

Méthode de simulation et d'optimisation des réacteurs nucléaires

R. Chambon

Physique des réacteurs

Plan

- Introduction - Description des réacteurs
- Méthodes de simulation
 - Méthodes déterministes / probabilistes
 - Transport / Diffusion
 - Gestion du combustible
- Méthodes d'optimisation de la gestion du combustible
 - Méthodes de gradients
 - Méthodes méta-heuristiques

Introduction

- But: illustrer le domaine d'application des divers codes de simulation pour les réacteurs de type REP et CANDU

Introduction

- But: illustrer le domaine d'application des divers codes de simulation pour les réacteurs de type REP et CANDU

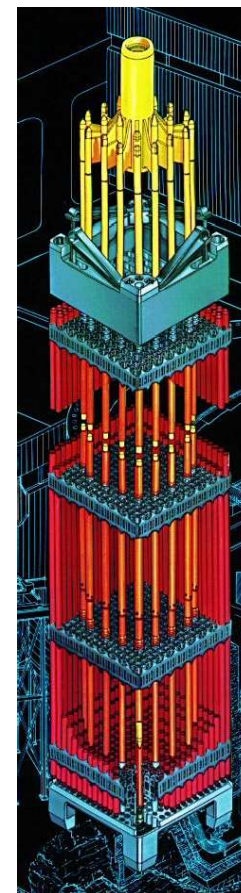
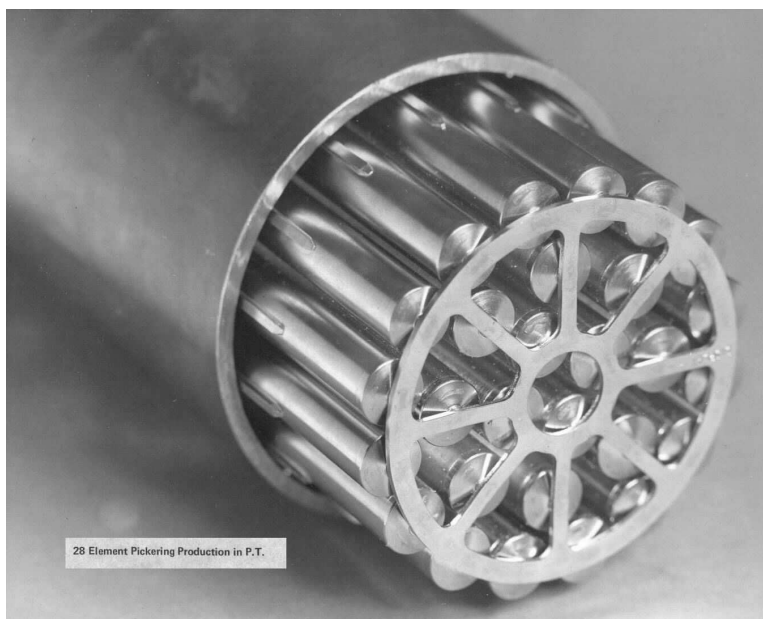
Pastille de combustible



Introduction

- But: illustrer le domaine d'application des divers codes de simulation pour les réacteurs de type REP et CANDU

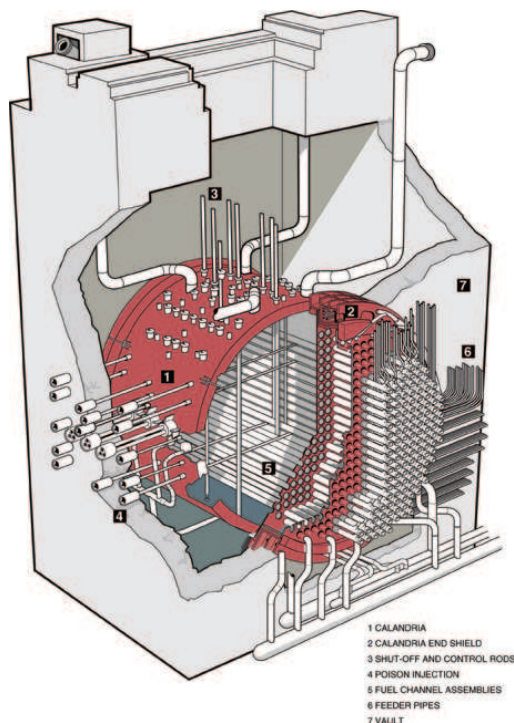
Grappe (CANDU) Assemblage (REP)



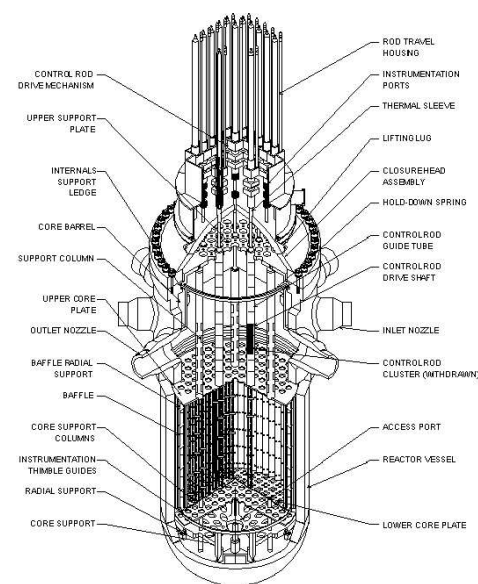
Introduction

- But: illustrer le domaine d'application des divers codes de simulation pour les réacteurs de type REP et CANDU

CANDU



REP



recharge en continu vs recharge à l'arrêt

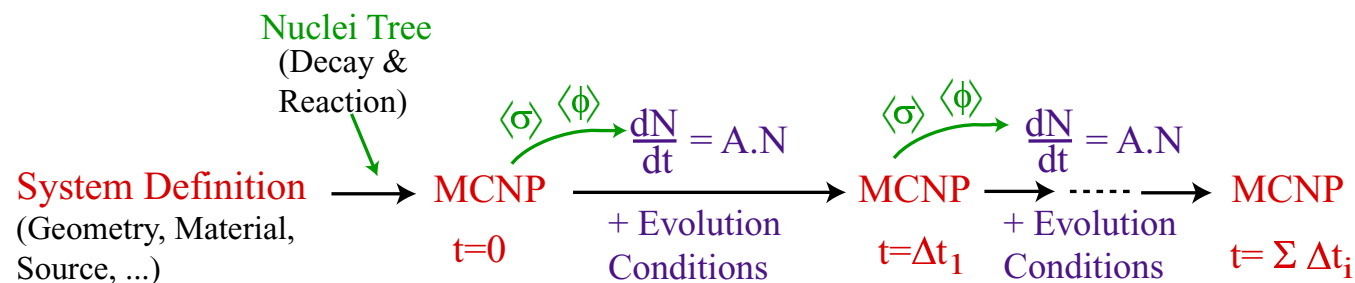
Méthodes de simulation

- Simulation à un temps donné (calcul statique)
 - simuler l'énergie relachée par le combustible, donc le nombre de fissions
 - faire l'inventaire des noyaux présents dans le combustible
- 2 approches: probabiliste et déterministe

Méthodes de simulation

● Simulation dans le temps

approche quasi-statique



équation de Bateman

Méthodes de simulation

- Méthodes Probabilistes
 - Code Monté-Carlo: MCNP, TRIPOLI. Suivi de chaque neutron individuellement, puis moyenne
 - Avantages: données continues en énergie, description des géométries
 - Inconvénients: statistiques \Rightarrow précision \leftrightarrow nombre \Rightarrow lents
 - Utilisation: calculs de référence

Méthodes de simulation

- Méthodes Déterministes
 - Suivi de la population des neutrons
 - Inconvénients: plusieurs approximations dont des données discontinues en énergie (multigroupes), description des géométries parfois limitées
 - Avantage: méthodes rapides
 - Utilisation: calculs de design et suivi de cœur

Transport / Diffusion

- Equation de transport: un bilan de neutron

$$\begin{aligned} \Sigma(r, E)\Phi(r, E, \vec{\Omega}) + \vec{\Omega} \cdot \vec{\nabla} \Phi(r, E, \vec{\Omega}) = \\ \int dE' \int d^2\Omega' \Sigma_s(r, E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) \Phi(r, E', \vec{\Omega}') \\ + \chi(E) \int dE' \int d^2\Omega' \nu \Sigma_f(r, E') dE' \Phi(r, E', \vec{\Omega}') \end{aligned}$$

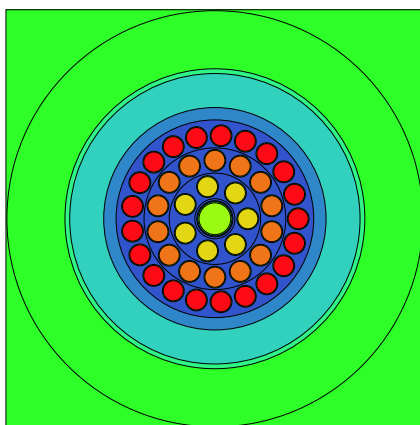
version intégrale

$$\begin{aligned} \Sigma(r, E)\phi(r, E) + \vec{\nabla} \cdot \vec{J}(r, E) = \\ \int dE' \Sigma_s(r, E' \rightarrow E) \phi(r, E') + \chi(E) \int dE' \nu \Sigma_f(r, E') \phi(r, E') dE' \end{aligned}$$

- généralement utilisé avec une discrétisation spatiale et en énergie fine

Transport / Diffusion

- généralement utilisé avec une discrétisation spatiale et en énergie fine
- Limite de la puissance informatique (malgré la parallélisation)



conservation des taux de réactions ($\Sigma\phi$)

Transport / Diffusion

- généralement utilisé avec une discrétisation spatiale et en énergie fine
- Informatique d'autant plus limitée en dynamique
2 approches:
 - Suivi de chaque cellule en transport individuellement: avec son propre historique de puissance
 - Suivi d'une cellule typique en transport: avec une puissance moyenne
paramétrisation des propriétés en fonction de l'énergie relachée,
i.e. le burnup B
- Σ matériaux de structure
 $\Sigma(B)$ combustible

Transport / Diffusion

- Equation de diffusion:

$$\vec{J}(r, E) = -D(r, E)\nabla\phi(r, E)$$

$$\begin{aligned} -\vec{\nabla} \cdot D(r, E)\vec{\nabla}\phi(r, E) + \Sigma_t(r, E)\phi(r, E) - \int_0^\infty dE' \Sigma_s(r, E' \rightarrow E)\phi(r, E') \\ = \frac{1}{k_{eff}} \chi_p(E) \int_0^\infty dE' \nu_p \Sigma_f(r, E', t)\phi(r, E') \end{aligned}$$

quelques groupes d'énergie (typiquement 2),
discrétisation spatiale grossière (quelques points par cellule)

$$(\mathbf{A} - \lambda \mathbf{F})\phi = (\mathbf{A} - \frac{1}{k_{eff}} \mathbf{F})\phi = 0$$

équation aux valeurs propres

Gestion du combustible

- Définition:
quoi
combien
où
quand
- Spécifique à chaque type de réacteur
- Interdépendance avec le design

Gestion du combustible

● Réacteurs REP:

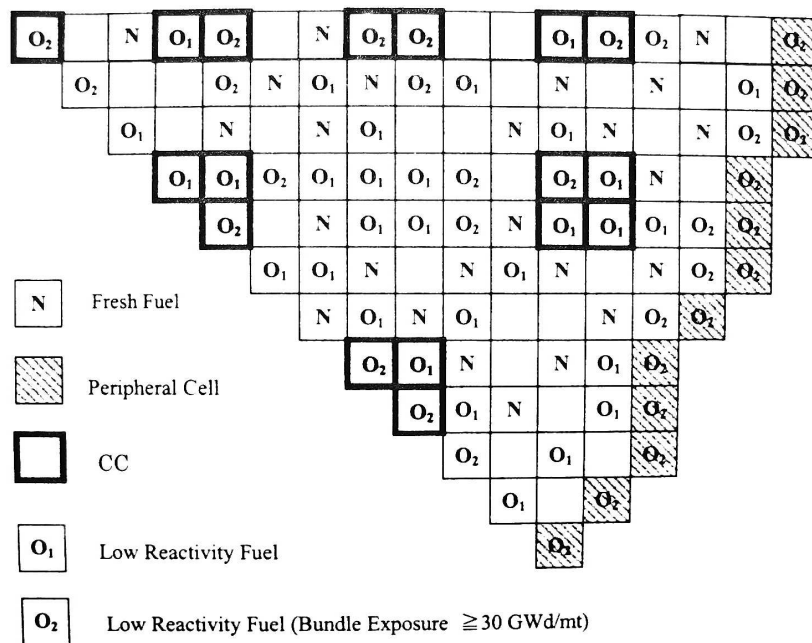


Fig. 5. Sample of optimized pattern in case study I-1.

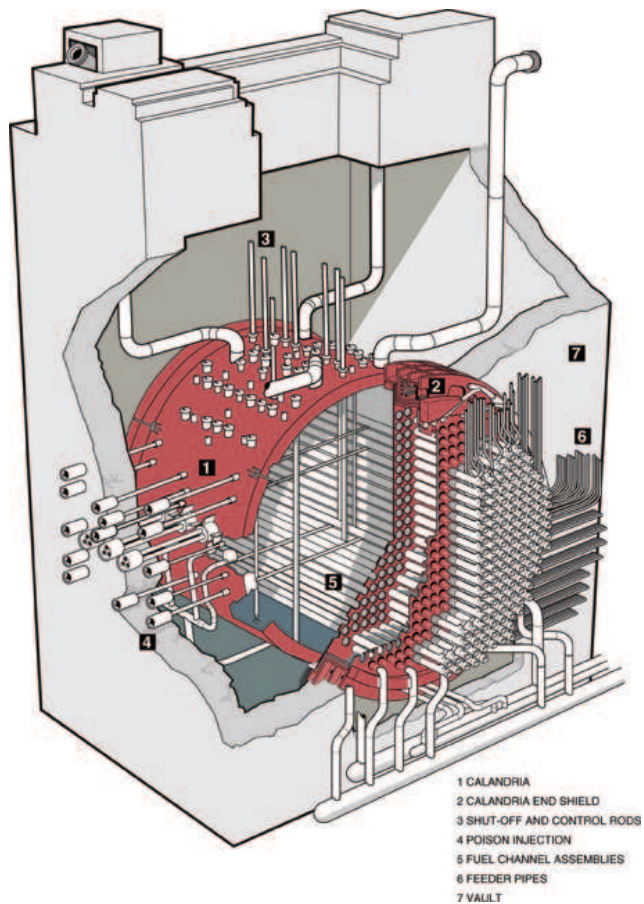
- notions de patron de rechargement, variables combinatoires
- espace de recherche énorme (10^{10} à 10^{25})

Gestion du combustible

- Réacteurs REP:
- But de l'optimisation: deux idées générales
 - Maximiser l'efficacité énergétique du combustible:
 - maximiser B^{fin} , k_{∞}^{fin} , $C_{poisons}^{fin}$
 - minimiser ε^{ini}
 - Maximiser le facteur d'utilisation: L_{cycle}

Gestion du combustible

● Réacteurs CANDU



Gestion du combustible

- Réacteurs CANDU
Approche instantanée: aujourd'hui quel canal recharger?

Gestion du combustible

● Réacteurs CANDU

Approche instantanée: aujourd'hui quel canal recharger?

Approche Time average: la référence

$$\bar{\Sigma}_{jk} = \frac{1}{B_{jk}^{eoc} - B_{jk}^{boc}} \int_{B_{jk}^{eoc}}^{B_{jk}^{boc}} \Sigma(B).dB$$

notion de burnup moyen de sortie B^e

Gestion du combustible

- Problème d'optimisation:
quoi?
but?
limites?

Gestion du combustible

- Problème d'optimisation:
Variables de décision: burnup, enrichissement,
concentration en poisons consommables

Gestion du combustible

- Problème d'optimisation:
Variables de décision: burnup, enrichissement,
concentration en poisons consommables
Fonction objectif: minimiser les coûts en combustible

$$F_C = \frac{\sum_j \left(\frac{C_j(\varepsilon)}{B_j^e} \sum_k H_{jk} \phi_{jk} \right)}{\sum_j \left(\sum_k H_{jk} \phi_{jk} \right)} = \frac{\langle \frac{C(\varepsilon)}{B^e} \cdot H, \phi \rangle_V}{\langle H, \phi \rangle_V}$$

Gestion du combustible

- Problème d'optimisation:
Variables de décision: burnup, enrichissement, concentration en poisons consommables
Fonction objectif: minimiser les coûts en combustible
Contraintes:
 Réacteur critique

$$k_{eff} = \frac{1}{\lambda} = \frac{\langle \phi^*, \mathbf{F}\phi \rangle}{\langle \phi^*, \mathbf{A}\phi \rangle} = k_{ref}$$

Puissance canal maximum

$$q_s = C P P F_s \cdot \frac{V}{V_s} \frac{\langle H, \phi \rangle_{V_s}}{\langle H, \phi \rangle_V} \leq \frac{\bar{P}_{lim}}{\bar{P}} = f_{lim} \quad s \in [1, NCS]$$

Gestion du combustible

- Problème d'optimisation:

$$\min_{\vec{X}} F_C(\vec{X}) \text{ avec } \begin{cases} k_{eff}(\vec{X}) = k_{ref} \\ q_j(\vec{X}) \leq f_j \\ X_n^{INF} \leq X_n \leq X_n^{SUP} \end{cases}$$

$$\min_{\vec{X}} f(\vec{X}) \text{ avec } \begin{cases} h_i(\vec{X}) = b_i \\ g_j(\vec{X}) \leq c_j \\ X_n^{INF} \leq X_n \leq X_n^{SUP} \end{cases}$$

- Outils d'optimisation développés dans le code de diffusion DONJON

Méthodes de gradients

- Principe
 - Fonctionnelles dépendent du flux
 \Rightarrow Problème non linéaire

Méthodes de gradients

- Principe
 - Fonctionnelles dépendent du flux
 \Rightarrow Problème non linéaire
 - Résolution par itérations

Méthodes de gradients

● Principe

- Fonctionnelles dépendent du flux
⇒ Problème non linéaire
- Résolution par itérations
- Linéarisation du problème:

$$\min_{\Delta \vec{X}} \nabla f^k . \Delta \vec{X} \quad \left\{ \begin{array}{ll} \nabla h_i^k . \Delta \vec{X} & = b_i - h_i(\vec{X}^k) \\ \nabla g_j^k . \Delta \vec{X} & \leq c_j - g_j(\vec{X}^k) \\ X_n^{INF} - X_n^k \leq \Delta X_n \leq X_n^{SUP} - X_n^k \end{array} \right.$$

Méthodes de gradients

● Principe

- Fonctionnelles dépendent du flux
⇒ Problème non linéaire
- Résolution par itérations
- Linéarisation du problème:
- Contrainte quadratique S pour limiter le pas d'avance

Méthodes de gradients

● Principe

- Fonctionnelles dépendent du flux
 \Rightarrow Problème non linéaire
- Résolution par itérations
- Linéarisation du problème:
- Contrainte quadratique S pour limiter le pas d'avance
- Résolution du problème linéarisé
 Simplex
 Lemke

Méthodes de gradients

- Calcul des gradients: Théorie de Perturbation Généralisées
 - Formule générale:

$$\nabla u \left(\vec{X}, \phi(\vec{X}) \right) = \nabla u = \left\{ \underbrace{\frac{\partial u}{\partial X_n}}_{Directe} + \underbrace{\left(\frac{\partial u}{\partial \phi} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial X_n} \right)}_{Indirecte} \right\}_{n \in (1, n_{var})}$$

$$\frac{\partial u}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial X_i} = \langle S^*, \Gamma_n \rangle = \langle S_n, \Gamma^* \rangle \quad n \in (1, n_{var})$$

Méthodes de gradients

- Calcul des gradients: Théorie de Perturbation Généralisées
 - Formule générale:
 - Termes de sources:

$$S_n = \frac{\partial}{\partial X_n} (\mathbf{A} - \lambda \mathbf{F}) \phi \quad n \in (1, n_{var})$$

$$S_j^* = \frac{\partial u}{\partial \phi} \quad j \in (1, n_{cst} + 1)$$

Méthodes de gradients

- Calcul des gradients: Théorie de Perturbation Généralisées

- Formule générale:
- Termes de sources:
- Adjointes généralisés:

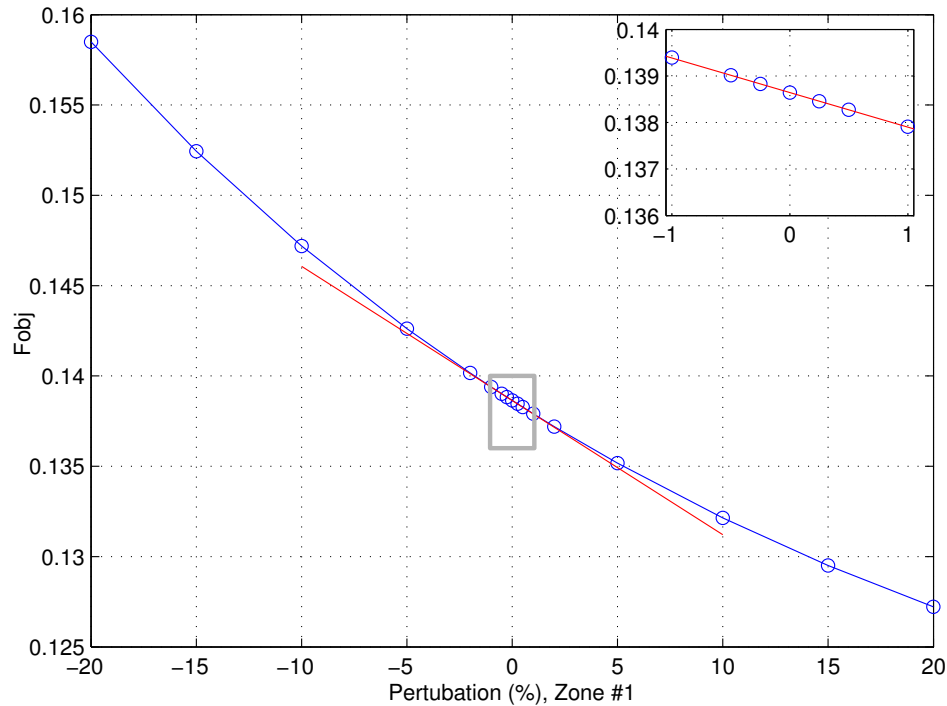
$$(\mathbf{A} - \lambda \mathbf{F}) \Gamma_n = S_n \quad n \in (1, n_{var})$$

$$(\mathbf{A} - \lambda \mathbf{F})^T \Gamma_j^* = S_j^* \quad j \in (1, n_{cst} + 1)$$

- Deux approches:
Explicite
Implicite

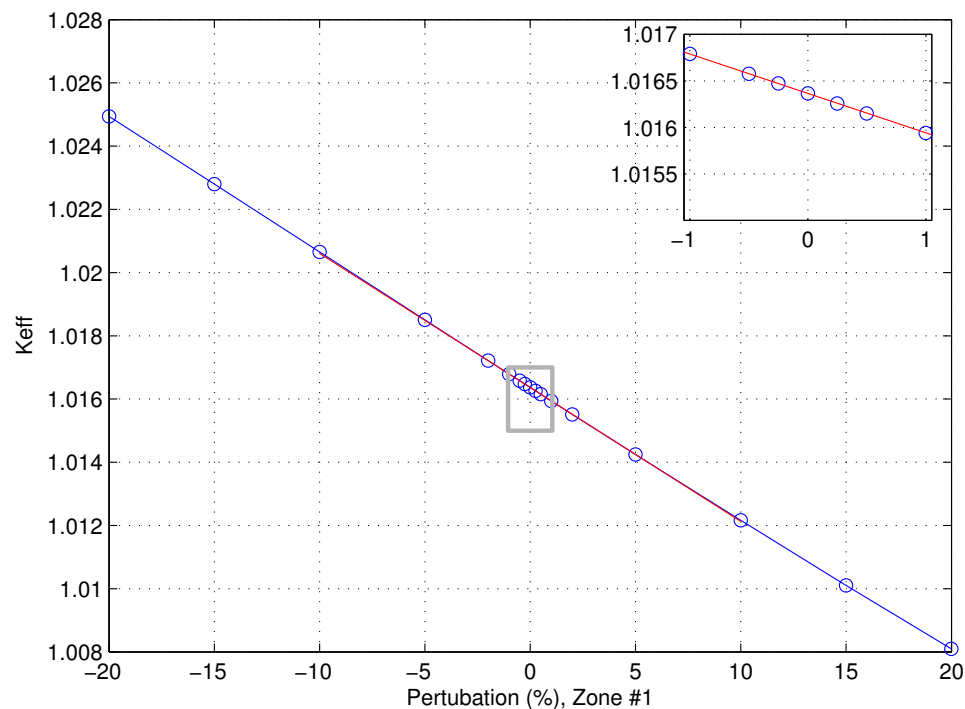
Méthodes de gradients

● Précision des gradients:



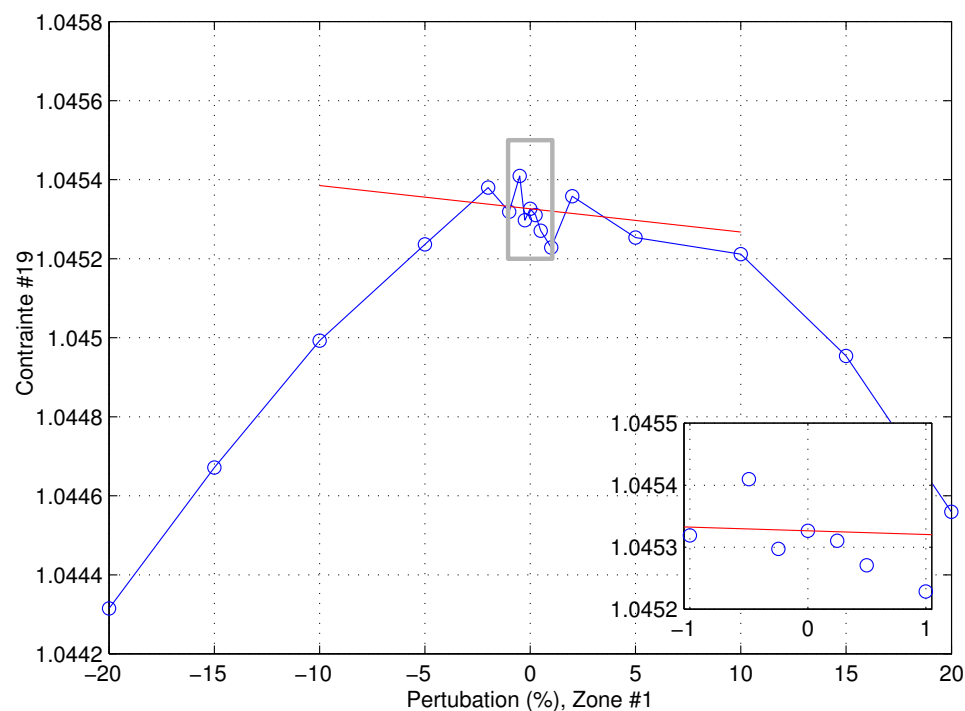
Méthodes de gradients

● Précision des gradients:



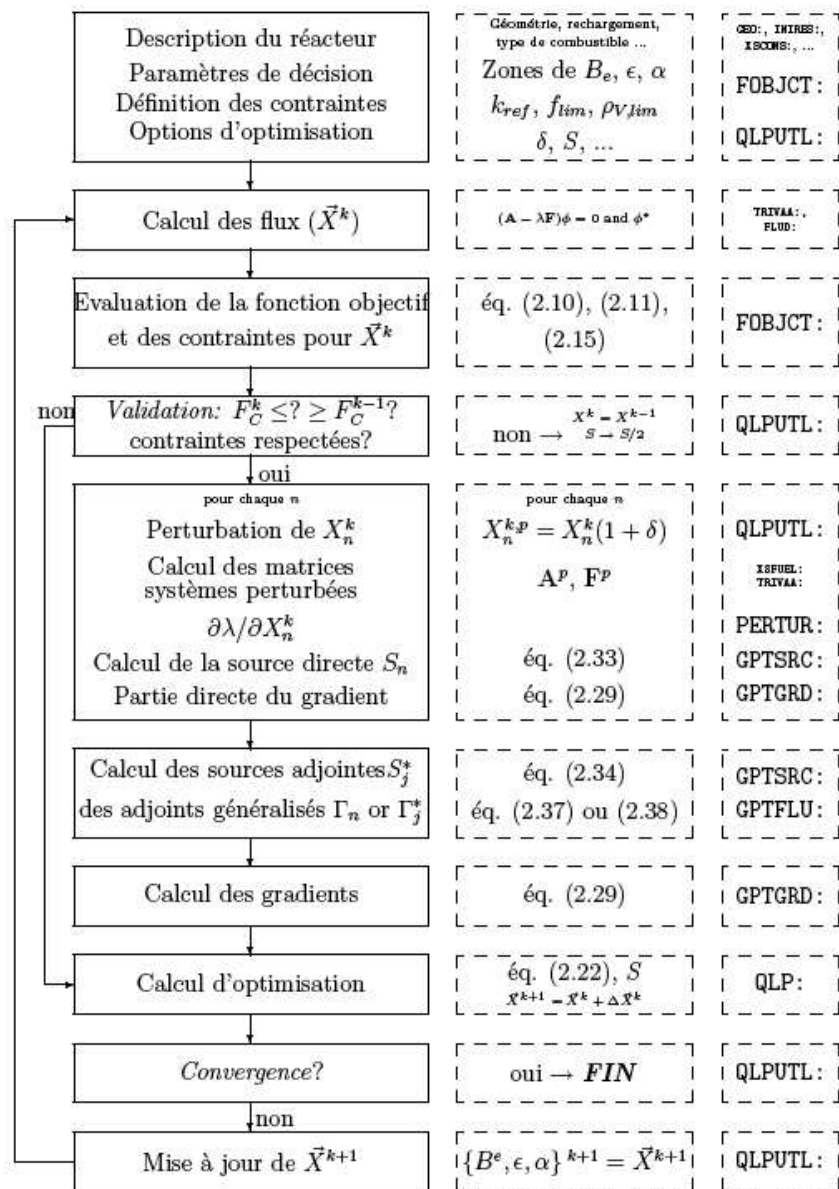
Méthodes de gradients

● Précision des gradients:



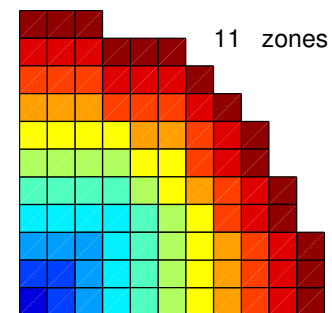
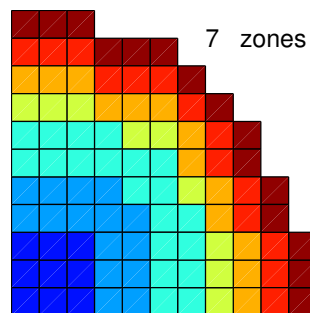
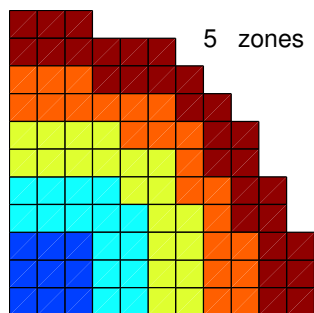
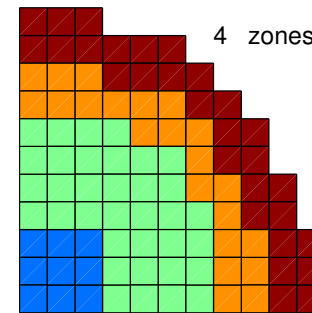
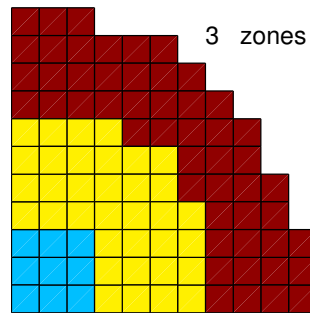
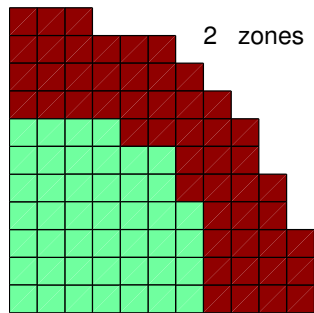
Méthodes de gradients

● Algorithme : PQL



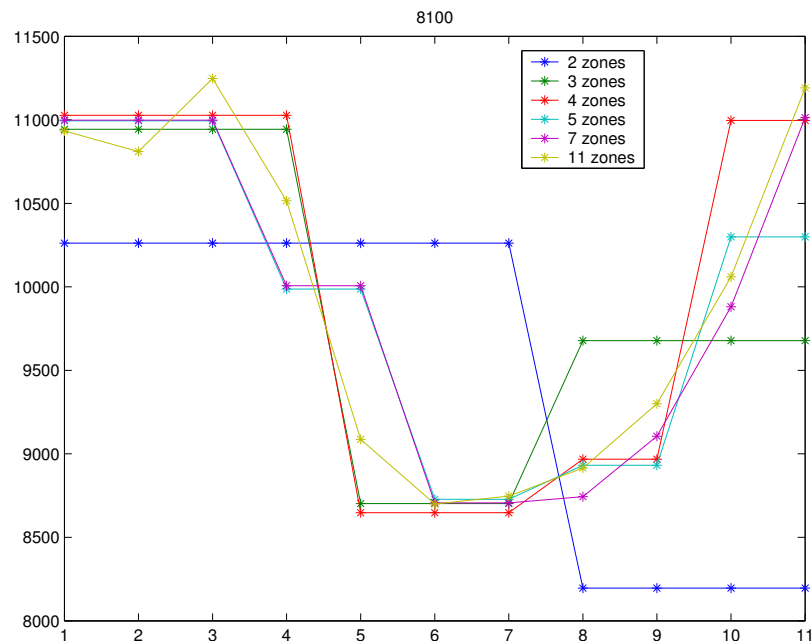
Méthodes de gradients

● Premiers tests:

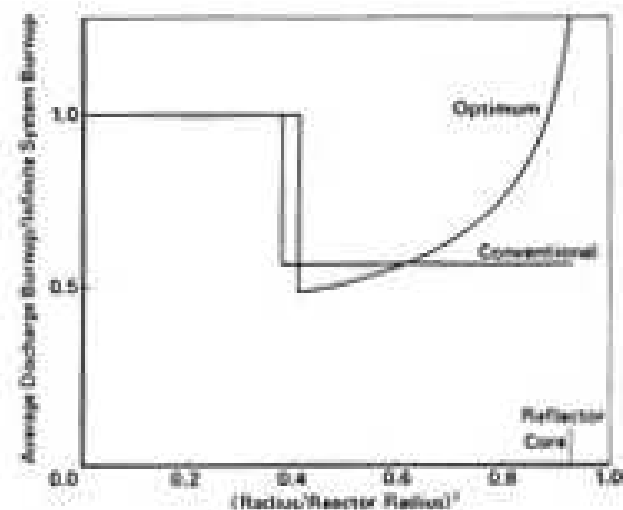


Méthodes de gradients

Premiers tests:



DONJON (CANDU-6)



Wright

Méthodes alternatives de gradients

- Limitations de la méthode PQL: Point initial réalisable

Méthodes alternatives de gradients

- Limitations de la méthode PQL: Point initial réalisable
- Méthode multi-étapes (MS): principe

Méthodes alternatives de gradients

- Limitations de la méthode PQL: Point initial réalisable
- Méthode multi-étapes (MS): principe
 - Satisfaire les contraintes l'une après l'autre
 - Réacteur critique:

$$\min_{\vec{X}} (k_{eff} - k_{ref})^2$$

Méthodes alternatives de gradients

- Limitations de la méthode PQL: Point initial réalisable
- Méthode multi-étapes (MS): principe
 - Satisfaire les contraintes l'une après l'autre
 - Réacteur critique:

$$\min_{\vec{X}} (k_{eff} - k_{ref})^2$$

- Puissance canal maximum:

$$\min_{\vec{X}} (\max_s q_s) \text{ avec } k_{eff} = k_{ref}$$

Méthodes alternatives de gradients

- Limitations de la méthode PQL: Point initial réalisable
- Méthode multi-étapes (MS): principe
 - Satisfaire les contraintes l'une après l'autre
 - Réacteur critique:

$$\min_{\vec{X}} (k_{eff} - k_{ref})^2$$

- Puissance canal maximum:

$$\min_{\vec{X}} (\max_s q_s) \text{ avec } k_{eff} = k_{ref}$$

- Réactivité du vide:

$$\rho_v \leq \rho_v^{lim}$$

Méthodes alternatives de gradients

- Méthodes du lagrangien augmenté (LA) et de pénalisation extérieure (MPE)
 - Principe: Ajouter l'écart des contraintes non respectées à la fonction objectif:

$$\begin{aligned}
 P(\vec{X}, \eta, \gamma) &= f(\vec{X}) + \sum_i \frac{\eta_i}{2} (h_i(\vec{X}) - b_i)^2 \\
 &\quad + \sum_j \frac{\gamma_j}{2} (\max\{0, g_j(\vec{X}) - c_j\})^2
 \end{aligned}$$

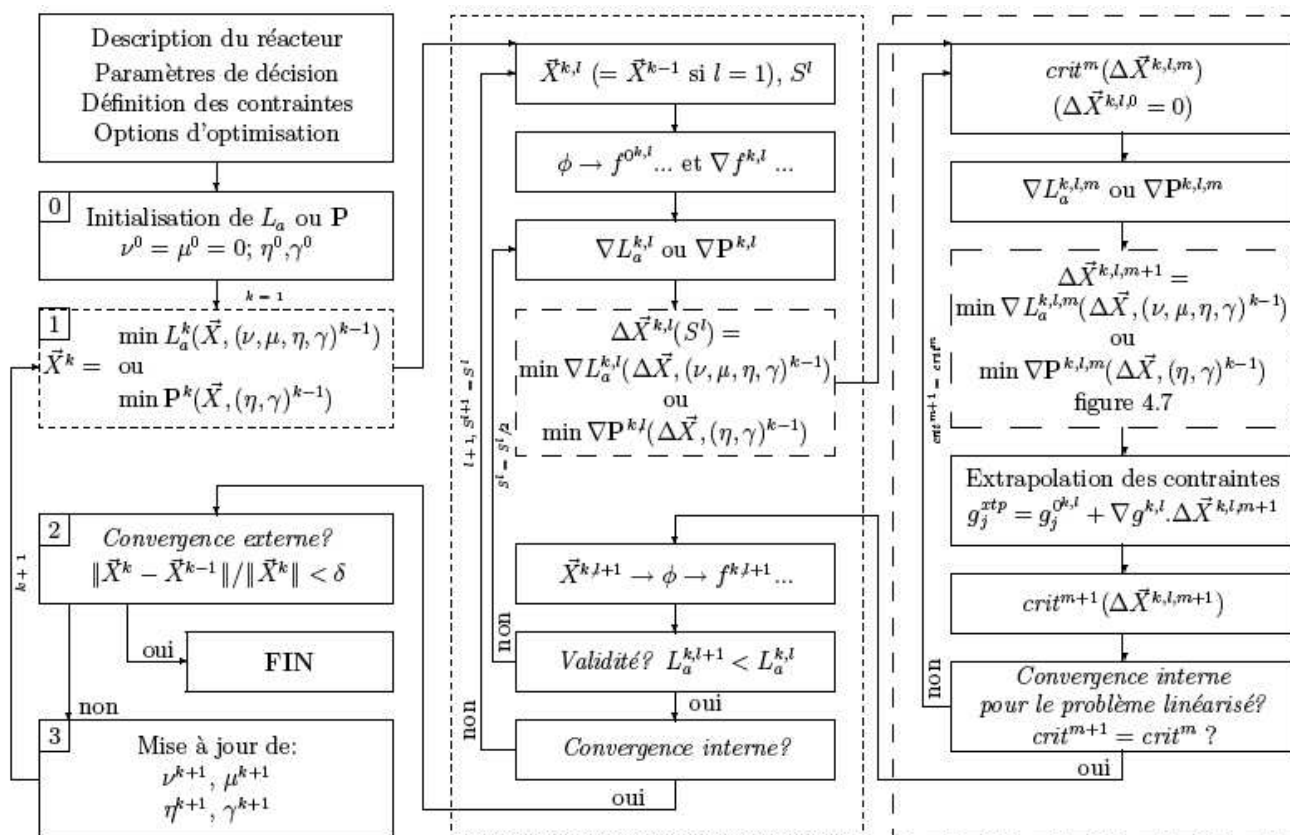
Méthodes alternatives de gradients

- Méthodes du lagrangien augmenté (LA) et de pénalisation extérieure (MPE)
 - Principe: Ajouter l'écart des contraintes non respectées à la fonction objectif:

$$\begin{aligned}
 L_a(\vec{X}, \nu, \mu, \eta, \gamma) = & f(\vec{X}) + \sum_i \nu_i (h_i(\vec{X}) - b_i) \\
 & + \sum_j \mu_j (g_j(\vec{X}) - c_j + \max\{0, -g_j(\vec{X}) + c_j - \frac{\mu_j}{\gamma_j}\}) \\
 & + \sum_i \frac{\eta_i}{2} (h_i(\vec{X}) - b_i)^2 \\
 & + \sum_j \frac{1}{2\gamma_j} (\max^2\{0, \gamma_j(g_j(\vec{X}) - c_j) + \mu_j\} - \mu_j^2)
 \end{aligned}$$

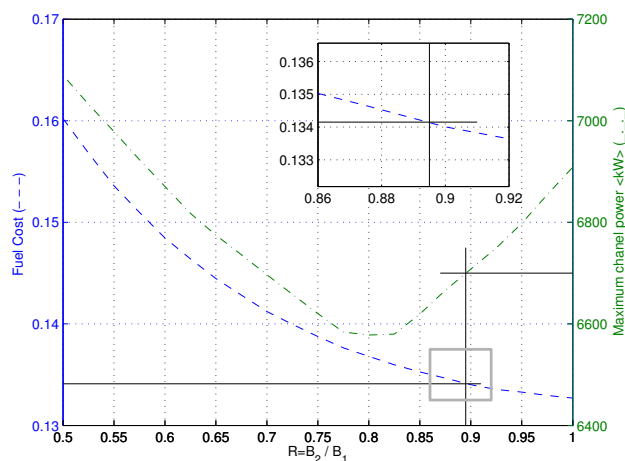
Méthodes alternatives de gradients

- Méthodes du lagrangien augmenté (LA) et de pénalisation extérieure (MPE)
 - Principe: Ajouter l'écart des contraintes non respectées à la fonction objectif:
 - Algorithme:

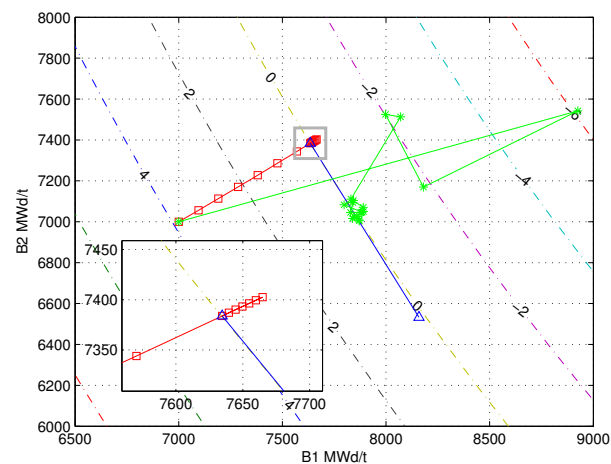


Méthodes alternatives de gradients

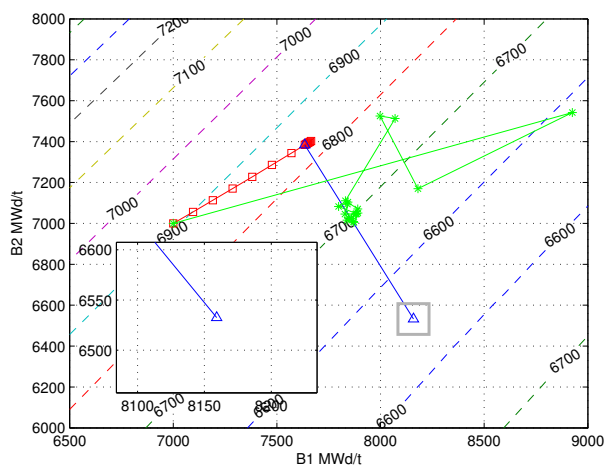
- Vérification de la convergence sur un cas simple:



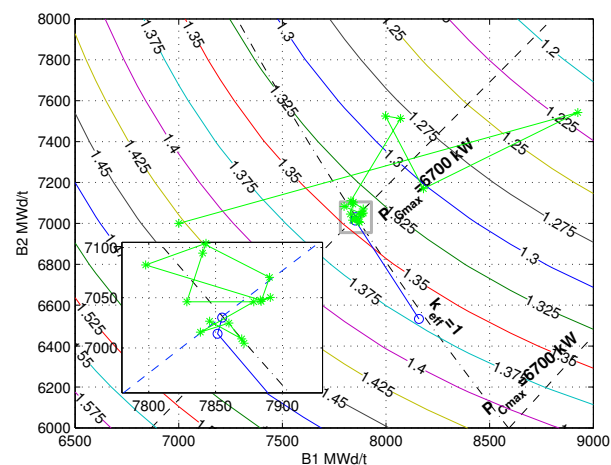
$P_{C,max}$ (kW) pour $k_{eff} = 1$, (a)



k_{eff} (mk), (b)



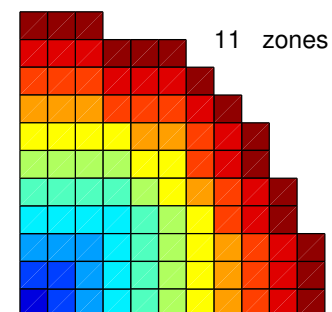
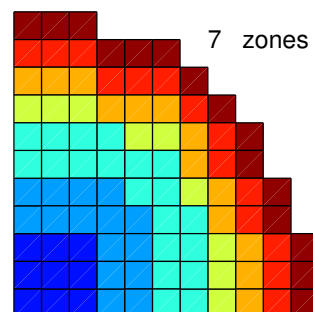
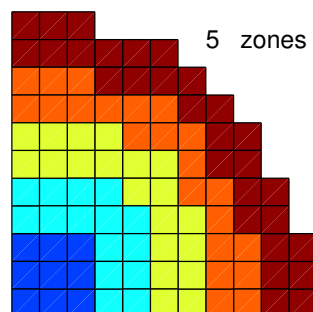
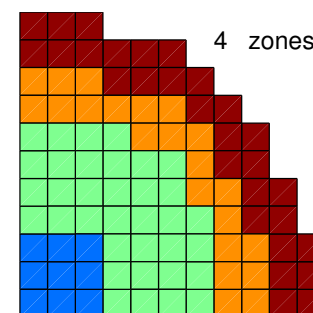
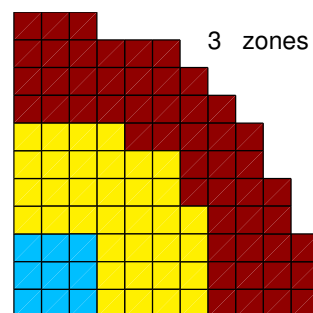
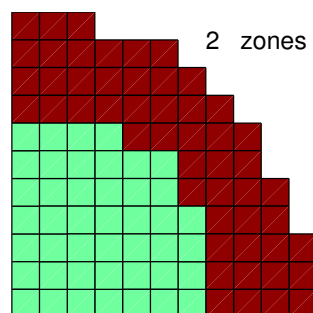
$P_{C,max}$ (kW), (c)



F_C , (d)

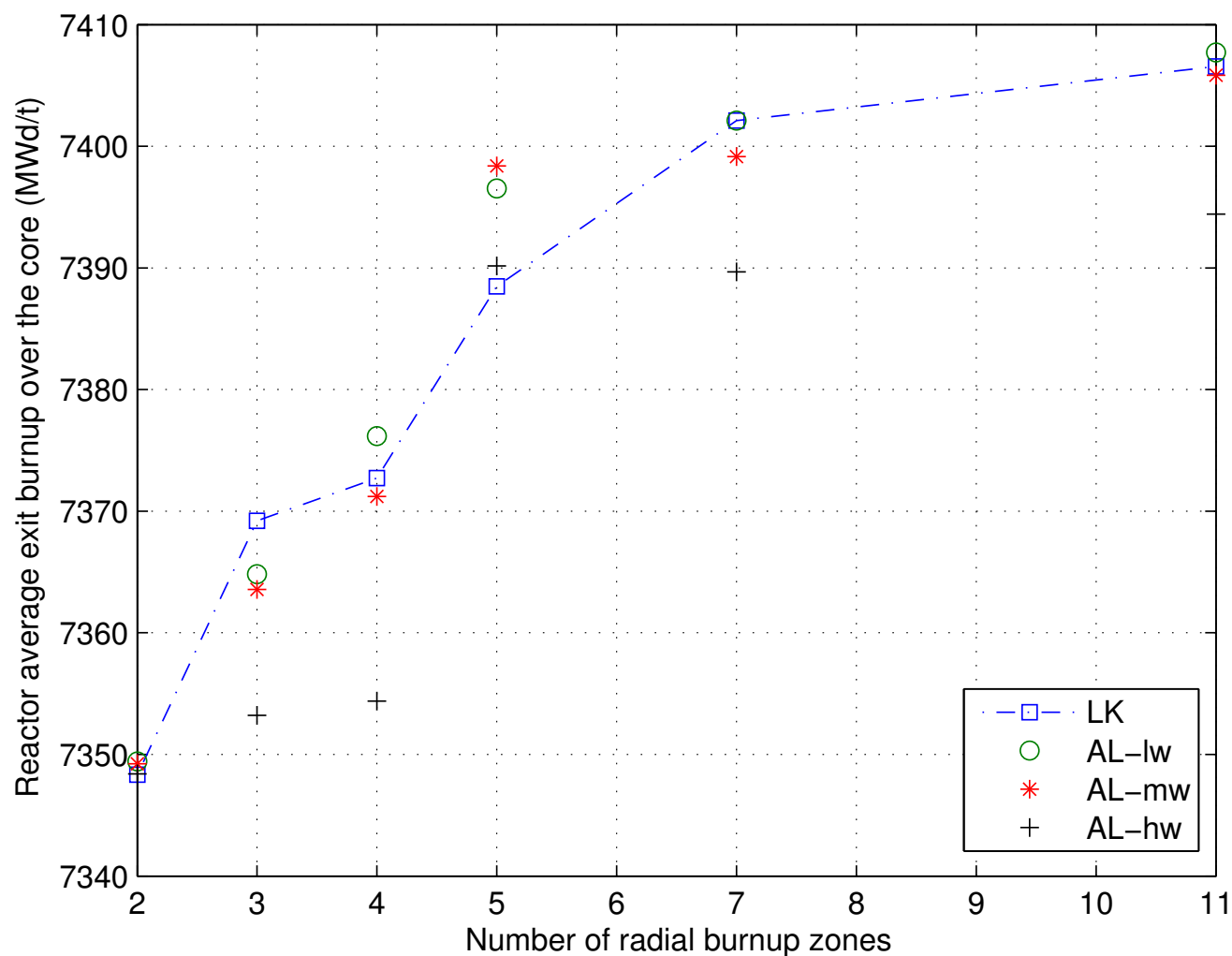
Méthodes alternatives de gradients

● Plusieurs zones:



Méthodes alternatives de gradients

● Plusieurs zones:



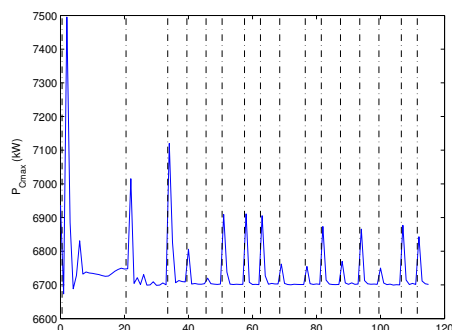
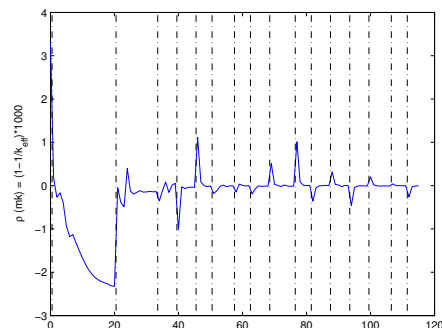
Méthodes alternatives de gradients

- Méthode mixte (MM)
 - Principe: tirer avantage du meilleur de chaque méthode

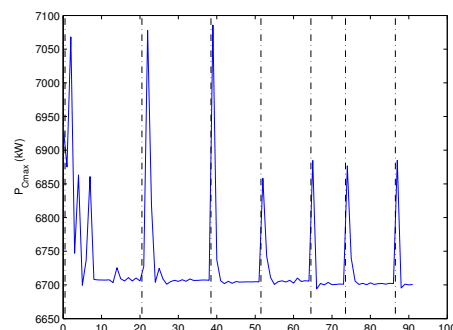
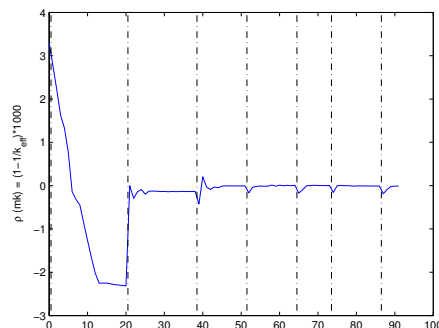
Méthodes alternatives de gradients

- Méthode mixte (MM)
 - Principe: tirer avantage du meilleur de chaque méthode

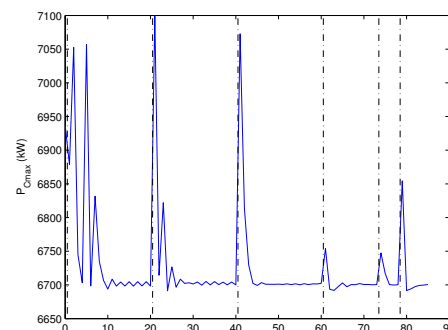
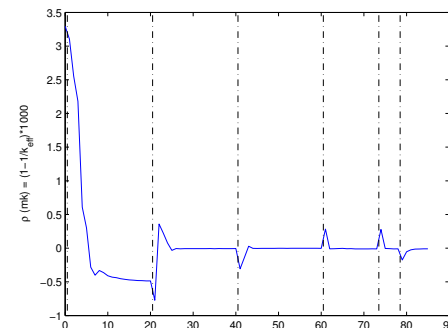
faible poids initial



moyen poids initial



large poids initial

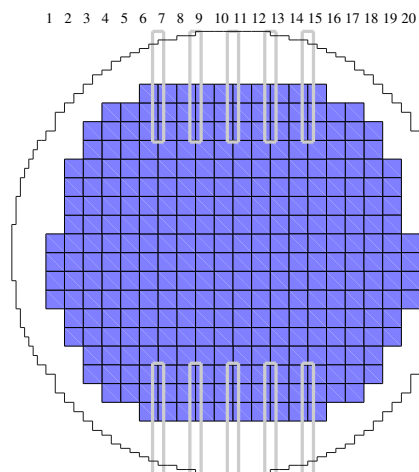
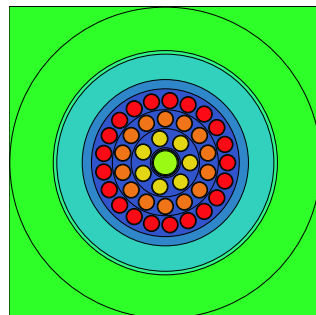


Méthodes alternatives de gradients

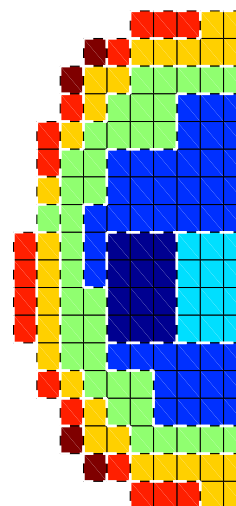
- Méthode mixte (MM)
 - Principe: tirer avantage du meilleur de chaque méthode
 - Algorithme:
 - LA avec grand poids des contraintes pour trouver un point réalisable
 - PQL pour minimiser F_C

Méthodes alternatives de gradients

- Optimisation du burnup dans le ACR-700:



A
B
C
D
E
F
G
H
J
K
L
M
N
O
P
Q
R
S



5	5	6	6	6															
5	5	5	5	5	6	7													
4	4	4	4	4	5	5	7												
2	2	2	4	4	4	5	6												
2	2	2	4	4	4	4	5	6											
2	2	2	2	2	2	4	6												
2	2	2	2	2	2	4	5												
2	2	2	2	2	2	4	4												
3	3	3	1	1	1	2	4	5	6										
3	3	3	1	1	1	2	4	5	6										
3	3	3	1	1	1	4	4	5	6										
3	3	3	1	1	1	4	4	5	6										
2	2	2	2	2	2	4	4	5											
2	2	2	2	4	4	4	5	6											
2	2	2	2	4	4	5	6												
4	4	4	4	4	5	5	7												
5	5	5	5	5	6	7													
5	5	6	6	6															

Méthodes alternatives de gradients

- Optimisation du burnup dans le ACR-700:

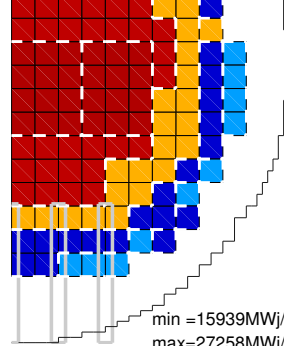
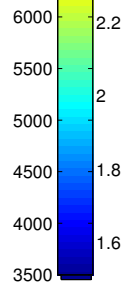
n_z	P.I.	<i>meth</i>	F_C	B_{min}	B_{max}
7	AECL	MS	4.4756	15938	27258
7	flat	MS	4.4751	15805	27336
7	AECL	MM	4.4756	15939	27258
7	flat	MM	4.4754	15779	27330
150	AECL	MS	4.3357	16926	27565
150	flat	MS	NA	NA	NA
150	AECL	MM	4.3400	16708	27564
150	flat	MM	4.3058	19466	27769

N



C

min = 4856.2kW
max = 7300.7kW

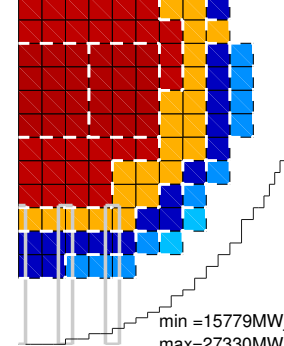
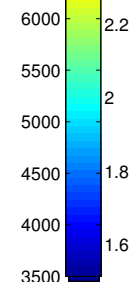


min = 15939MWj/t
max = 27258MWj/t

ti

IS

min = 4790.2kW
max = 7301.2kW



min = 15779MWj/t
max = 27330MWj/t

Méthodes alternatives de gradients

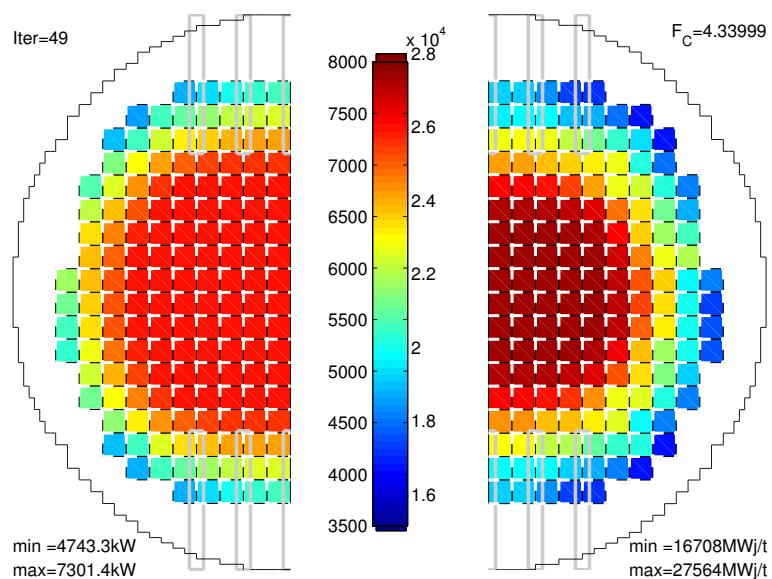
- Optimisation du burnup dans le ACR-700:

n_z	P.I.	<i>meth</i>	F_C	B_{min}	B_{max}
7	AECL	MS	4.4756	15938	27258
7	flat	MS	4.4751	15805	27336
7	AECL	MM	4.4756	15939	27258
7	flat	MM	4.4754	15779	27330
150	AECL	MS	4.3357	16926	27565
150	flat	MS	NA	NA	NA
150	AECL	MM	4.3400	16708	27564
150	flat	MM	4.3058	19466	27769

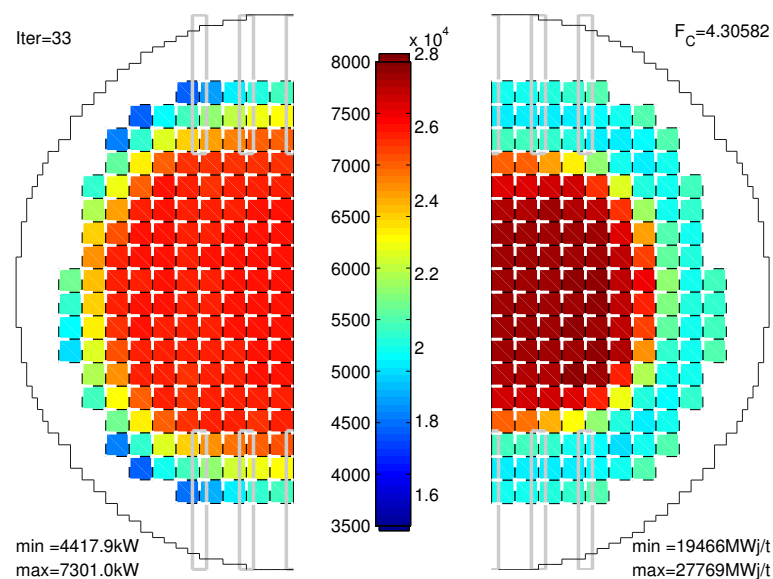
Méthodes alternatives de gradients

- Optimisation du burnup dans le ACR-700:

(a) 'AECL'



(b) 'flat'



Méthodes alternatives de gradients

● Optimisation du burnup dans le ACR-700:

n_z	I.P.	meth	It_e	ϕ	Grad
7	AECL	MS		103=7+6+90	82=3+4+75
7	flat	MS		101=11+65+25	82=7+56+19
150	AECL	MS		83=13+10+60	65=7+8+50
150	flat	MS		NA=18+201($^{\alpha}$)+NA	NA=13+176+NA
7	AECL	MM	5=4+1	105=33+72	60=21+39
7	flat	MM	6=5+1	79=50+29	64=40+24
150	AECL	MM	2=1+1	61=11+50	52=8+44
150	flat	MM	10=9+1	118=84+34	91=62+29

Enrichissement du combustible

- XS en fonction de l'enrichissement
 - A 1 dimension: B

Table:

$$\Sigma(B_i) \text{ et } \frac{\partial \Sigma}{\partial B}(B_i)$$

Interpolation d'Hermite:

$$f(x) = f(x_i)H_1(u) + f'(x_i)H_2(u) * \Delta x + \\ f(x_{i+1})H_3(u) + f'(x_{i+1})H_4(u) * \Delta x$$

Enrichissement du combustible

- XS en fonction de l'enrichissement
 - Création de tables à 2 dimensions: B et ε Module *XSCONS*:
 $\Sigma(B_i, \varepsilon_j)$, $\frac{\partial \Sigma}{\partial B}(B_i, \varepsilon_j)$, $\frac{\partial \Sigma}{\partial \varepsilon}(B_i, \varepsilon_j)$ et $\frac{\partial^2 \Sigma}{\partial B \partial \varepsilon}(B_i, \varepsilon_j)$

Enrichissement du combustible

- XS en fonction de l'enrichissement
 - Création de tables à 2 dimensions: B et ε Module *XSCONS*:
 - Interpolation d'Hermite de degré 3: Module *XSFUEL*:

$$\begin{aligned}
 f(x, y) = & H_1(u)H_1(v)f(x_i, y_j) + H_2(u)H_1(v) * \Delta x \frac{\partial f}{\partial x}(x_i, y_j) \\
 & + H_1(u)H_2(v) * \Delta y \frac{\partial f}{\partial y}(x_i, y_j) + H_2(u)H_2(v) * \Delta x * \Delta y \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}(x_i, y_j) \\
 & + H_3(u)H_1(v)f(x_{i+1}, y_j) + H_4(u)H_1(v) * \Delta x \frac{\partial f}{\partial x}(x_{i+1}, y_j) \\
 & + H_3(u)H_2(v) * \Delta y \frac{\partial f}{\partial y}(x_{i+1}, y_j) + H_4(u)H_2(v) * \Delta x * \Delta y \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}(x_{i+1}, y_j) \\
 & + H_1(u)H_3(v)f(x_i, y_{j+1}) + H_2(u)H_3(v) * \Delta x \frac{\partial f}{\partial x}(x_i, y_{j+1}) \\
 & + H_1(u)H_4(v) * \Delta y \frac{\partial f}{\partial y}(x_i, y_{j+1}) + H_2(u)H_4(v) * \Delta x * \Delta y \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}(x_i, y_{j+1}) \\
 & + H_3(u)H_3(v)f(x_{i+1}, y_{j+1}) + H_4(u)H_3(v) * \Delta x \frac{\partial f}{\partial x}(x_{i+1}, y_{j+1}) \\
 & + H_3(u)H_4(v) * \Delta y \frac{\partial f}{\partial y}(x_{i+1}, y_{j+1}) \\
 & + H_4(u)H_4(v) * \Delta x * \Delta y \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}(x_{i+1}, y_{j+1})
 \end{aligned}$$

Enrichissement du combustible

- XS en fonction de l'enrichissement
 - Création de tables à 2 dimensions: B et ε Module *XSCONS*:
 - Interpolation d'Hermite de degré 3: Module *XSFUEL*:
 - Permet de calculer: $\Sigma(B, \varepsilon)$, $\bar{\Sigma}(B_e, \varepsilon)$, $\frac{\partial \bar{\Sigma}}{\partial B_e}(B_e, \varepsilon)$ et $\frac{\partial \bar{\Sigma}}{\partial \varepsilon}(B_e, \varepsilon)$

Enrichissement du combustible

- Choix du poids relatif des variables: délicat

Enrichissement du combustible

- Choix du poids relatif des variables: délicat
- Résultat ACR-700

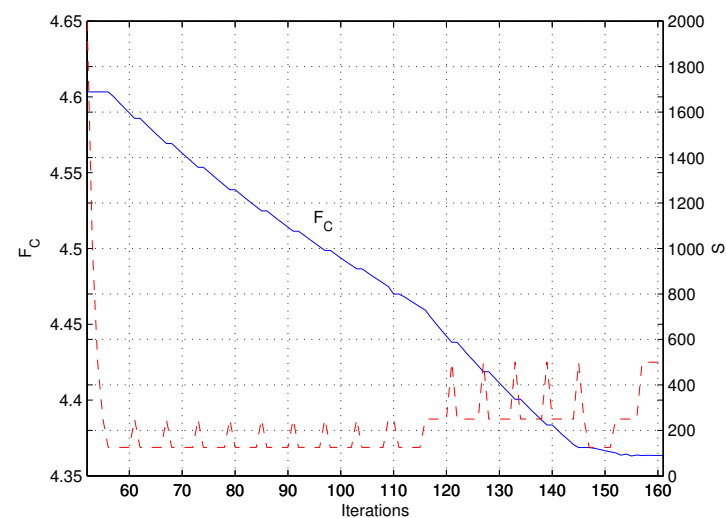
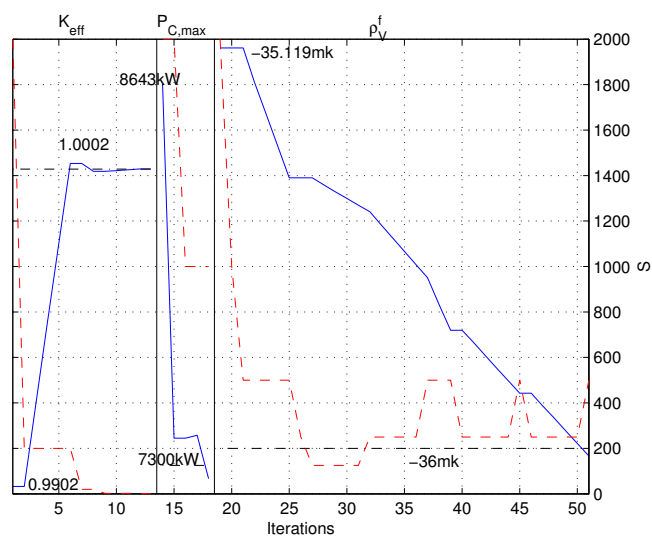
MS										
ε_{ini}	B_{ini}	F_C	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	ε_f
1.6	AECL	4.2145	39.64	39.77	39.90	36.75	29.92	32.07	24.48	3.446
1.6	flat	4.2163	39.36	39.45	39.57	36.44	29.53	31.55	25.64	3.424
3.4	AECL	4.2348	38.45	38.58	38.70	35.57	28.82	30.77	23.15	3.363
3.4	flat	4.2149	39.41	39.49	39.60	36.47	29.55	31.58	25.77	3.426
MM										
ε_{ini}	B_{ini}	F_C	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	ε_f
1.6	AECL	4.2237	39.10	39.23	39.36	36.21	29.42	31.48	23.89	3.409
1.6	flat	4.2810	35.87	35.85	35.95	32.89	26.02	27.59	23.48	3.173
3.4	AECL	4.2260	38.97	39.11	39.23	36.09	29.31	31.34	23.68	3.400
3.4	flat	4.2225	38.94	39.02	39.13	36.01	29.11	31.07	25.46	3.393

Enrichissement du combustible

- Choix du poids relatif des variables: délicat
- Résultat ACR-700
- Contrainte sur la réactivité du vide

Enrichissement du combustible

- Choix du poids relatif des variables: délicat
- Résultat ACR-700
- Contrainte sur la réactivité du vide



Enrichissement du combustible

- Choix du poids relatif des variables: délicat
- Résultat ACR-700
- Contrainte sur la réactivité du vide

Résultats avec le lagrangien augmenté:

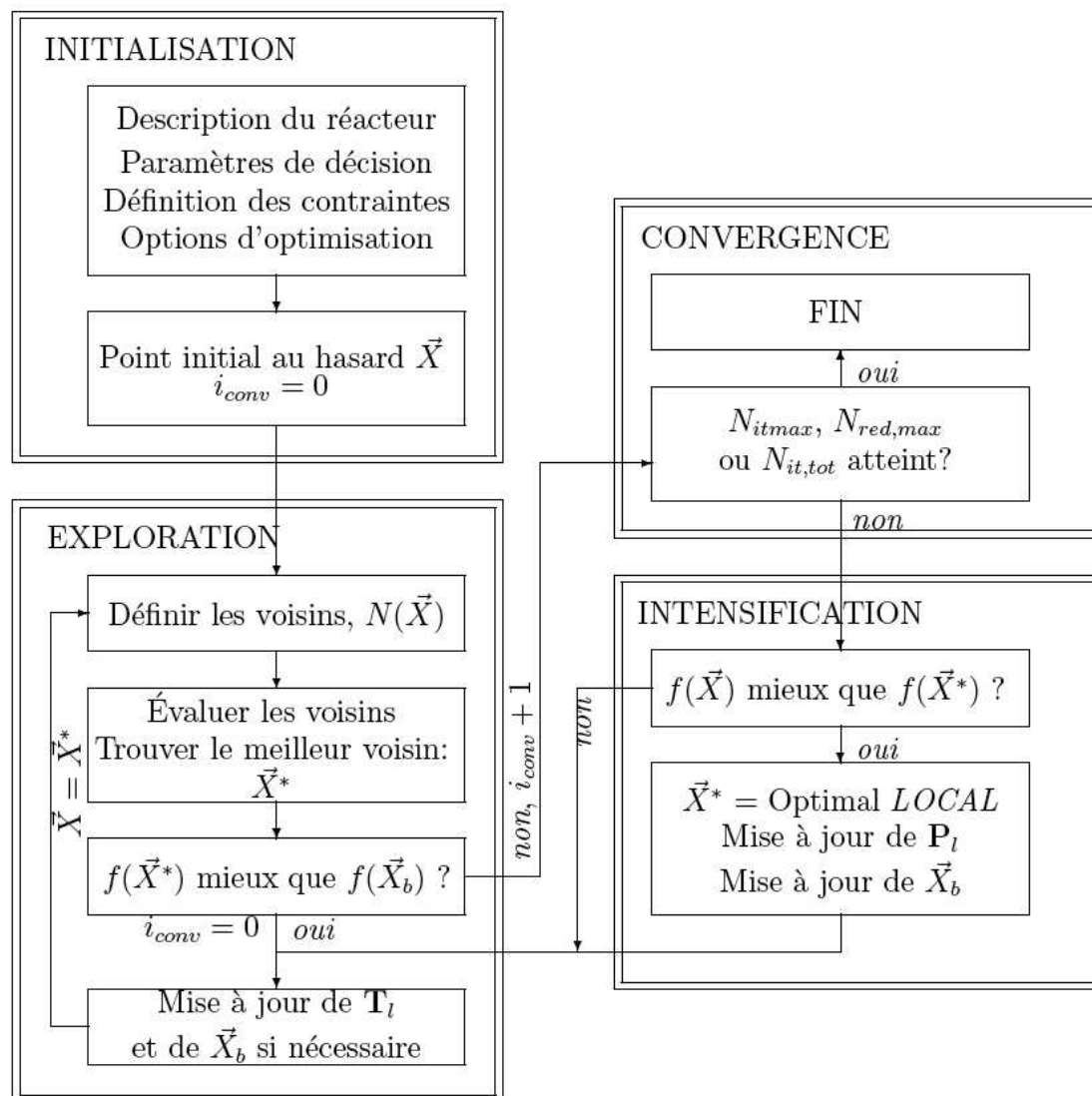
γ_ρ	γ_q	η_k	k_{eff}	$P_{C,max} kW$	$\rho_V^f (mk)$	It_e	ϕ
20000	1000	50000	0.9999989	7271	-35.176	4	32
200000	1000	50000	0.9999641	7557	-35.995	49	471
200000	2500	50000	0.9998692	7442	-35.912	33	317
			1.0000000	≤ 7300	≤ -36.00		

Recherche tabou

- Méthodes méta-heuristiques pour la gestion du combustible:
Recherche aléatoire biaisée par les résultats précédents
 - Algorithmes Génétiques
 - Recuit Simulé
 - Recherche TabouAppliquées au rechargement des REP
- Contraintes ajoutées à la fonction objectif

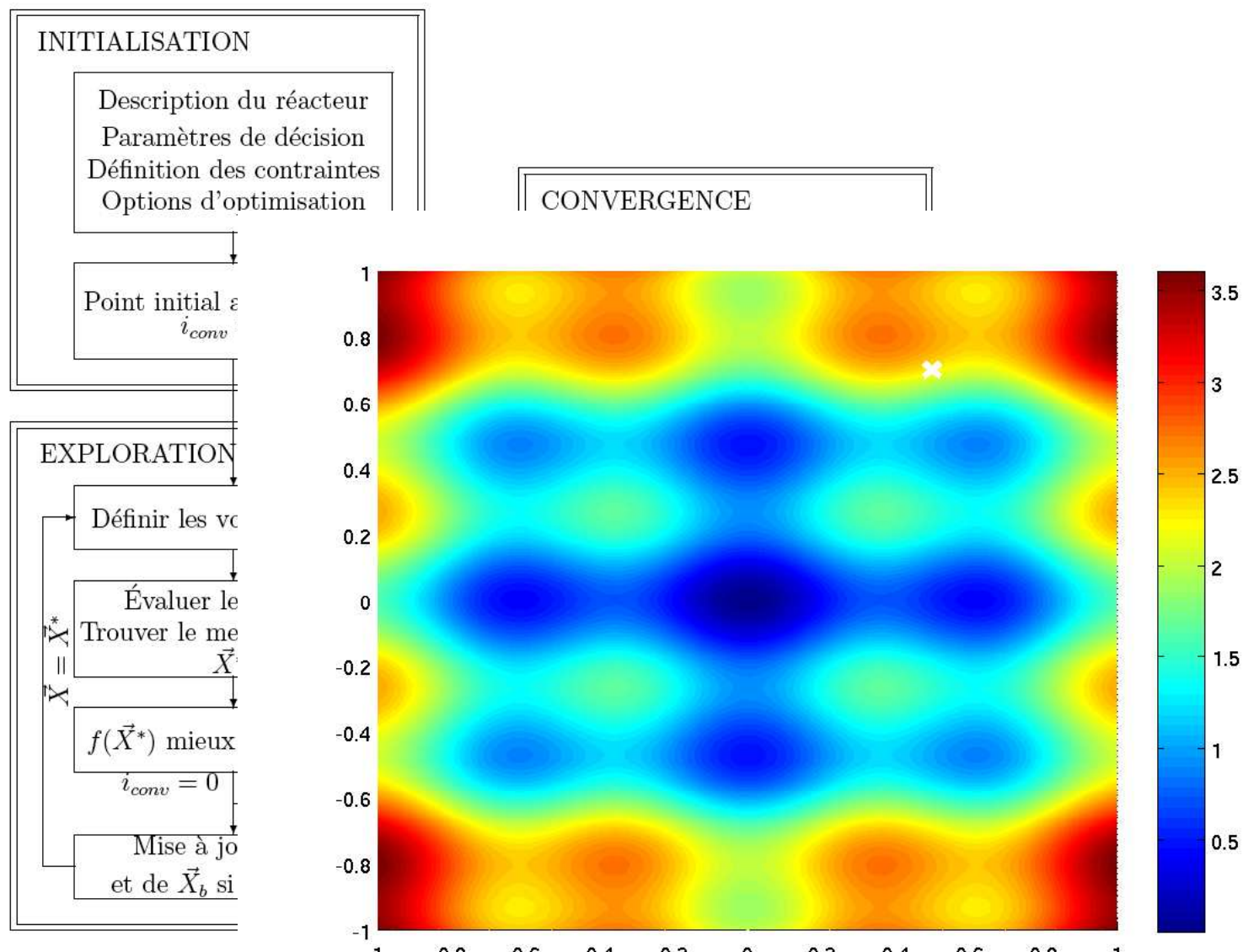
Recherche tabou

- Recherche Tabou: Principe général et amélioration:



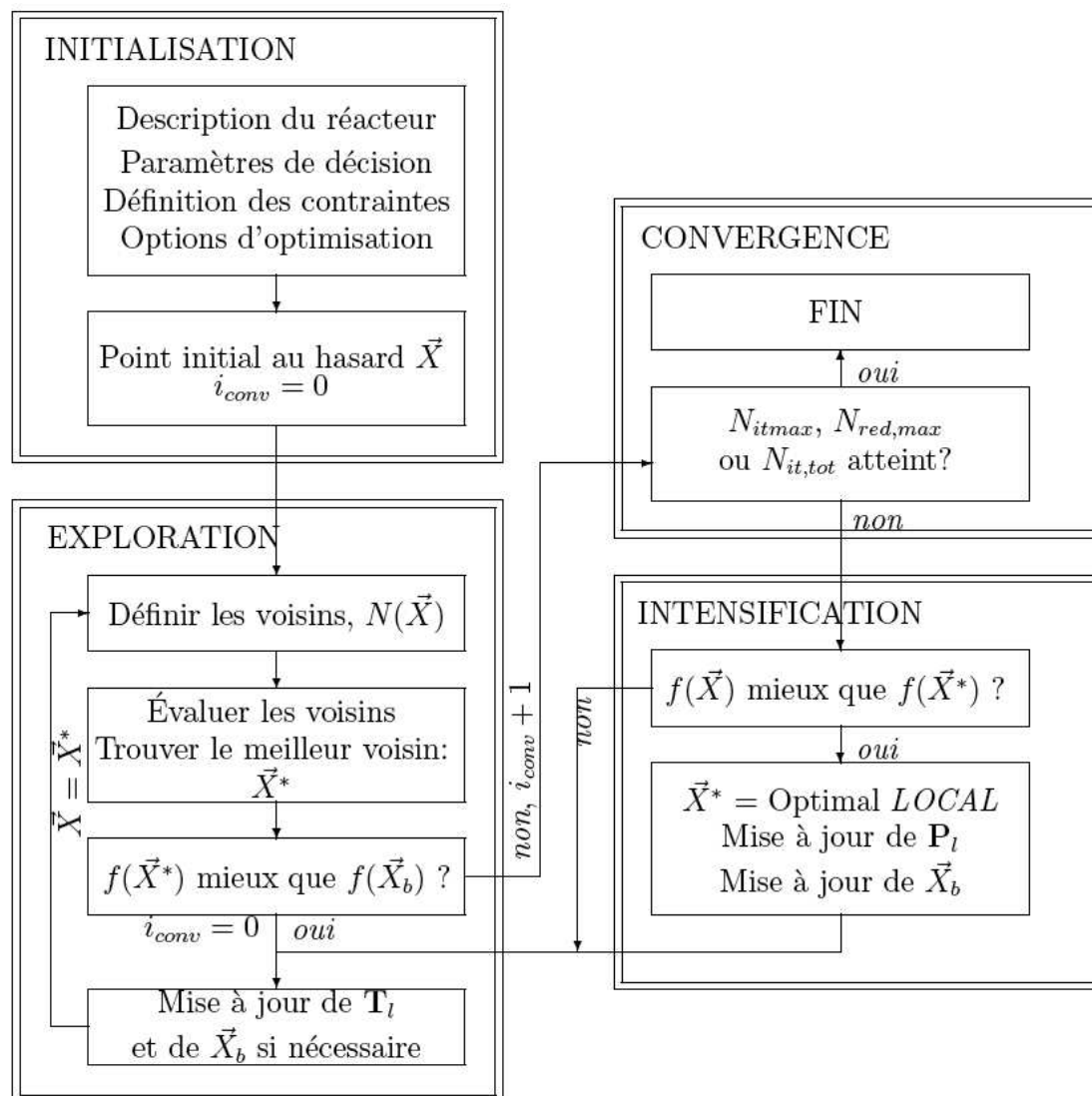
Recherche tabou

- Recherche Tabou: Principe général et amélioration:



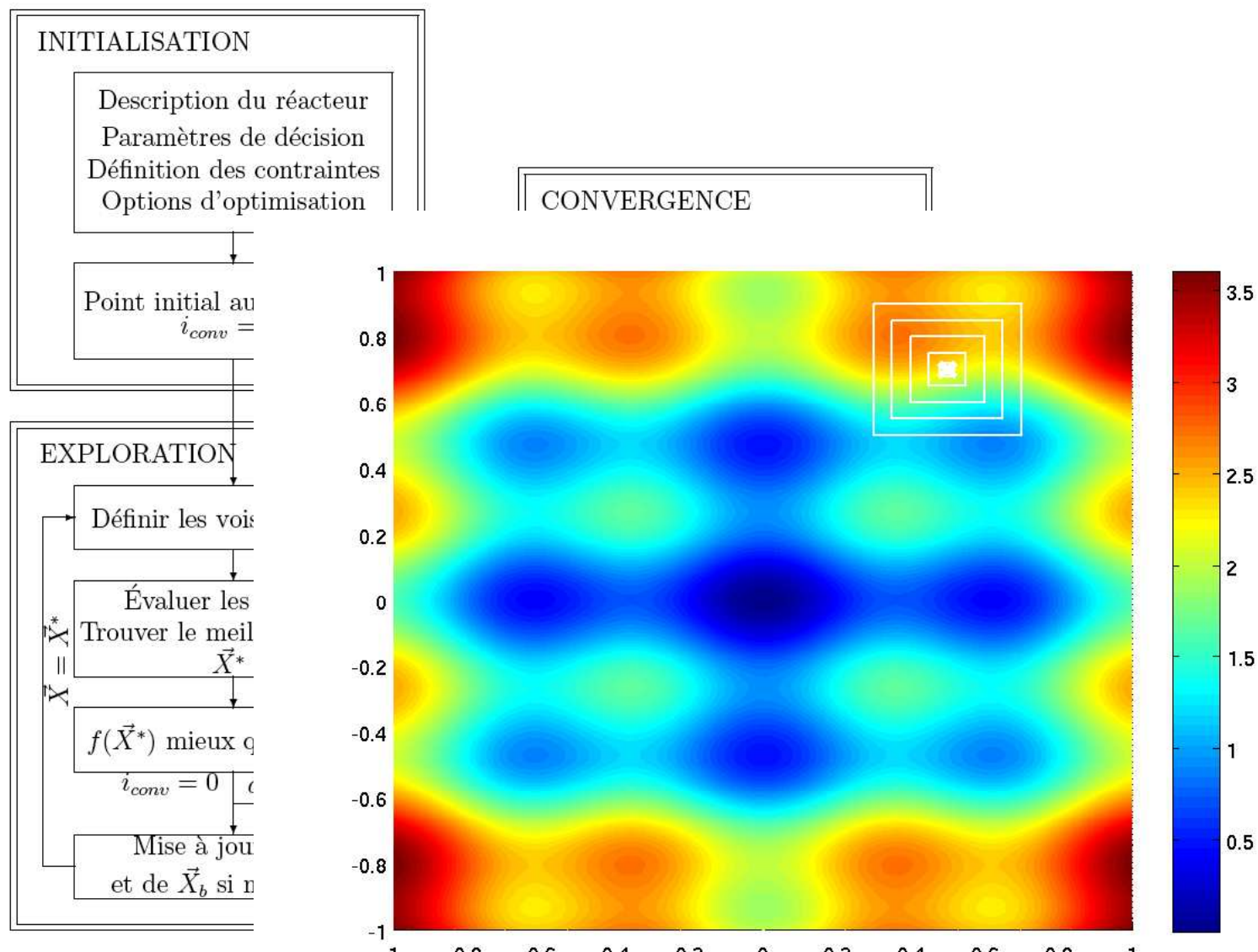
Recherche tabou

- Recherche Tabou: Principe général et amélioration:



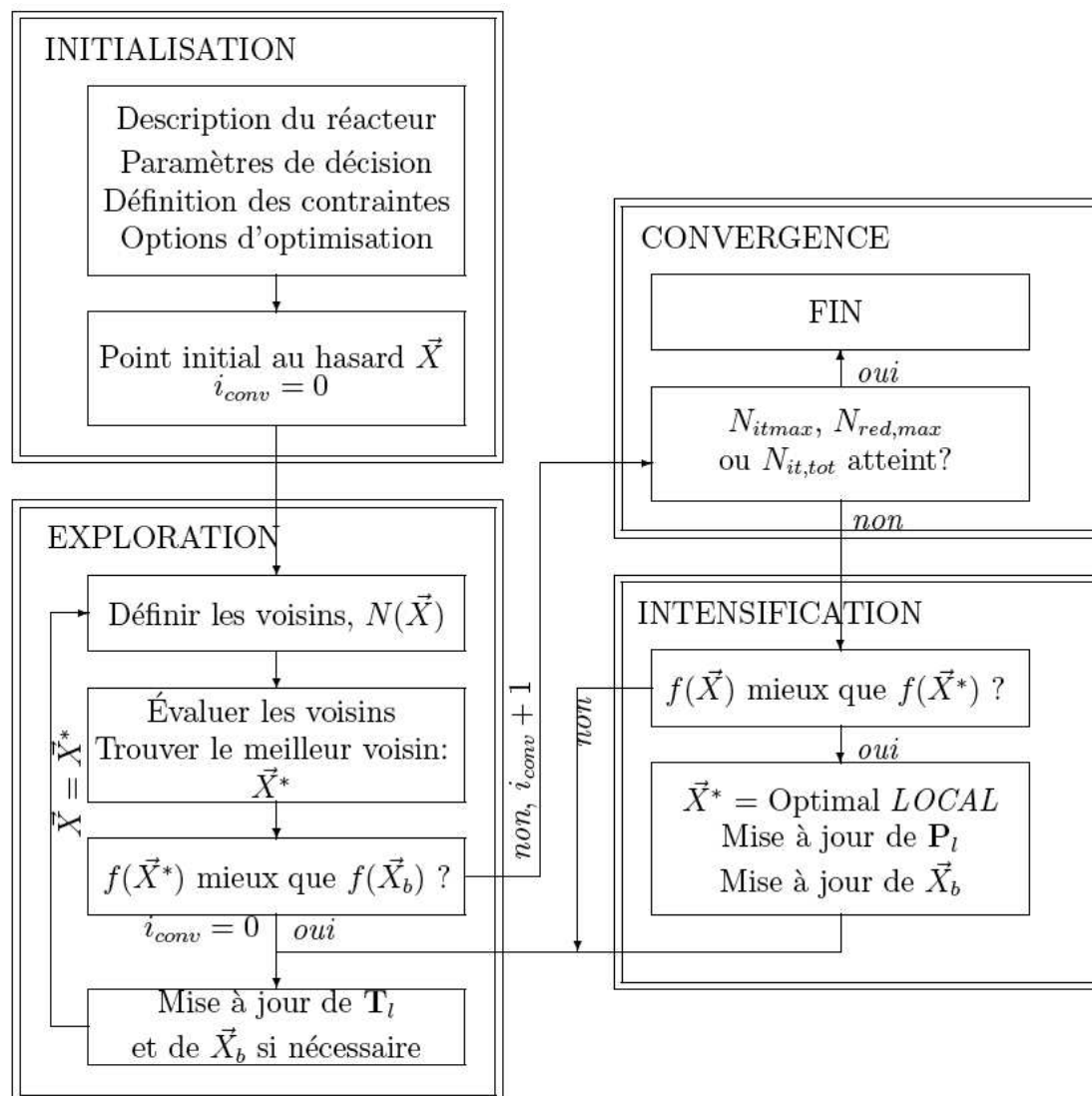
Recherche tabou

- Recherche Tabou: Principe général et amélioration:



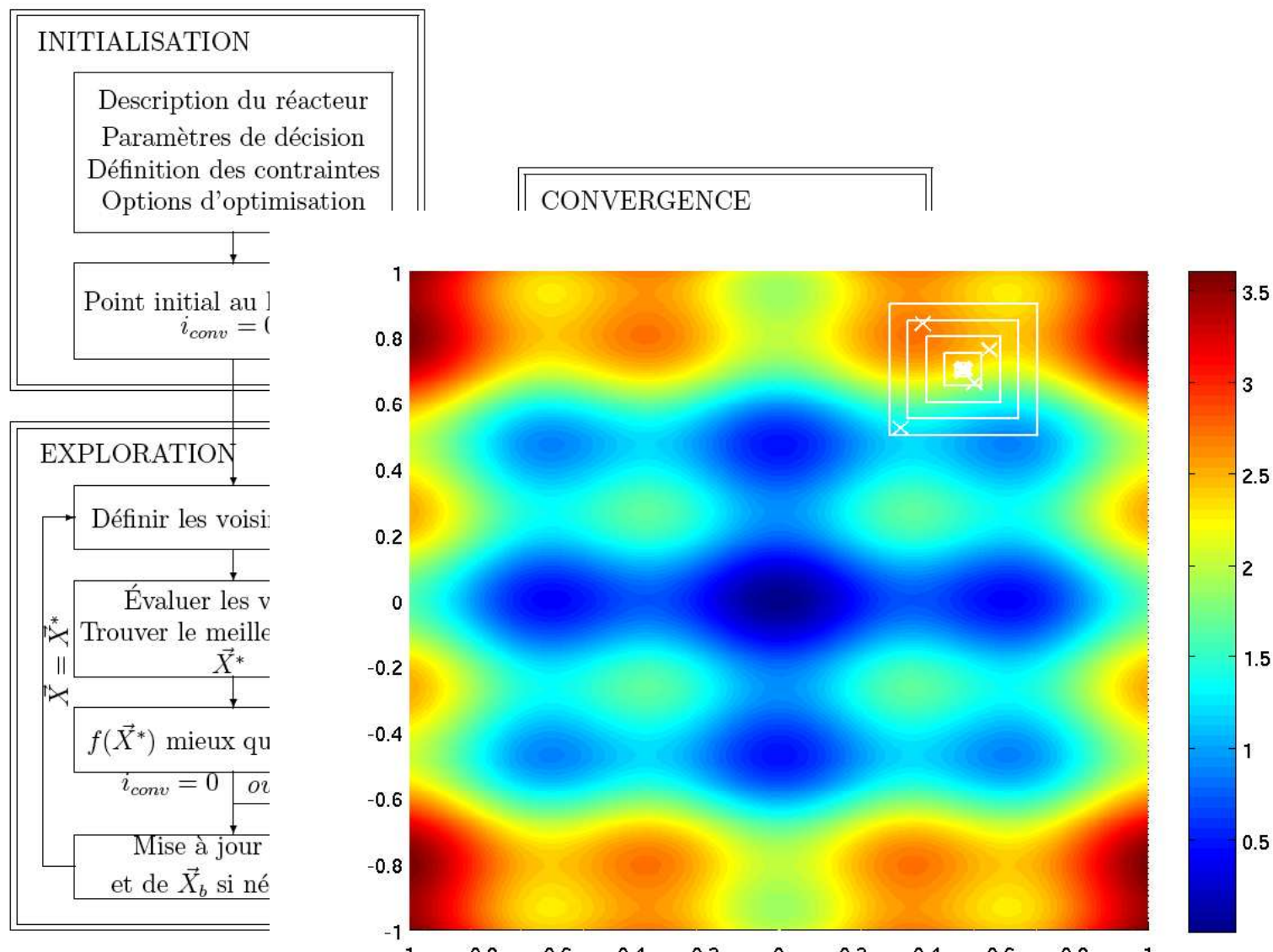
Recherche tabou

- Recherche Tabou: Principe général et amélioration:



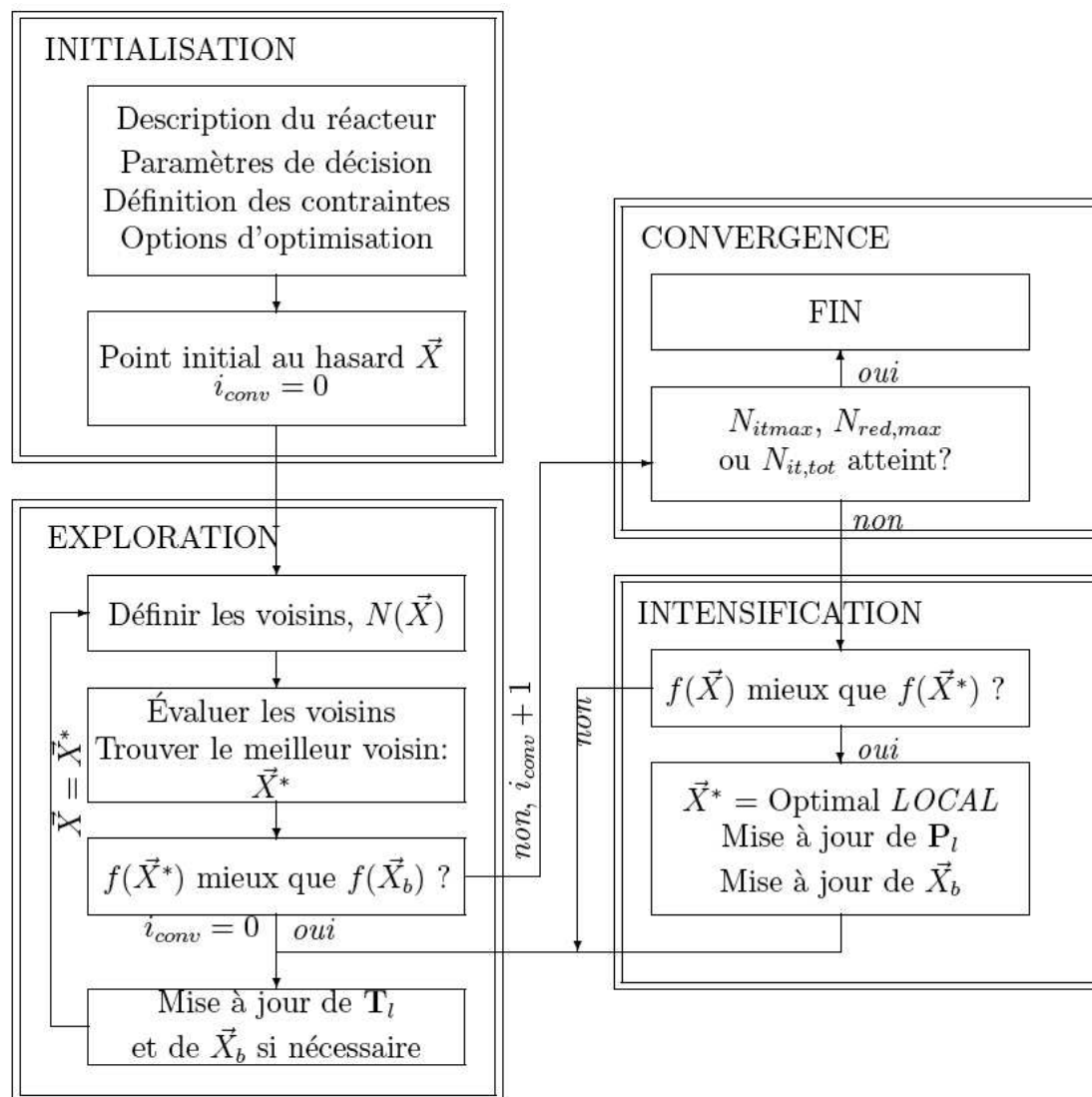
Recherche tabou

- Recherche Tabou: Principe général et amélioration:



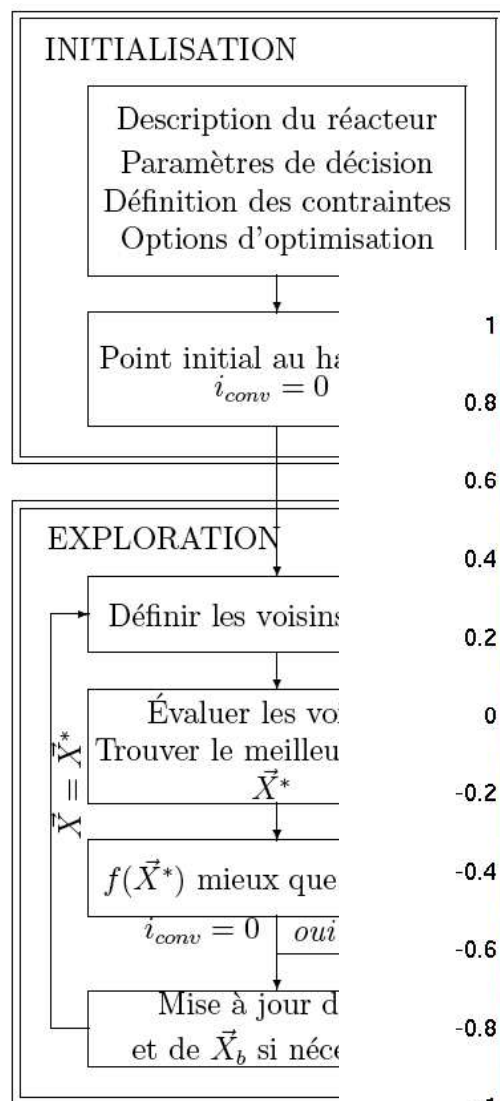
Recherche tabou

- Recherche Tabou: Principe général et amélioration:

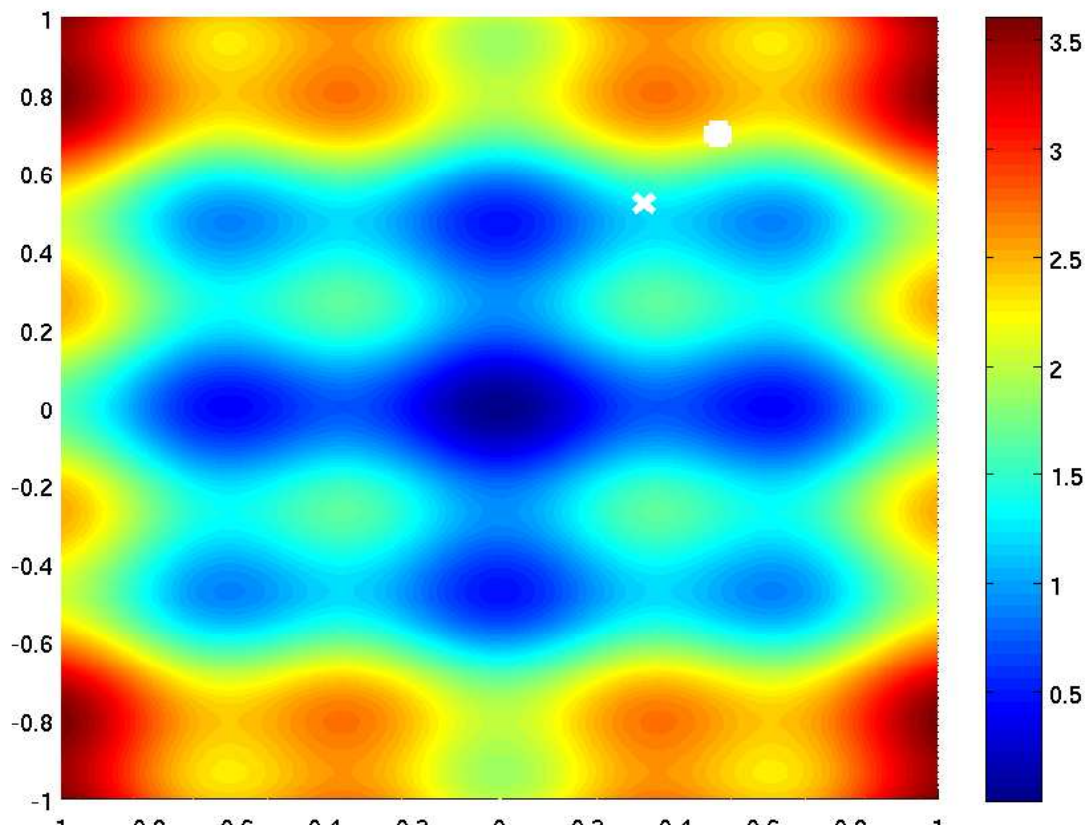


Recherche tabou

- Recherche Tabou: Principe général et amélioration:

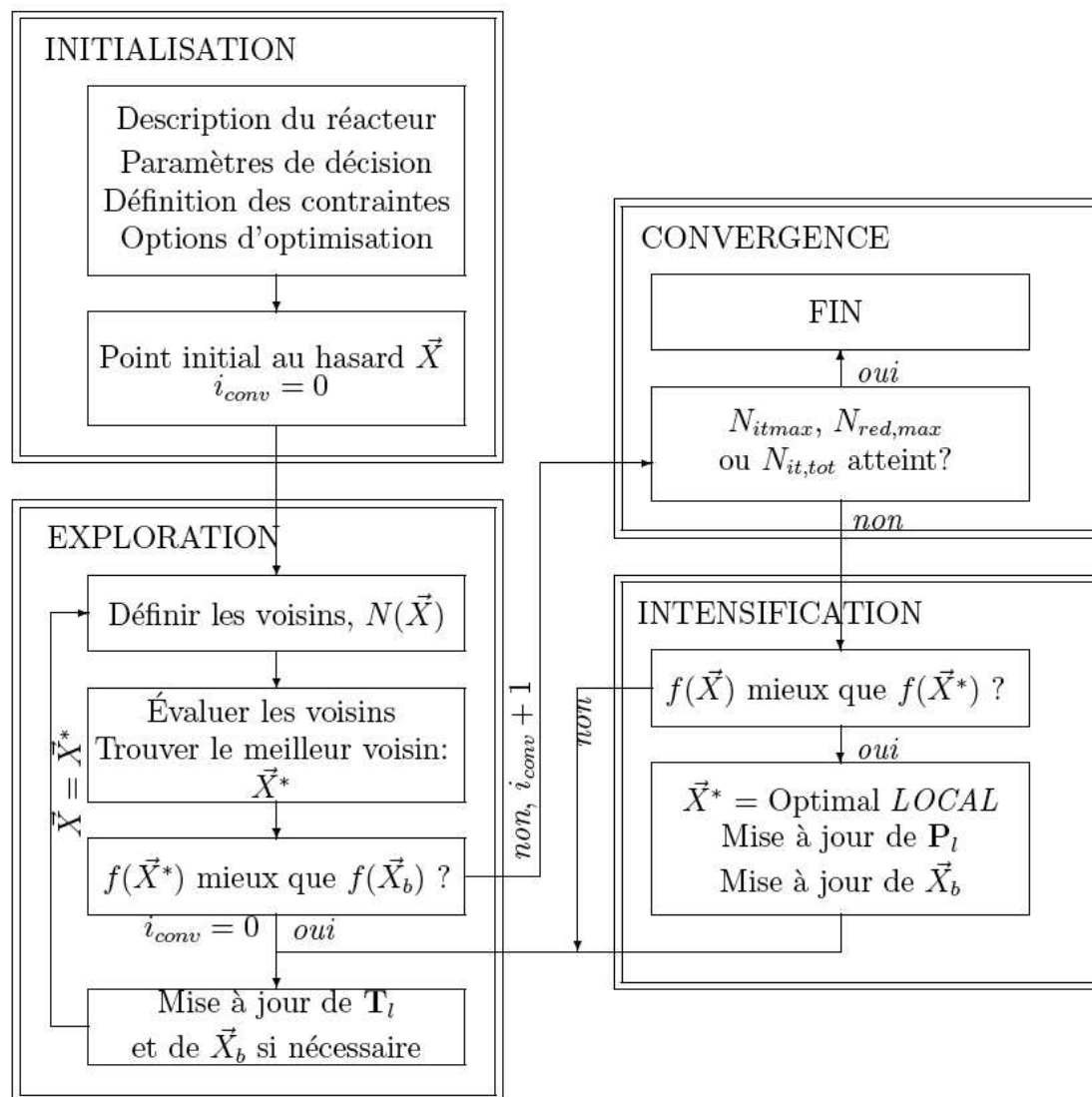


CONVERGENCE



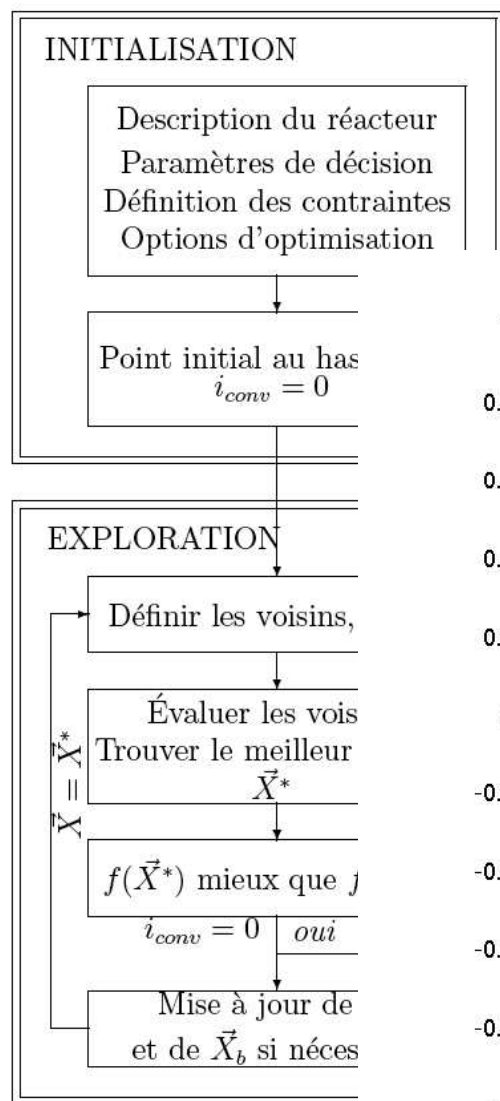
Recherche tabou

- Recherche Tabou: Principe général et amélioration:

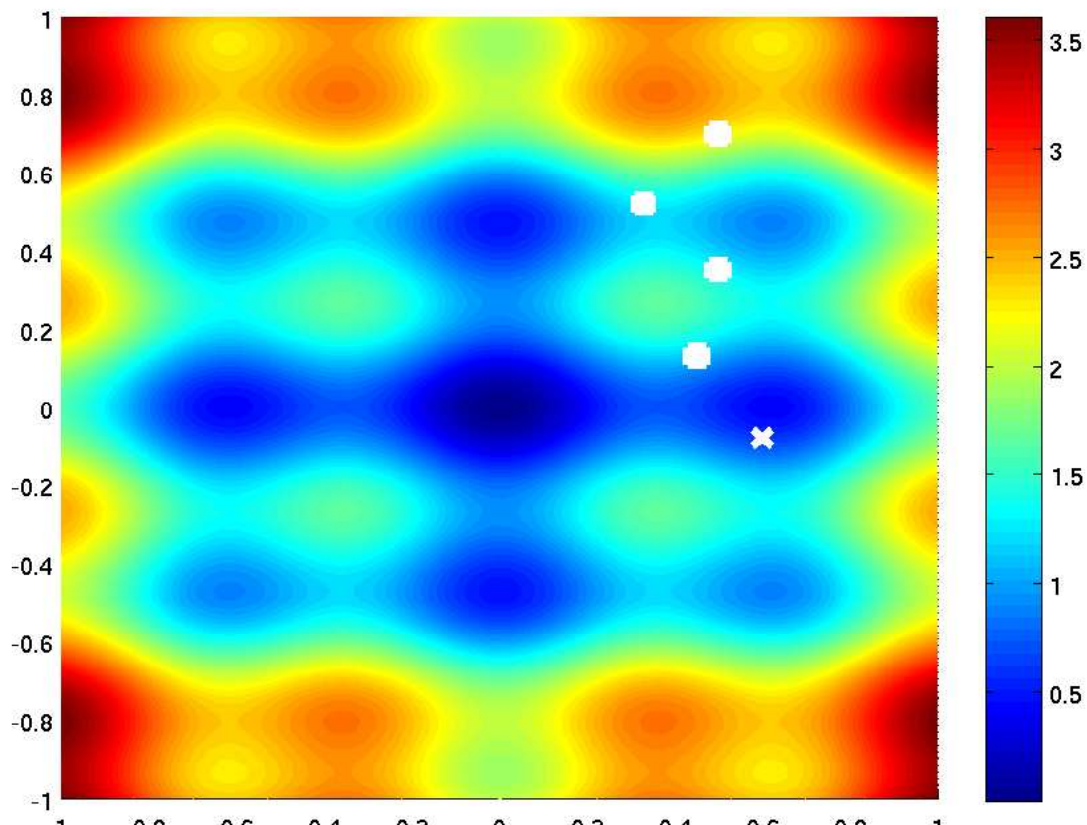


Recherche tabou

- Recherche Tabou: Principe général et amélioration:

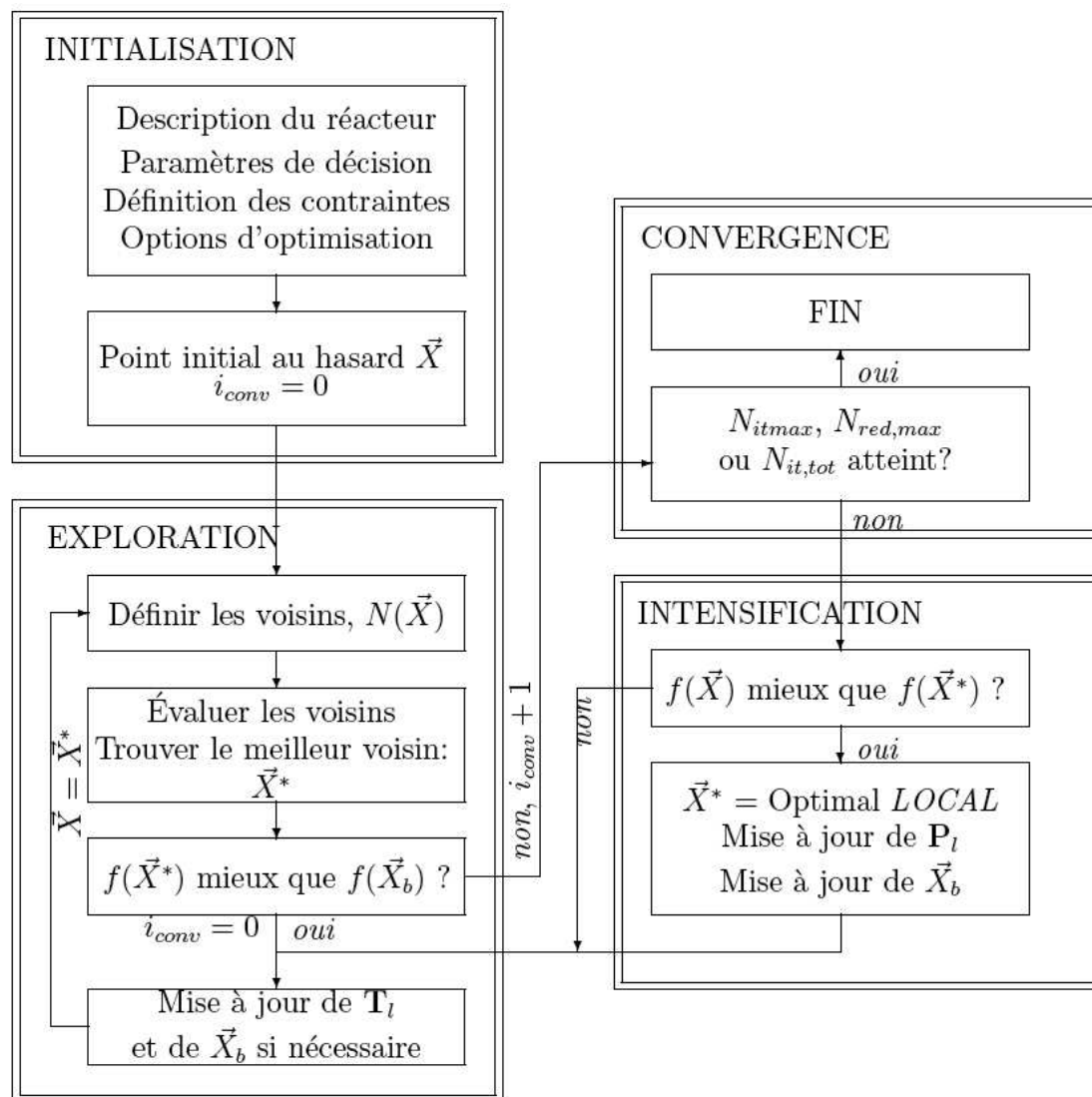


CONVERGENCE



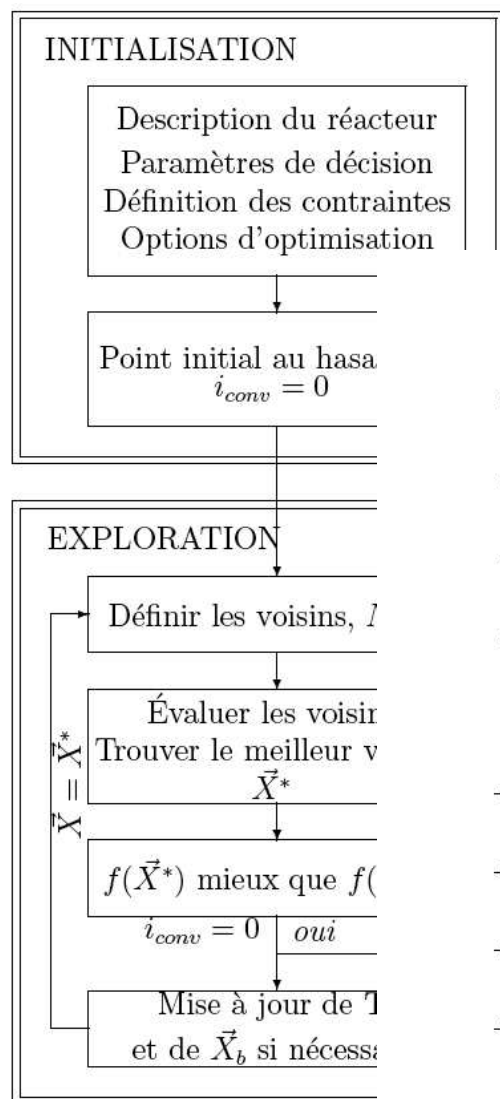
Recherche tabou

- Recherche Tabou: Principe général et amélioration:

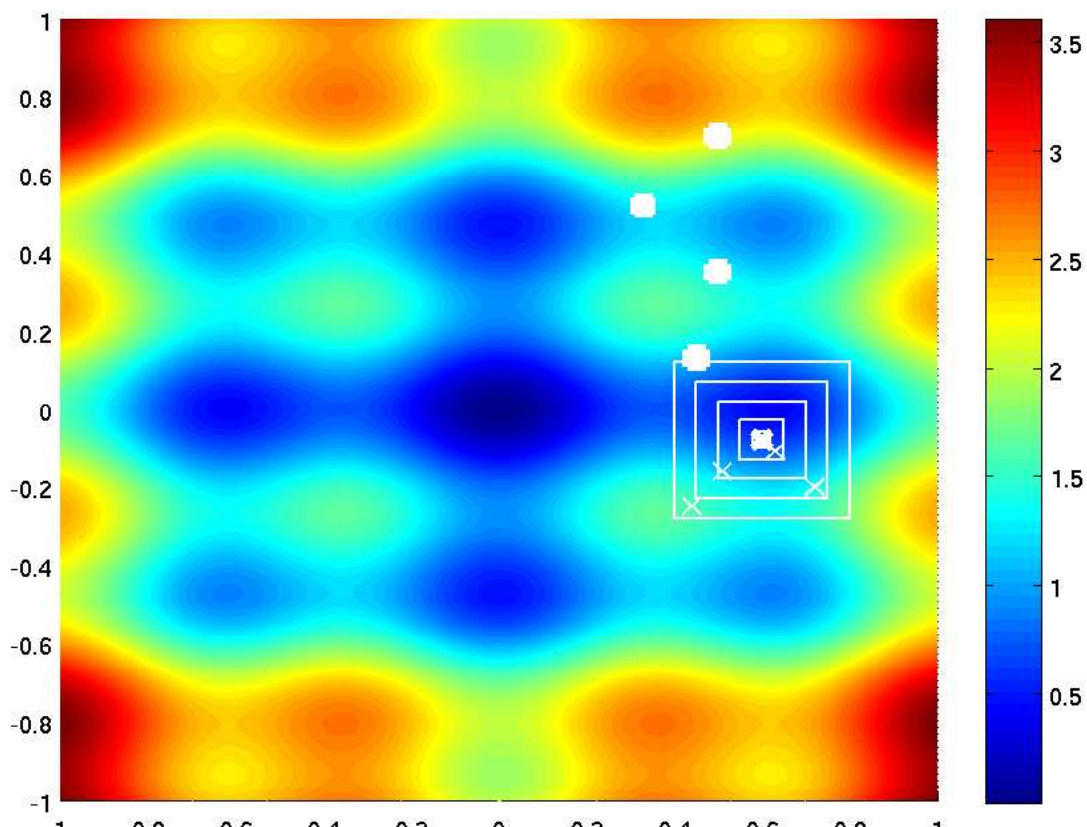


Recherche tabou

- Recherche Tabou: Principe général et amélioration:

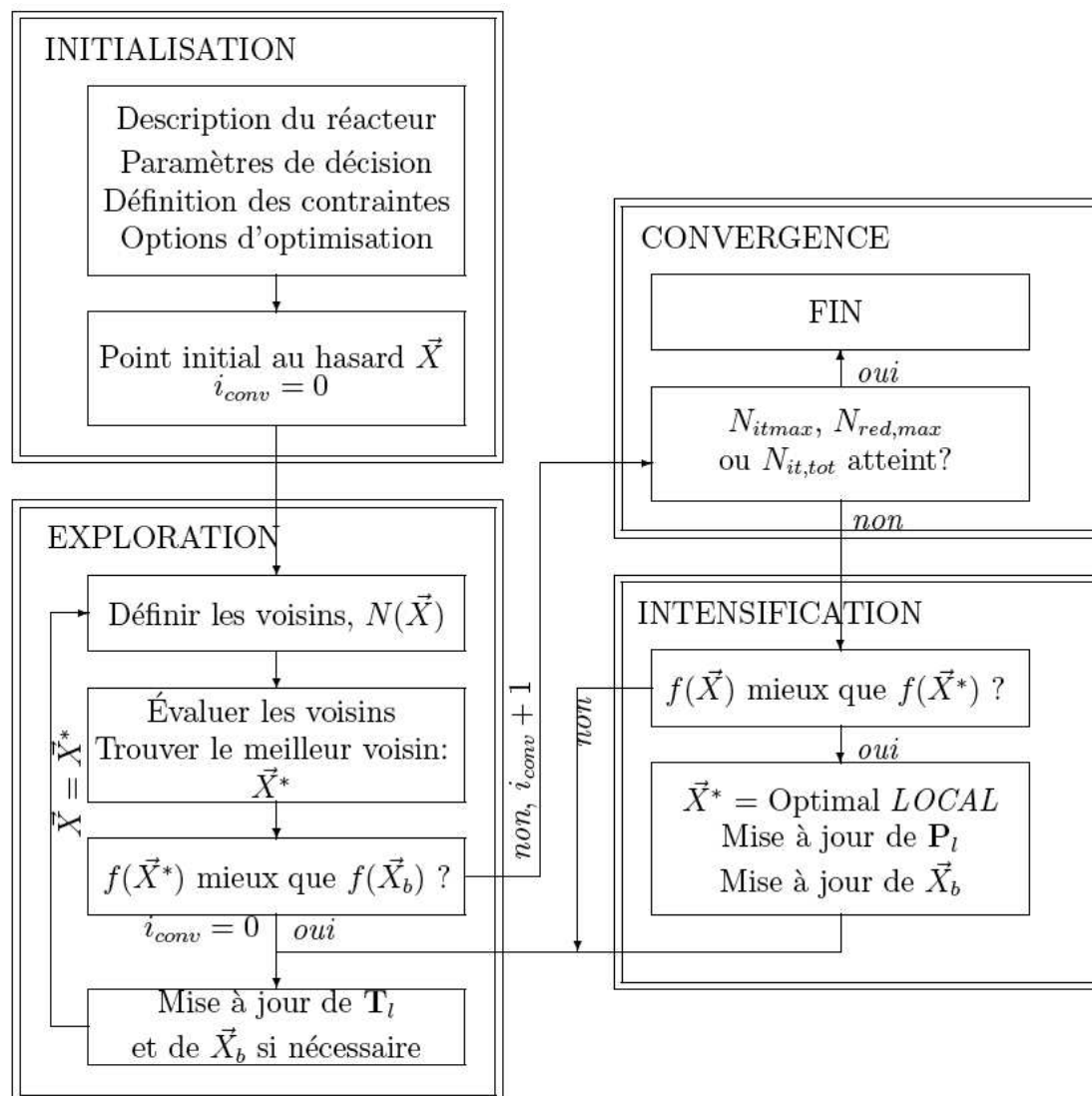


CONVERGENCE



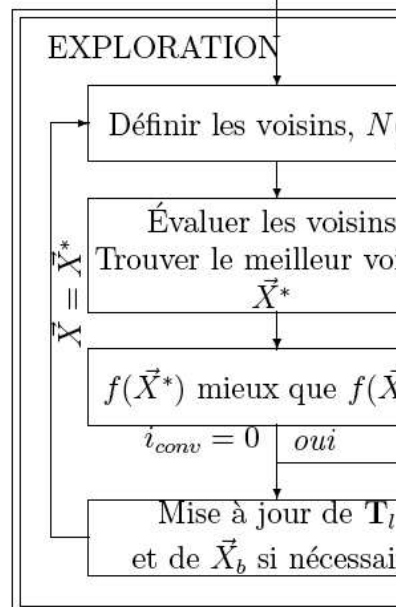
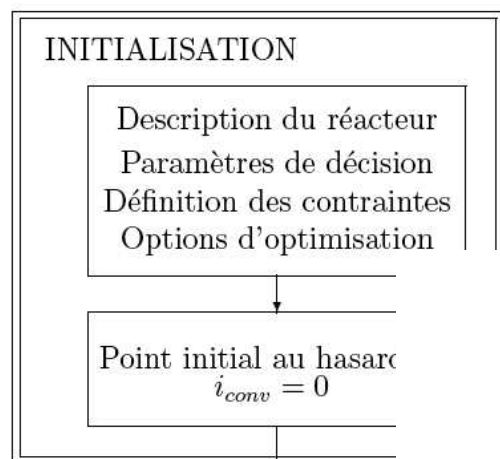
Recherche tabou

- Recherche Tabou: Principe général et amélioration:

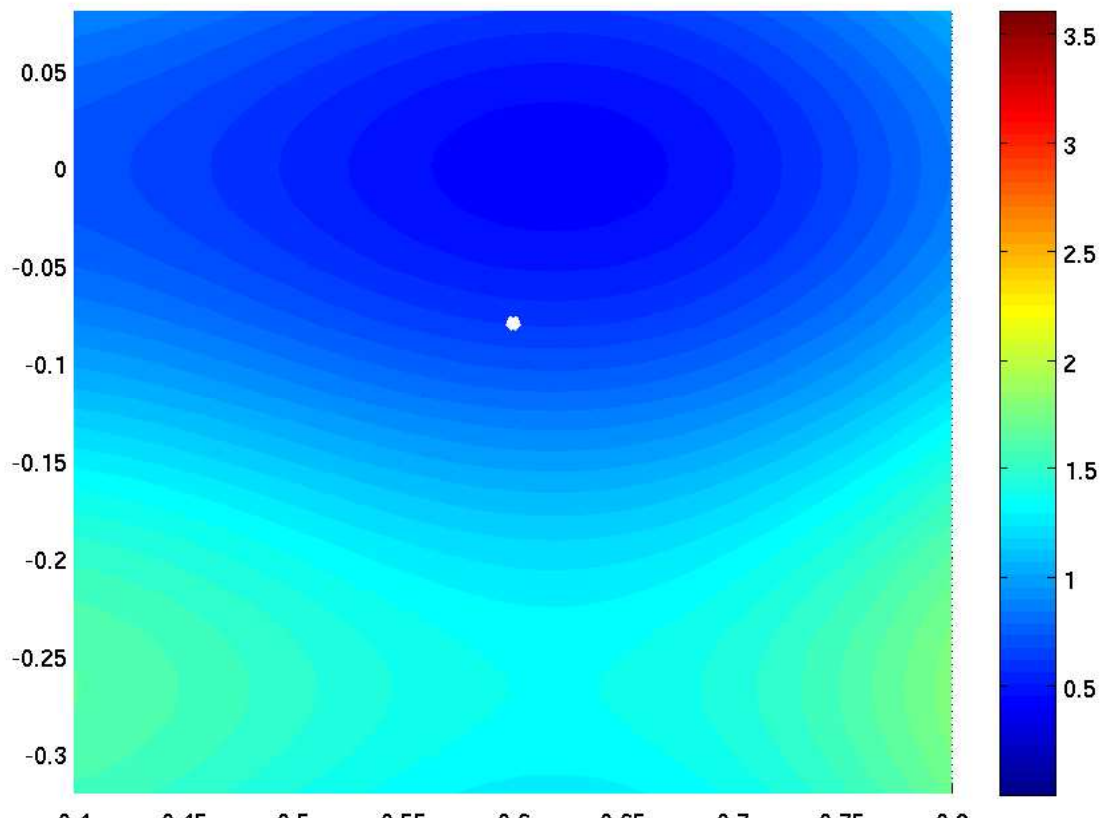


Recherche tabou

- Recherche Tabou: Principe général et amélioration:

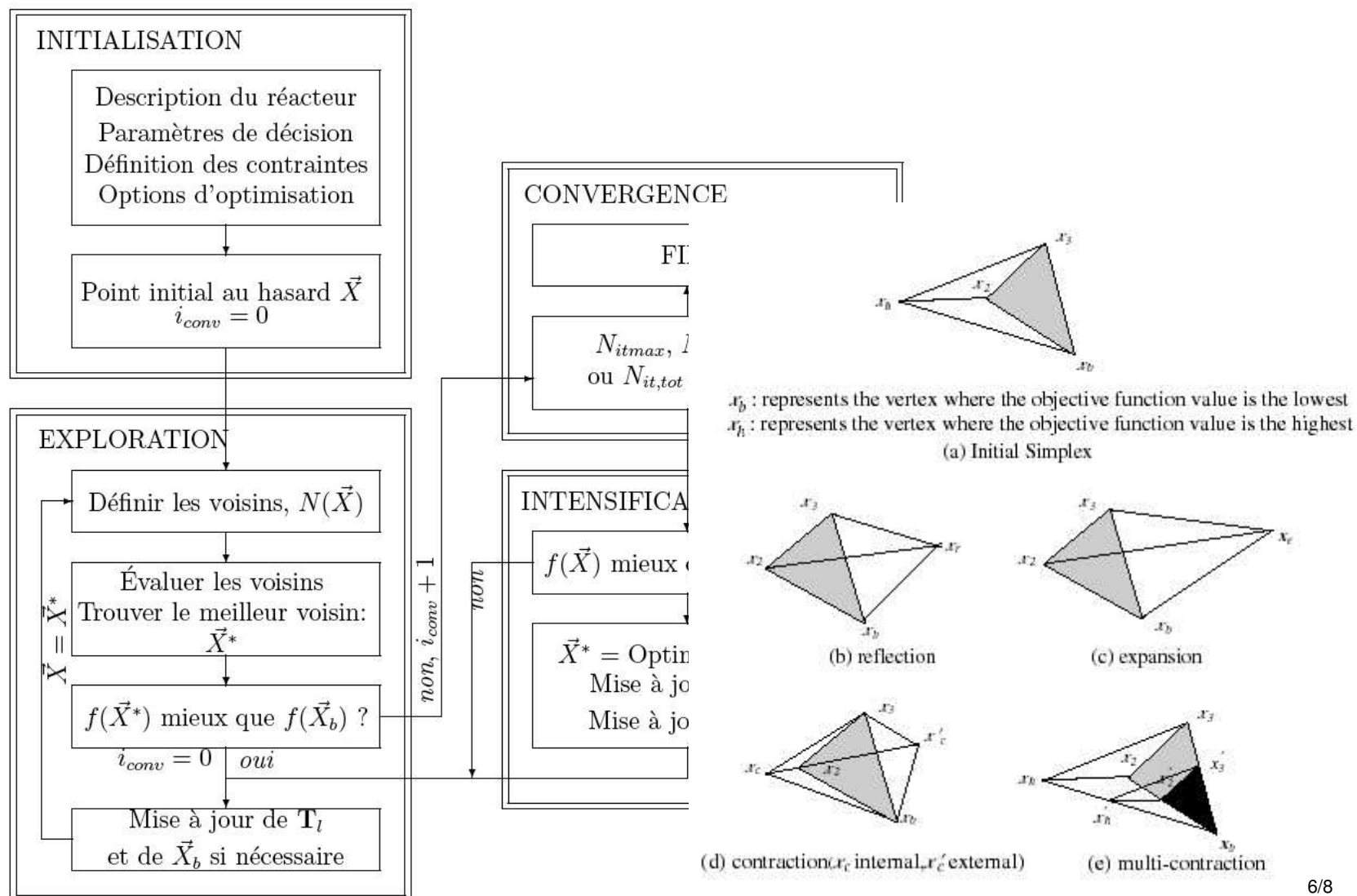


CONVERGENCE



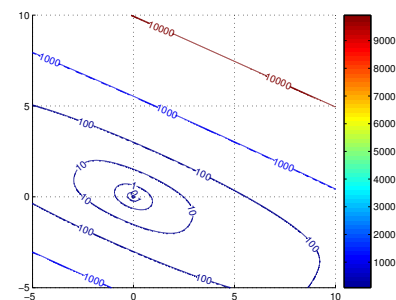
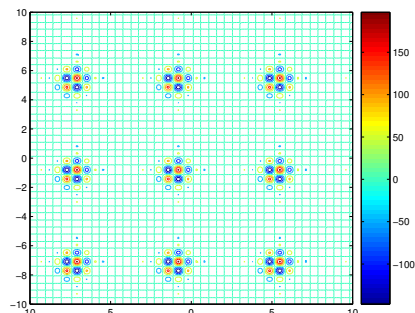
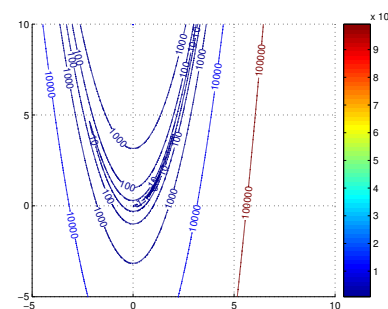
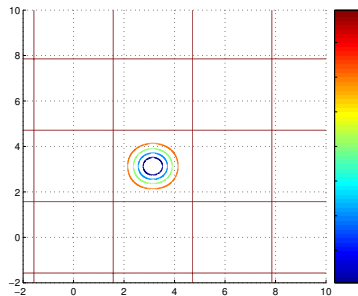
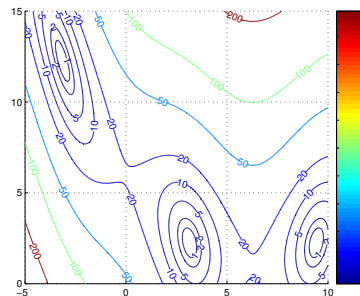
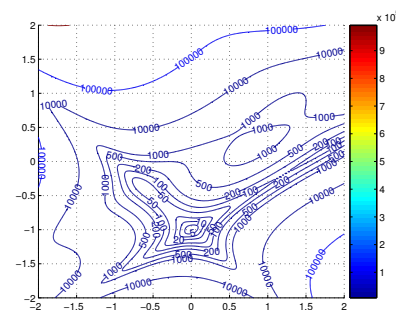
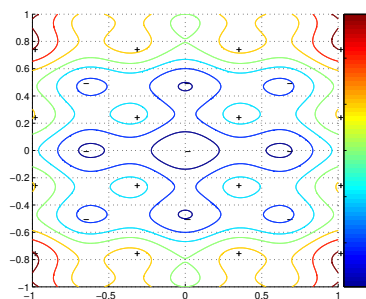
Recherche tabou

● Recherche Tabou: Principe général et amélioration:



Recherche tabou

● Fonctions tests:



$N_{ngb}, N_{itmax}, L_t, L_p, R_n(*), R_t(*), R_p(*), N_{npd,max}, N_{red,max} ?$

Recherche tabou

- Algorithme retenu pour la gestion du combustible:

Méthode Nelder-Mead:

N_{ngb}	N_{itmax}	L_t	L_p	$R_n(^*)$	$R_t(^*)$	$R_p(^*)$	$N_{npd,max}$	$N_{red,max}$
$\min\{2n_{var}, 10\}$	50 ou 200	20	10	0.2	0.01	0.02	5 ou $2n_{var}$	5

- Fonction objectif:

$$f_{TS} = F_C + \frac{w_k}{2} (k_{eff} - 1)^2 + \frac{w_q}{2} \sum_j (\max(0, q_j - q_{lim})^2)$$

Recherche tabou

● Résultats ACR-700:

Optimisation en burnup

$N_{npd,max} = 14$								
B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	F_C	ϕ
27.43	26.99	27.41	24.18	17.76	14.66	14.69	4.5151	4837
27.44	27.03	27.40	24.16	16.77	15.75	19.93	4.4870	4677
27.31	27.17	27.28	24.01	15.46	18.58	21.99	4.4759	4693

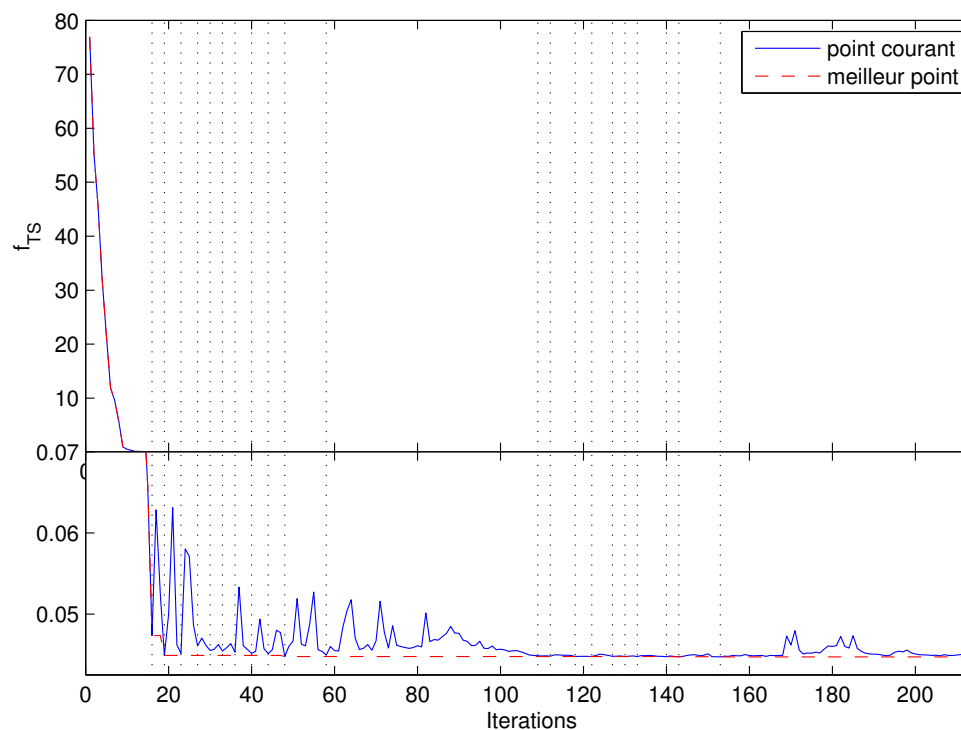
Avec la méthode MM (cas "flat")

B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	F_C
27.32	27.16	27.24	24.02	15.77	18.29	18.98	4.4753

Recherche tabou

● Résultats ACR-700:

Fonction objectif f_{TS} selon les itérations



Recherche tabou

● Résultats ACR-700:

Optimisation en burnup et enrichissement

$N_{itmax} = 50$									
B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	ε_f	F_C	ϕ
32.44	32.25	31.53	28.52	21.18	24.94	21.29	2.902	4.4114	6590
32.63	31.99	31.09	28.29	22.02	22.46	18.08	2.885	4.4386	6274
28.61	27.71	28.04	25.39	18.80	13.71	33.84	2.642	4.7248	5585

$N_{itmax} = 200$									
B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	ε_f	F_C	ϕ
27.55	27.57	27.84	24.79	16.70	20.26	22.44	2.623	4.6092	7271
33.39	33.85	34.60	31.15	22.69	28.49	20.80	3.040	4.3476	9851
27.85	27.46	28.28	25.41	18.75	14.81	24.28	2.632	4.6722	10555

Questions

? ? ? ?