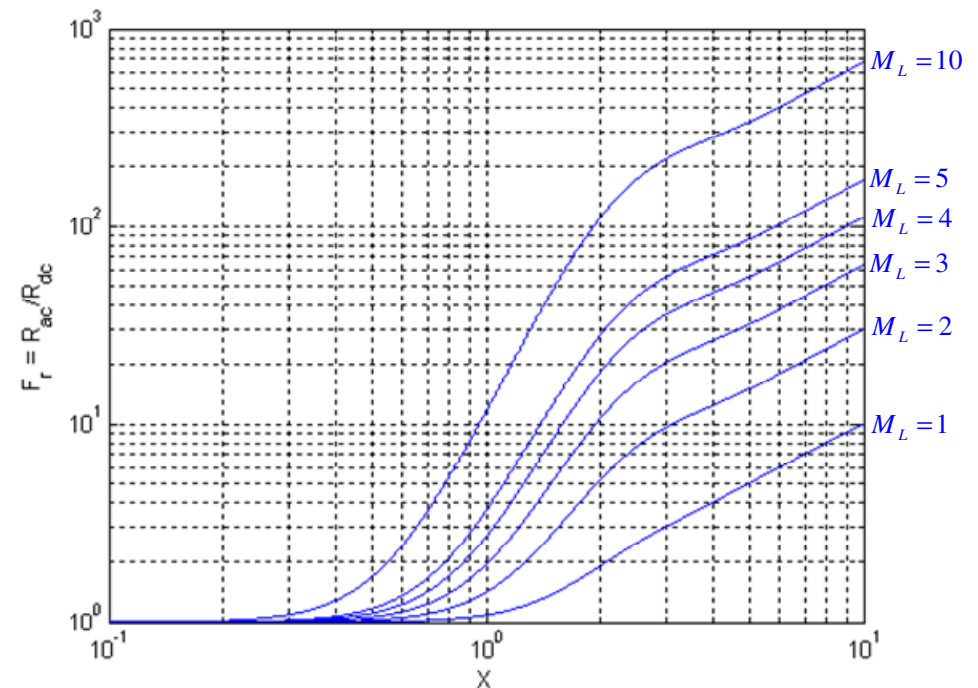
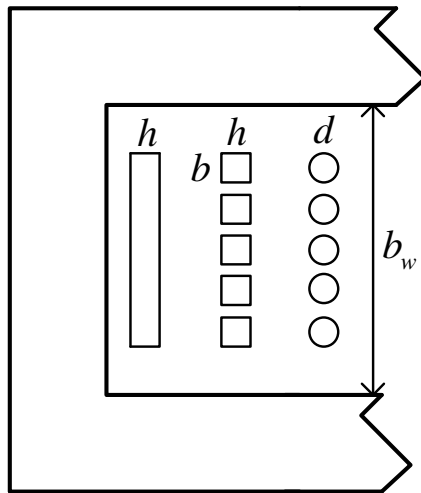
Source : <http://www.ferroxcube.com>

# Modélisation des éléments magnétiques (3)

➤ **Modèle de *Dowell*** : calcul du facteur  $F_R$  :

$$F_R(X) = \frac{R_{ac}}{R_{dc}} = X \left[ \frac{\sinh(2X) + \sin(2X)}{\cosh(2X) - \cos(2X)} + \frac{2(M_L^2 - 1)}{3} \frac{\sinh(X) - \sin(X)}{\cosh(X) + \cos(X)} \right]$$

$$X = \frac{h}{\delta} \sqrt{K_{layer}} \quad \delta = \sqrt{\frac{\rho_{copper}}{\pi f \mu_0}} \quad K_{layer} = \frac{N_L b}{b_w}$$



# Modélisation des éléments magnétiques (4)

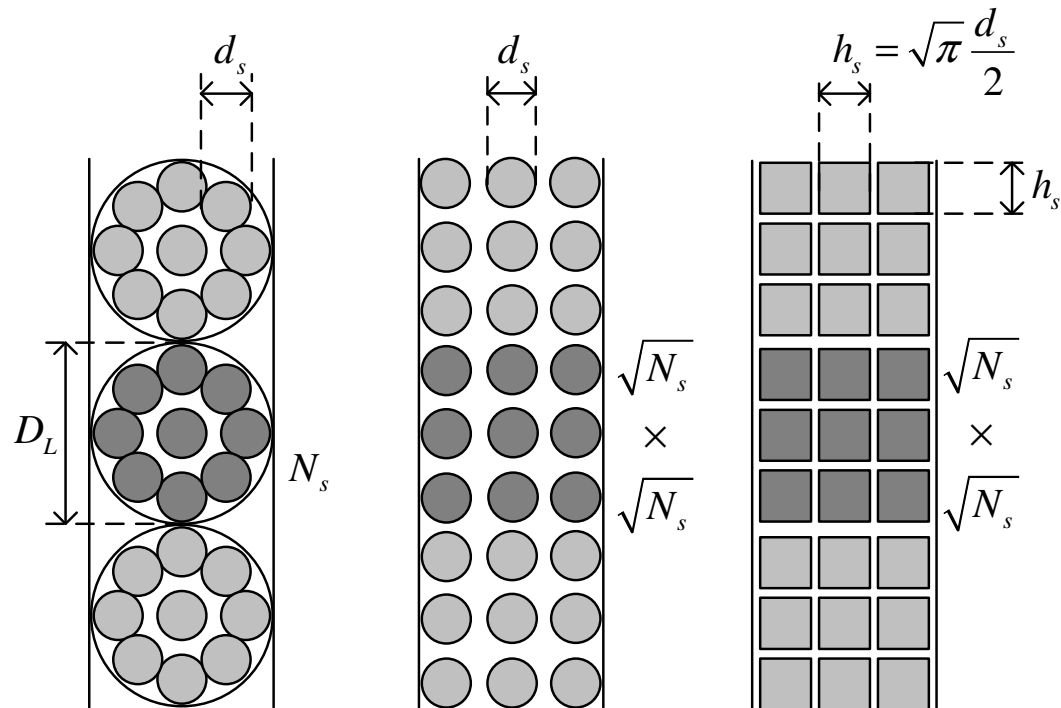
➤ Extension du modèle de *Dowell* au fils de Litz :

$$F_R(X) = \frac{R_{ac}}{R_{dc}} = X \left[ \frac{\sinh(2X) + \sin(2X)}{\cosh(2X) - \cos(2X)} + \frac{2(M_L^2 N_s - 1)}{3} \frac{\sinh(X) - \sin(X)}{\cosh(X) + \cos(X)} \right]$$

$$X = \frac{d_s}{2\delta} \sqrt{\pi K_{layer}}$$

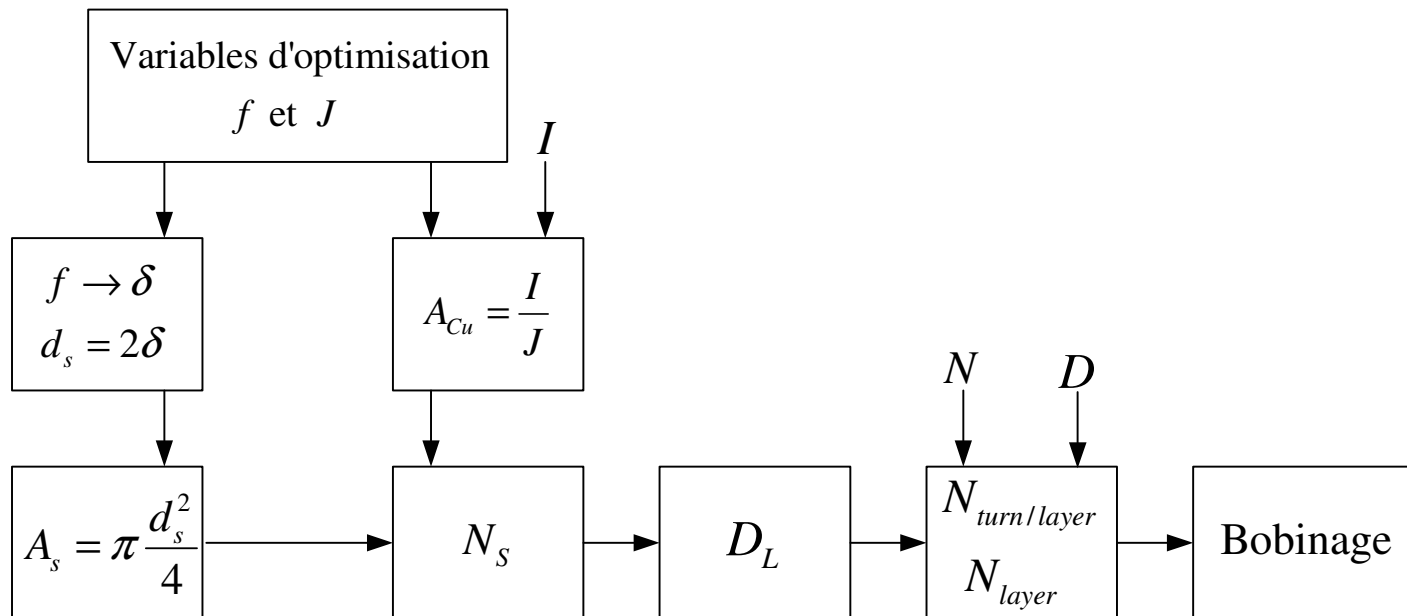
$$\delta = \sqrt{\frac{\rho_{copper}}{\pi f \mu_0}}$$

$$K_{layer} = \frac{\sqrt{\pi N_s d_s}}{2D_L}$$



# Modélisation des éléments magnétiques (5)

## ➤ Dimensionnement du bobinage :

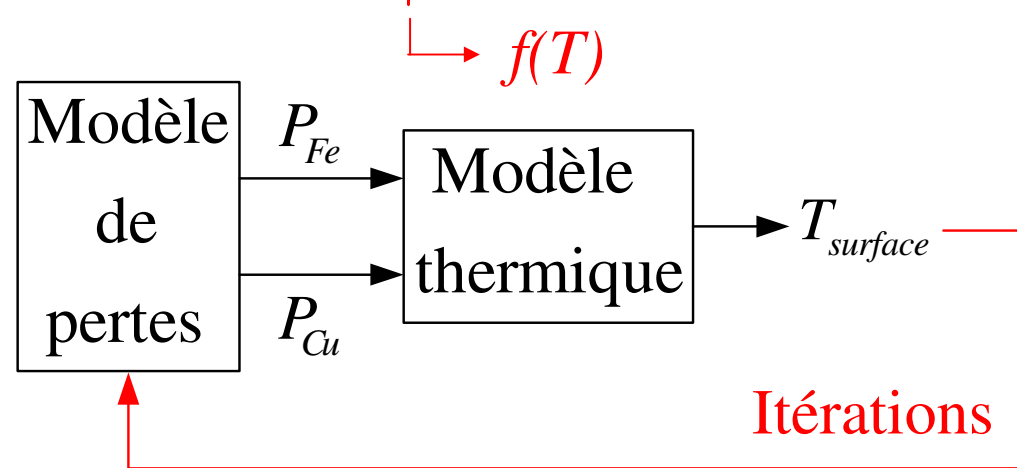


## ➤ **Contrainte** : bobinage doit être inséré dans la fenêtre de bobinage

# Modélisation des éléments magnétiques (6)

- **Modèle thermique** : estimation de l'élévation de température  $\Delta T$

$$\Delta T = T_{surface} - T_a = \frac{1}{hA_t} (P_{Fe} + P_{Cu}) \quad h \approx 10 \text{ W / m}^2\text{°C}$$



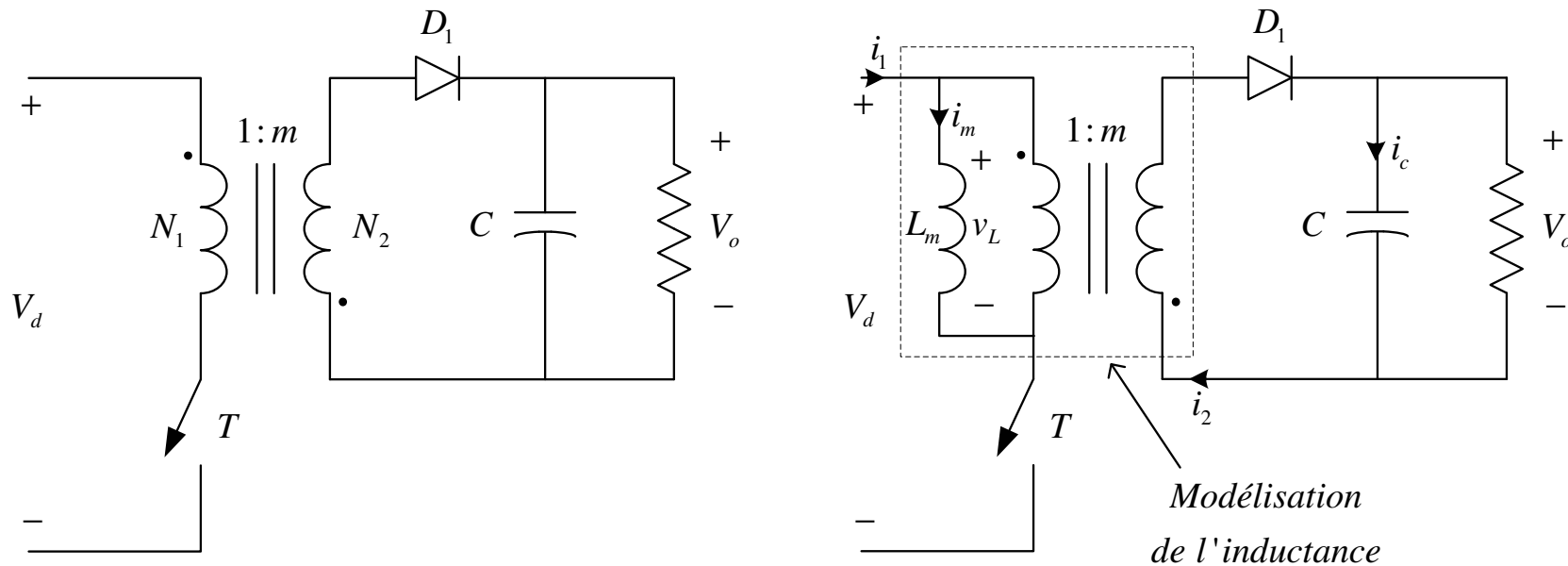
- **Contrainte** : élévation de température  $\Delta T$  limitée

# Plan de la présentation

- Introduction / Contexte
- Optimisation multi-objectif par algorithmes génétiques
- Modélisation des éléments magnétiques
- **Application : convertisseur Flyback**
- Conclusion et perspectives

# Application : convertisseur *Flyback* (1)

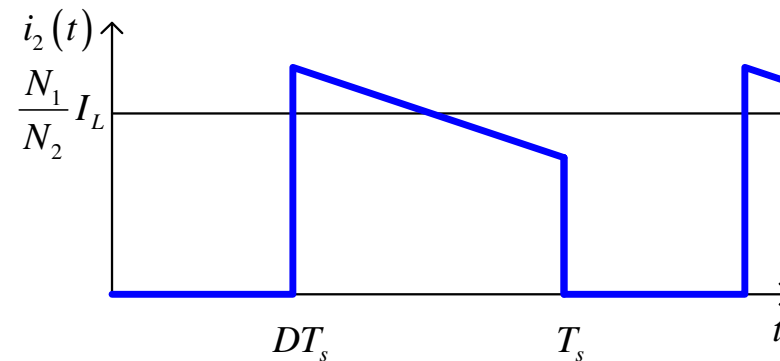
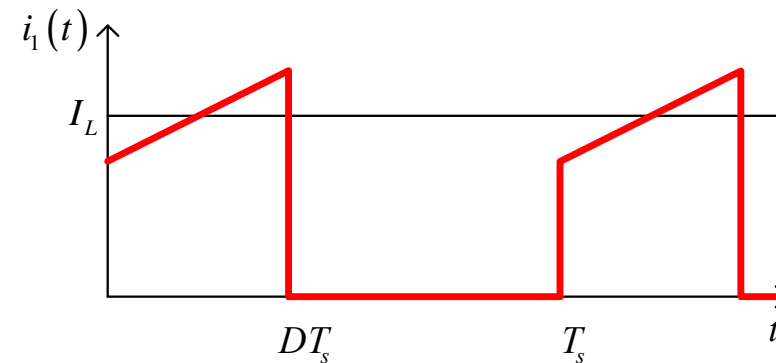
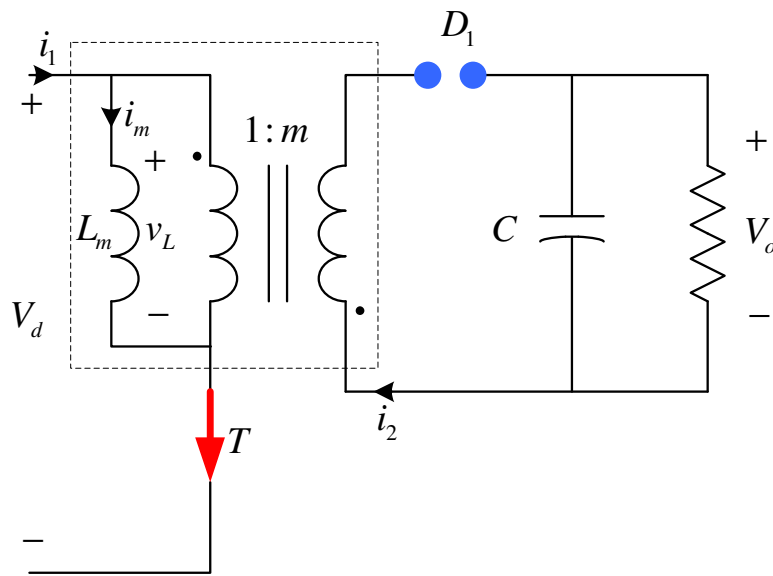
➤ **Convertisseur *Flyback* (1 seul secondaire) :**



➤ **Contrainte :** mode de conduction continue

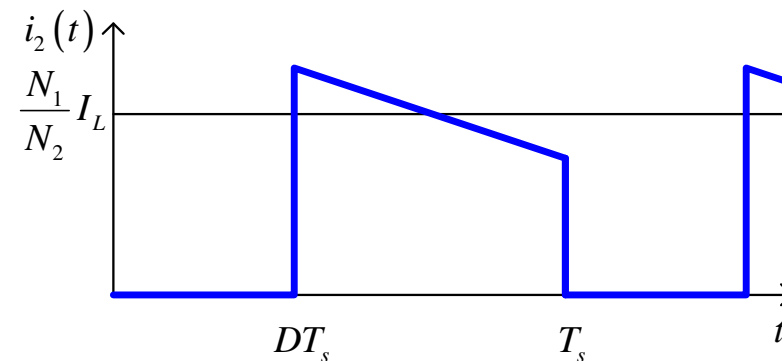
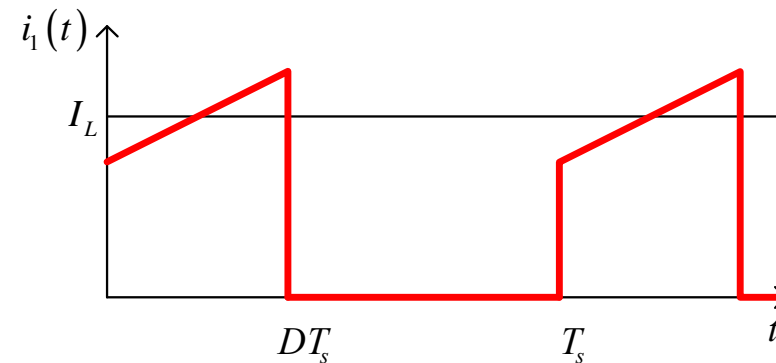
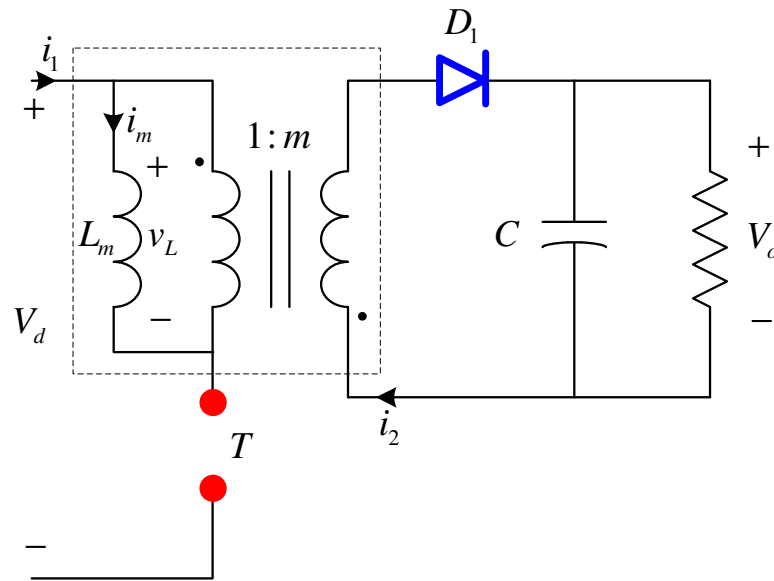
# Application : convertisseur *Flyback* (2)

➤ Formes d'onde en conduction continue :



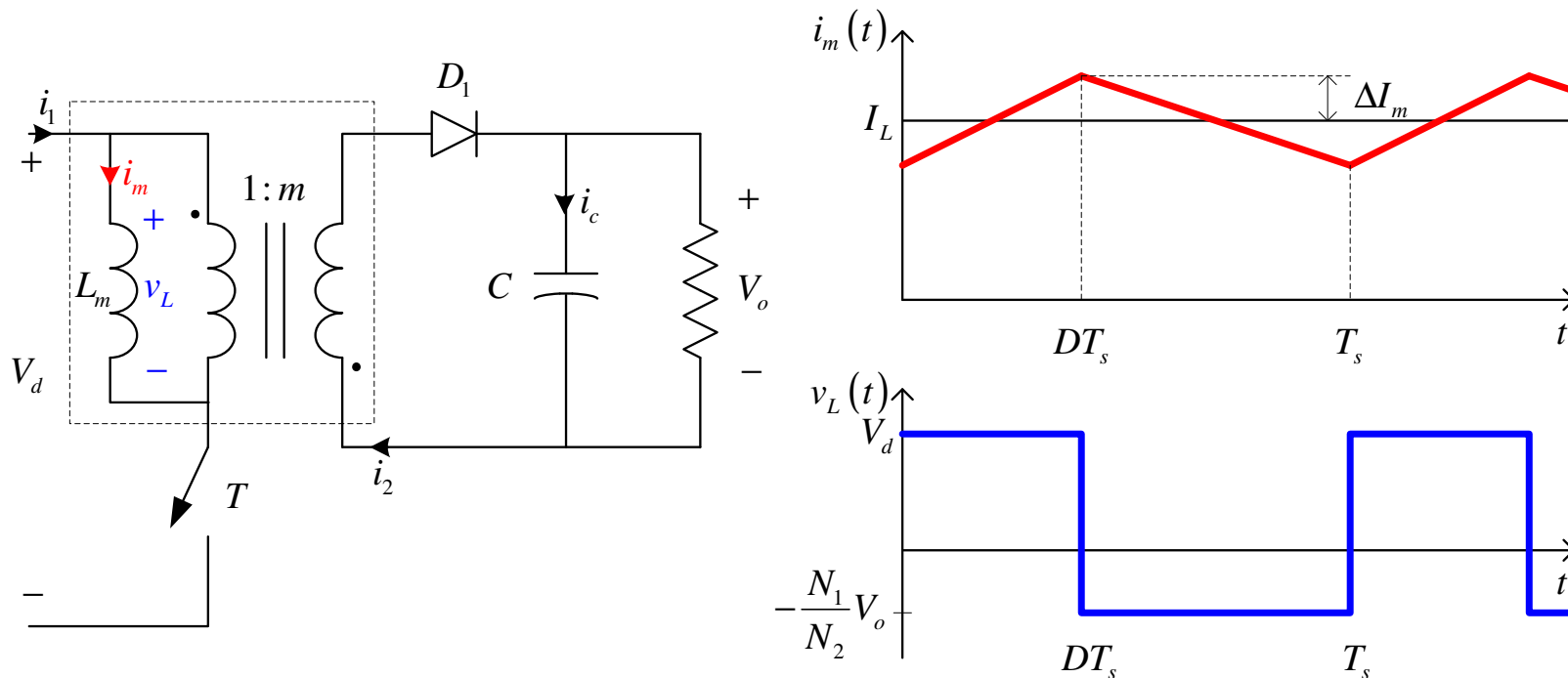
# Application : convertisseur *Flyback* (2)

## ➤ Formes d'onde en conduction continue :



# Application : convertisseur *Flyback* (3)

## ➤ Formes d'onde en conduction continue :



# Application : convertisseur *Flyback* (4)

## ➤ Spécifications du convertisseur :

$V_d$	200 V
$V_o$	20 V
$I_o$	5 A
$D$	0,4
$m(=N_2/N_1)$	0,15
$\Delta I_m/I_m$	20%

$$I_m = \frac{N_2}{N_1} \frac{1}{1-D} I_o = m \frac{1}{1-D} I_o$$

$$L_m = \frac{V_d D}{2\Delta I_m f}$$

Source : ERICKSON R. W. and MAKSIMOVIC D., Fundamentals of Power Electronics, 2nd Edition, Kluwer Academic Publisher, New York, 2001.

## ➤ Produit des aires (seconde formulation) :

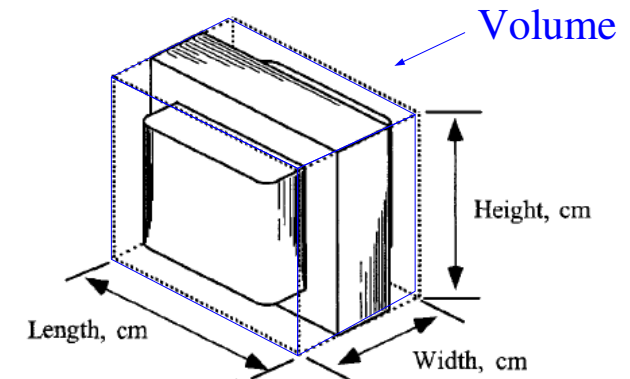
$$A_p = \frac{L_m \cdot I_{1,\max}}{B_{\max}} \left( \frac{I_{1,rms}}{k_{b1} \cdot J_1} + \frac{m \cdot I_{2,rms}}{k_{b2} \cdot J_2} \right)$$

# Application : convertisseur *Flyback* (5)

➤ Objectifs à optimiser :  $P_{tot}$  et *Volume*

➤ Variables d'optimisation :

Variables d'optimisation	Unités	Bornes de variations
$k_1$	-	[0,1 ; 10]
$k_2$	-	[0,1 ; 10]
$k_3$	-	[0,1 ; 10]
$B_m$	T	[0,01 ; 0,33] (ferrite 3C90)
$f$	kHz	[20 ; 150]
$J_1$	A/mm <sup>2</sup>	[1 ; 4]
$J_2$	A/mm <sup>2</sup>	[1 ; 4]



➤ Contraintes :

- Dimensions du bobinage
- Conduction continue (→ contrainte sur  $L_m$ )
- Thermique

# Application : convertisseur *Flyback* (6)

## ➤ Configuration du *NSGA-II* :

- Nombre d'individus dans la population : 200
- Nombre de générations : 200
- Probabilité de croisement : 0,85
- Probabilité de mutation : 0,015

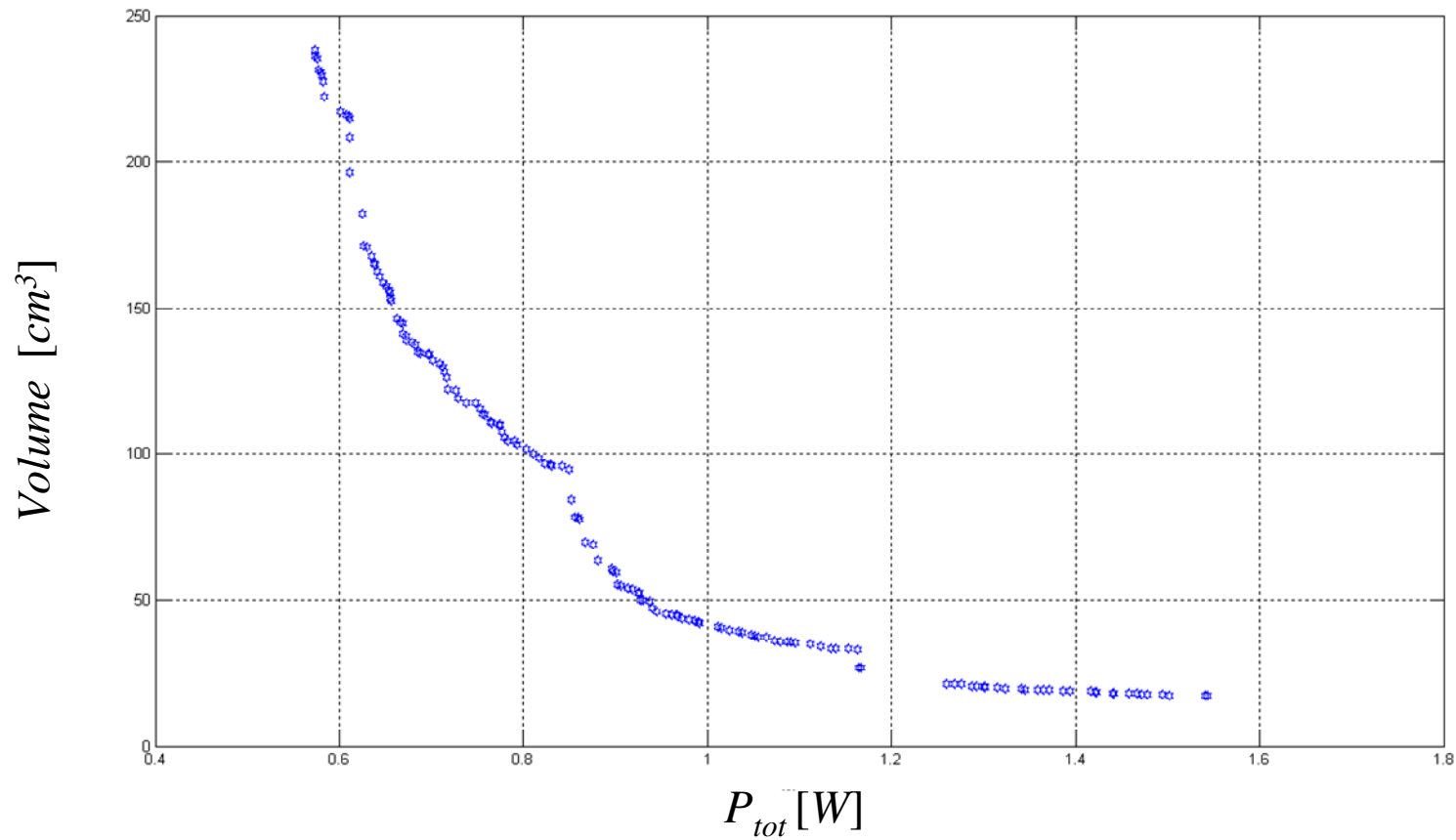
## ➤ Procédure d'optimisation programmée sous *Matlab*

## ➤ Statistiques :

- Nombre de croisements : 59650 (sur 70000 possibles)
- Nombre de mutations : 4186 (sur 280000 possibles)
- Durée de la procédure d'optimisation : 178 s

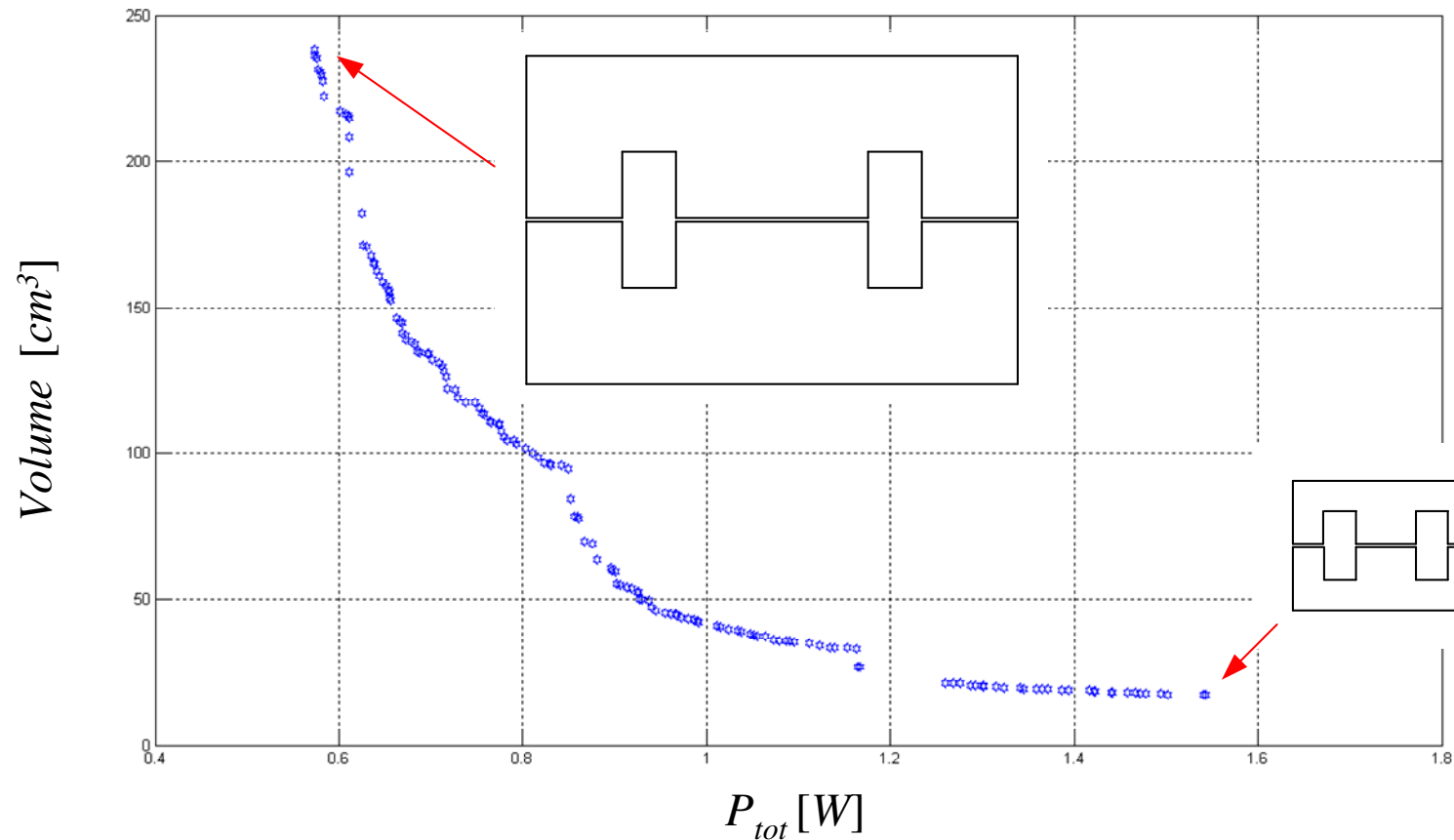
# Application : convertisseur *Flyback* (7)

## ➤ Front de *Pareto* :



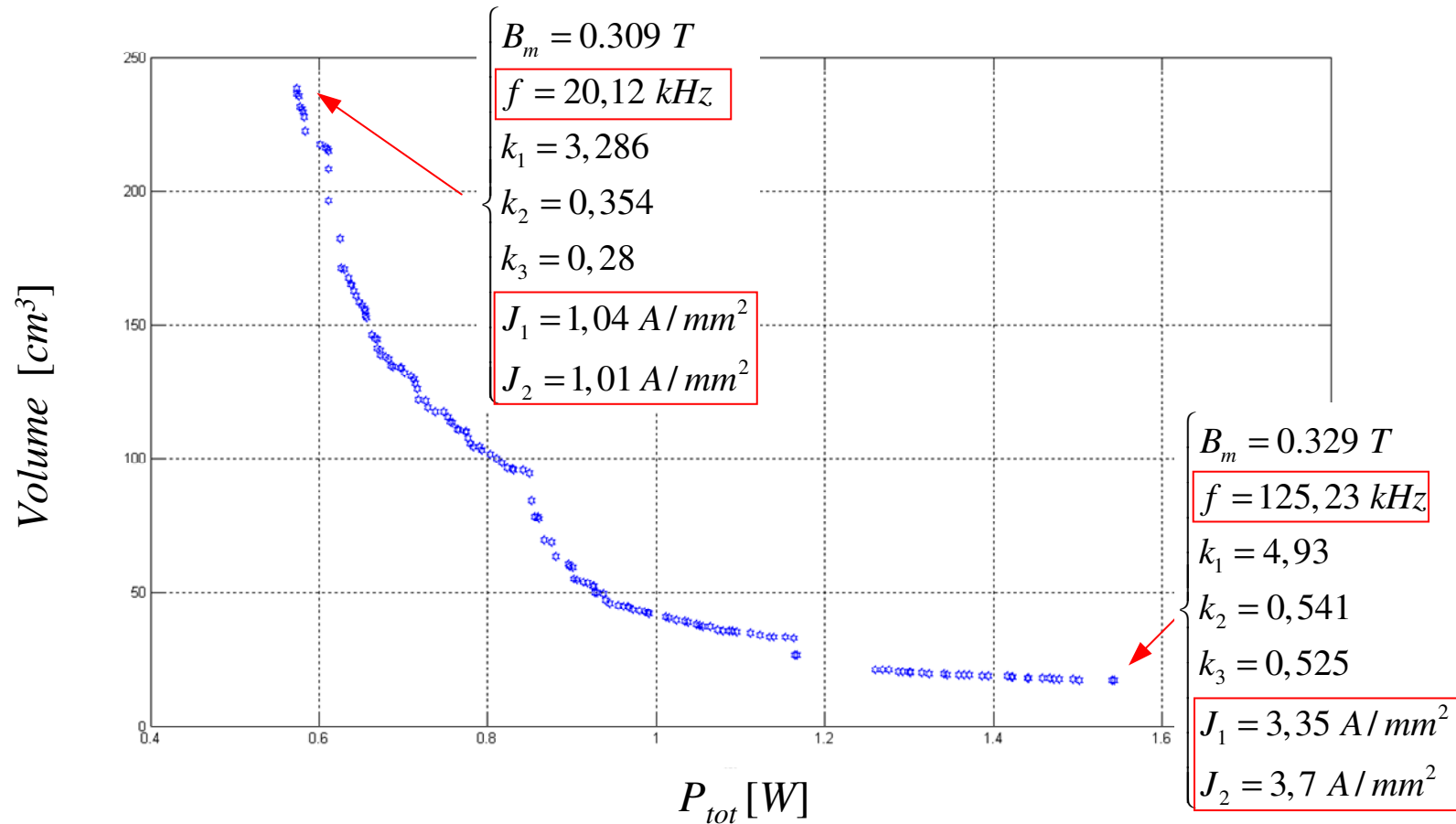
# Application : convertisseur *Flyback* (7)

## ➤ Front de *Pareto* :



# Application : convertisseur *Flyback* (7)

## ➤ Front de *Pareto* :



# Plan de la présentation

- Introduction / Contexte
- Optimisation multi-objectif par algorithmes génétiques
- Modélisation des éléments magnétiques
- Application : convertisseur *Flyback*
- **Conclusion et perspectives**

# Conclusion et perspectives

- Méthode de dimensionnement par optimisation multi-objectif à l'aide d'algorithmes génétiques des éléments magnétiques
- Principal avantage : différentes solutions sont proposées au concepteur qui peut choisir *a posteriori* la solution retenue
- Application : dimensionnement de l'inductance d'un *Flyback*
- Perspectives :
  - Amélioration du modèle thermique
  - Optimisation complète du convertisseur
  - Vérifications expérimentales

**Merci pour  
votre attention !**

