

Méthodes d'optimisation pour l'espace et l'environnement

Thèse de Thierry **TOUYA**

Encadrement

Mohamed MASMUDI
Didier AUROUX

Avec la participation de

Gérard CAILLE	Thalès Alenia Space
Yann CAILLOCE	
Maryse VAULLERIN	Centre d'Etudes
Christian LE GALLIC	de Gramat / DGA

Laboratoire MIP
Institut de Mathématiques de Toulouse

PLAN de l'exposé

I Etude de fiabilité d'une chaîne de calcul (collaboration avec CEG / DGA)

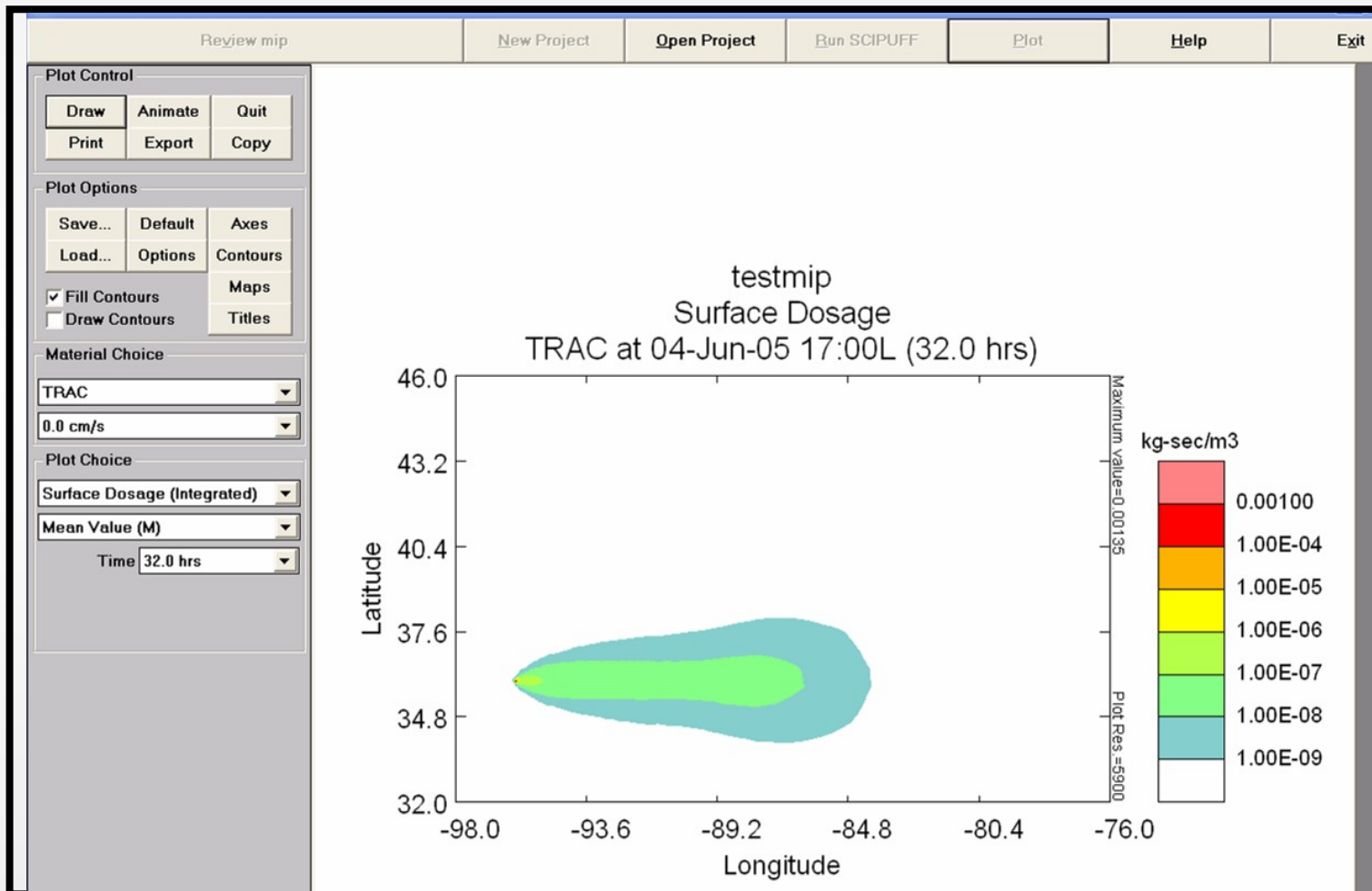
- 1** Problèmes à résoudre
- 2** Méthode utilisée
- 3** Cas test à 9 paramètres
- 4** Cas test à 30 paramètres
- 5** Conclusion

II Conception d'une antenne spatiale (collaboration avec Thalès Alenia Space)

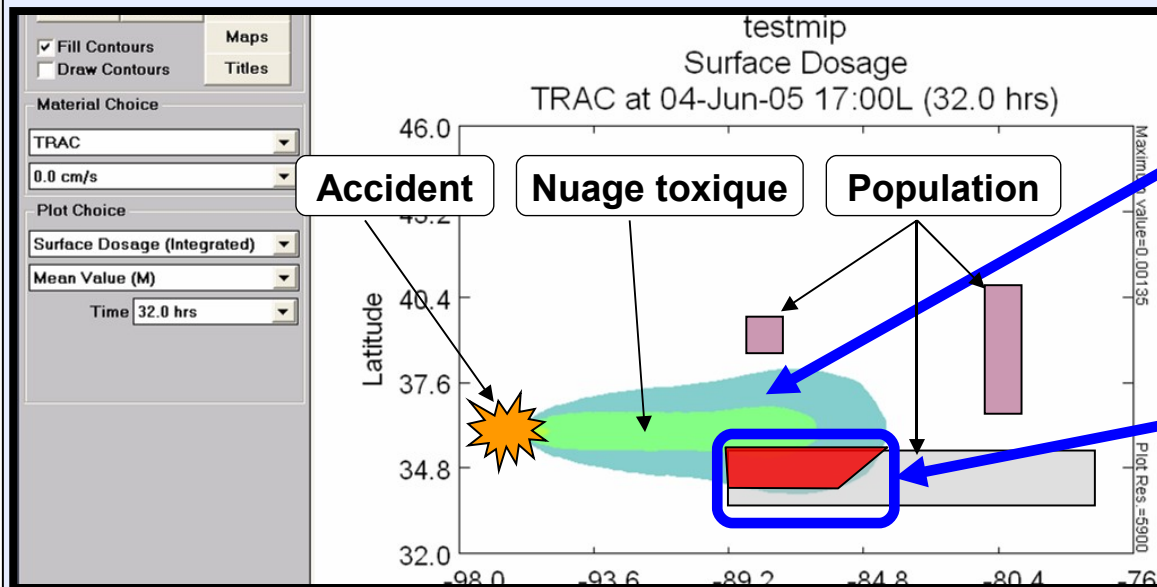
- 1** Données du problème
- 2** Calcul des alimentations optimales
- 3** Optimisation topologique
- 4** Conclusion

CONTEXTE

- Etude menée en collaboration avec le **Centre d'Etudes de Gramat** (46) de la **DGA**
 - Maryse **Vaullerin** - Christian **Le Gallic**



MODELISATION d'un ACCIDENT CHIMIQUE



1^{er} programme (Scipuff)

➡ Calcul de dispersion

2^{ème} programme (CEG)

➡ Calcul du nombre de victimes

Notion d'INCERTITUDE

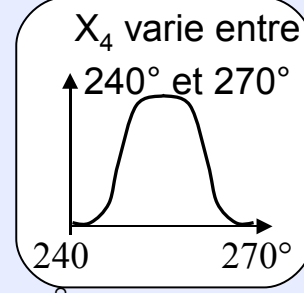
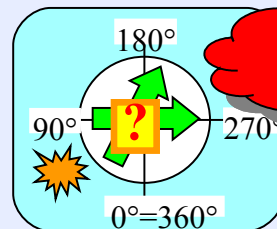
➤ Exemple de paramètre d'entrée

x_4 = Direction du vent

➡ Incertitude

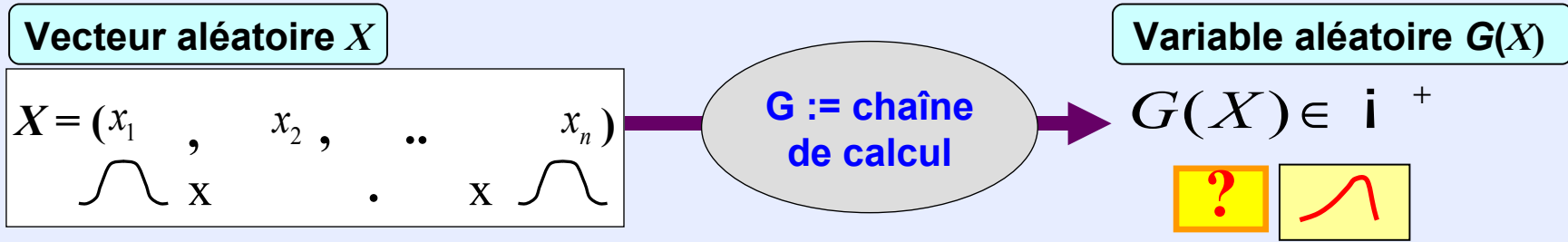
● Approche probabiliste

- ➡ x_4 varie selon une **distribution de probabilité**
- ➡ Par exemple, loi déterminée par **relevés statistiques**



FONCTION de MODELISATION

- Choix des lois de probabilité := Scénario + Intervalles de variation
 - Fonction de modélisation G
- Indépendantes
 - Uniformes ou gaussiennes



OBJECTIF

- **Etude de fiabilité** := Caractériser la variable aléatoire G(X)

DIFFICULTES

- **Fonction de modélisation**

$$G : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^+$$

L'évaluation de G est **coûteuse**
(simulations)

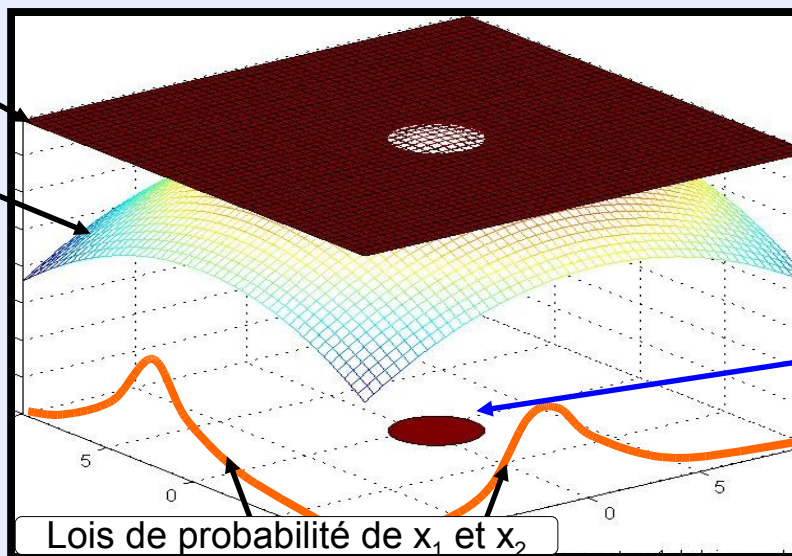
+

n := dimension du problème
est **grande** (n~100)

- **Difficulté majeure** := *Curse of dimension*

Le **coût de calcul croît** de façon **exponentielle** avec n

DEFINITION

Soit un seuil s $G(X)$ Domaine de défaillance D_s

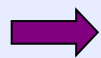
$$D_s = \left\{ X \in \mathbb{R}^n ; G(X) \geq s \right\}$$

PROBLEMES à RESOUDRE

On veut analyser les conséquences

- P_1 Calculer la **probabilité de dépasser s** , un seuil donné

$$p(G(X) \geq s) = p(X \in D_s) = \int_{D_s} \rho(x_1) \dots \rho(x_n) dx_1 \dots dx_n$$

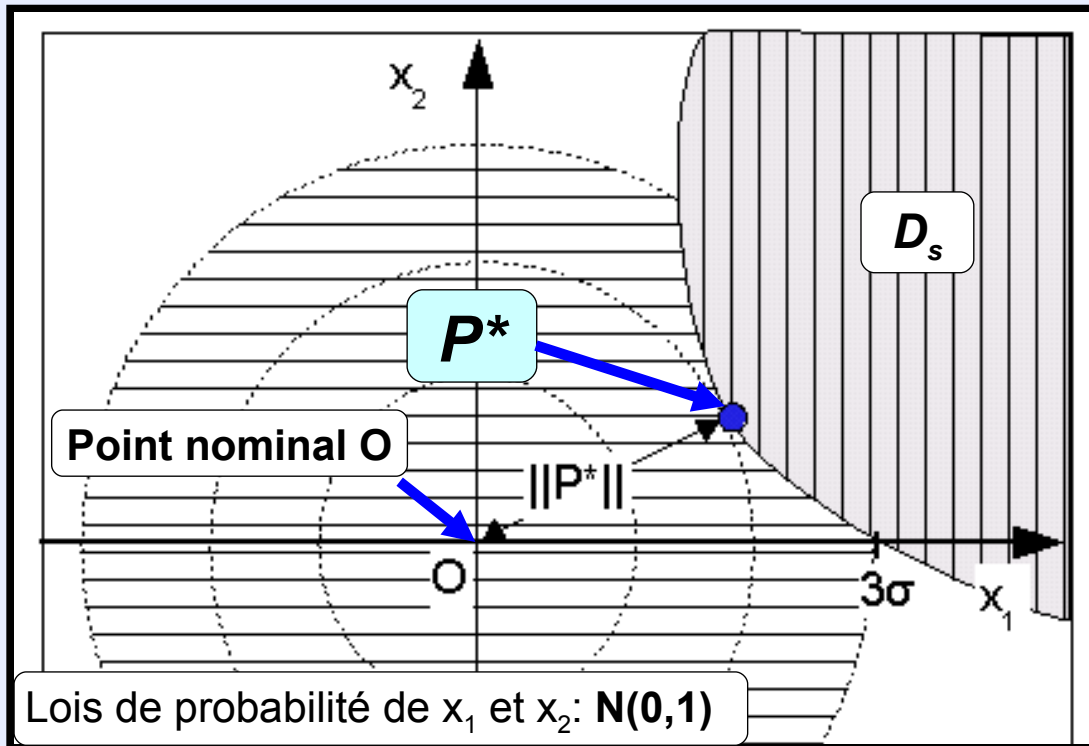
avec $\rho(x_j) :=$ densité de probabilité de x_j 

Calcul d'intégrale

PROBLEMES à RESOUDRE

P₂

Calculer le **point de conception P*** := Le **point** du domaine de défaillance **D_s** le plus probable



$$P^* = \min_{X \in D_s} X^T X$$



Problème d'optimisation

P₃

Déterminer les **paramètres influents**



Analyse de sensibilité

PLAN de l'exposé**I Etude de fiabilité d'une chaîne de calcul****II Conception d'une antenne spatiale****1** Problèmes à résoudre**2** Méthode utilisée**3** Cas test à 9 paramètres**4** Cas test à 30 paramètres**5** Conclusion**1** Données du problème**2** Calcul des alimentations optimales**3** Optimisation topologique**4** Conclusion

METHODES USUELLES

➤ **P₁** Probabilité

- Formules de quadrature
- Méthodes de **Monte-carlo** et quasi Monte-Carlo
- **FORM / SORM**

● Ne permettent pas de résoudre **P₂** et **P₃**

➤ **P₂** Point de conception

- Méthodes d'**optimisation**

● **G** coûteuse et bruitée

● Pas de gradient

➡ Problèmes difficiles

● **P₃** Paramètres influents

- **Indices** basés sur le **gradient**
- **Plans d'expériences**
- **Décomposition de la variance** (indices de Sobol)

IDEE CLE: APPROXIMATION

Approche retenue pour l'étude de fiabilité de $G : \mathbf{i}^n \rightarrow \mathbf{i}^+$

Concentrer le coût de calcul

dans la **construction** d'une **approximation g**



- Evaluation de g **non coûteuse**
- **Gradient** de g disponible



Nature de g

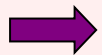


- Réseau de neurones
- **Sparse grid**

Utiliser g à la place de G pour résoudre les 3 problèmes à la fois



P₁ Probabilité de dépasser un seuil



Méthode de **Monte-Carlo**



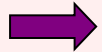
P₂ Point de conception



Méthode de **descente**



P₃ Paramètres influents



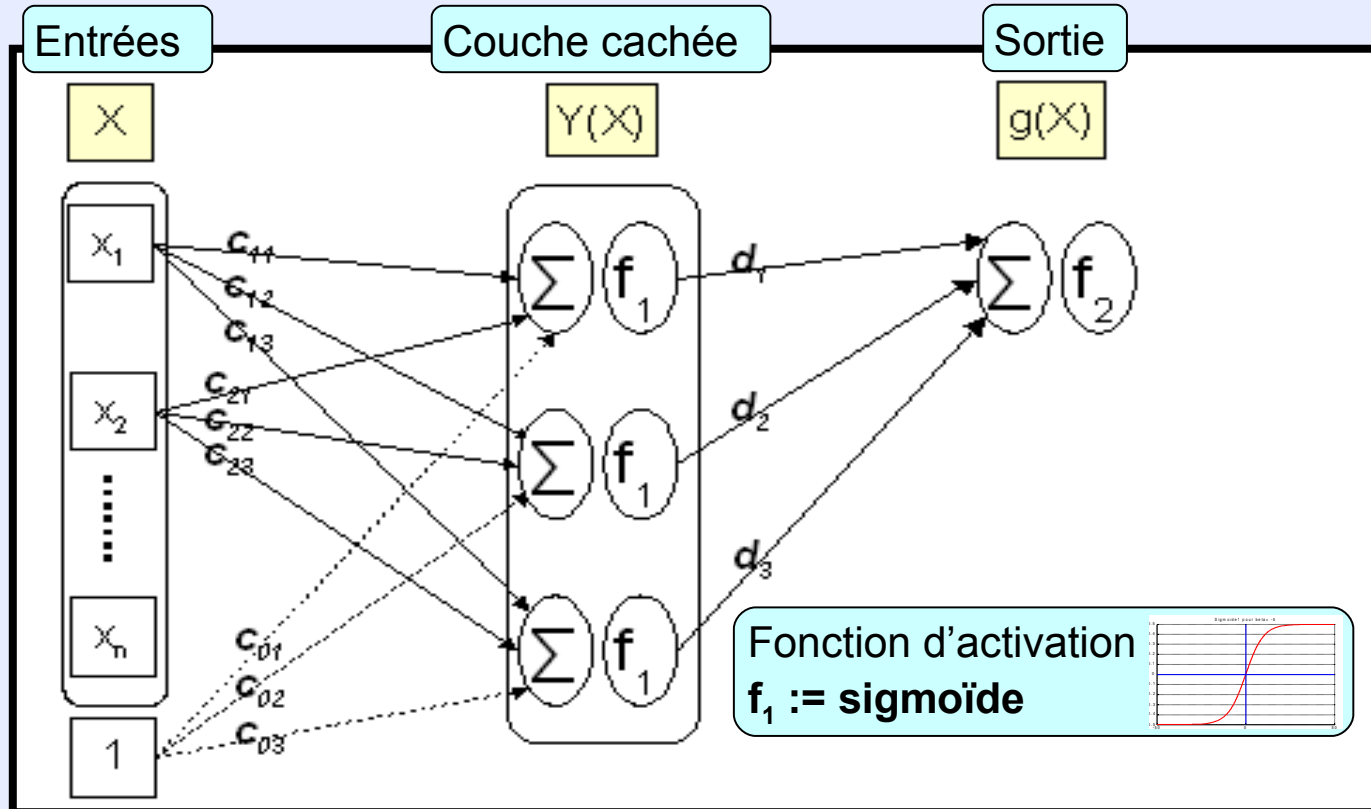
Calcul de **gradient**

- Tirage **carré latin** ➔ p points bien répartis
- Représentation des **gradients**

$$L_k := \left(\left| \frac{\partial g}{\partial x_k} (X_1) \right|, \dots, \left| \frac{\partial g}{\partial x_k} (X_p) \right| \right), k = 1 \dots n$$

RESEAU de NEURONES

- **Perceptron multi-couches** ➔ propriété d'approximation universelle



- **Données de construction** ➔ Tirage **hypercube latin**

- **Phase d'ajustement := Apprentissage supervisé**

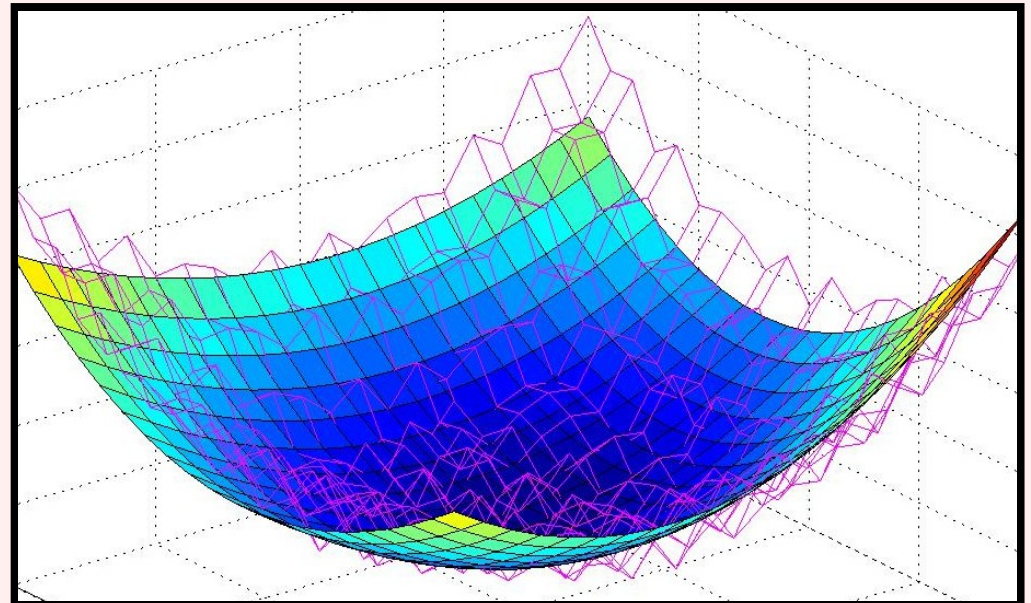
Minimisation de l'erreur d'approximation ➔
$$\min_{c,d} \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \left\| g(X_j, c, d) - G(X_j) \right\|_2^2$$

LOGICIEL de réseau de neurones: GAP

- **Code** développé par S.Jan, M. Masmoudi, M.Van-Grieken (**MIP**)
- Utilise des **techniques de régularisation**
 - Algorithme de **Gauss-Newton** ➔ Perturbations de norme minimale (zéro mémoire)
 - **Réduction** du nombre de **neurones cachés**
 - **Arrêt** des **itérations** ➔ **Evite le surapprentissage**

➔ **Approximation lissée**

Exemple:
fonction Rastrigin



IDEE CLE

- Objectif Qualité de **prédiction** pour un coût de calcul **modéré** := Parcimonie
- Difficulté **Grande dimension**
- Solution **Méthode hiérarchique et adaptative** → **Sparse grids**
qui traite **uniquement** les **paramètres importants**

→ Particulièrement **efficace dans les cas réels** → **Très peu** de **paramètres significatifs**

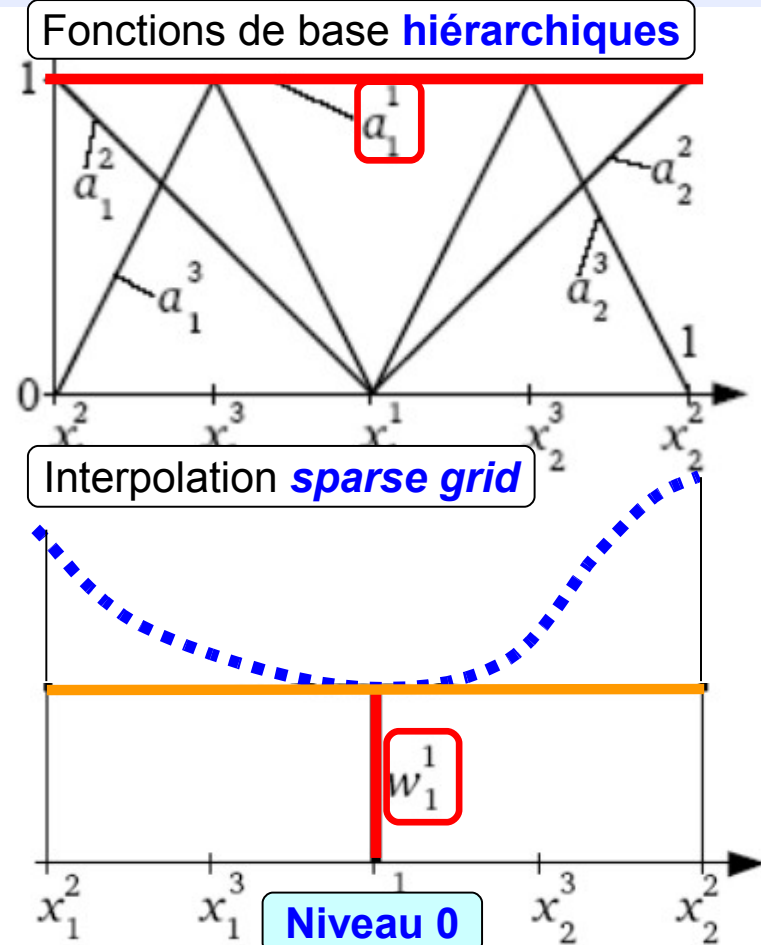
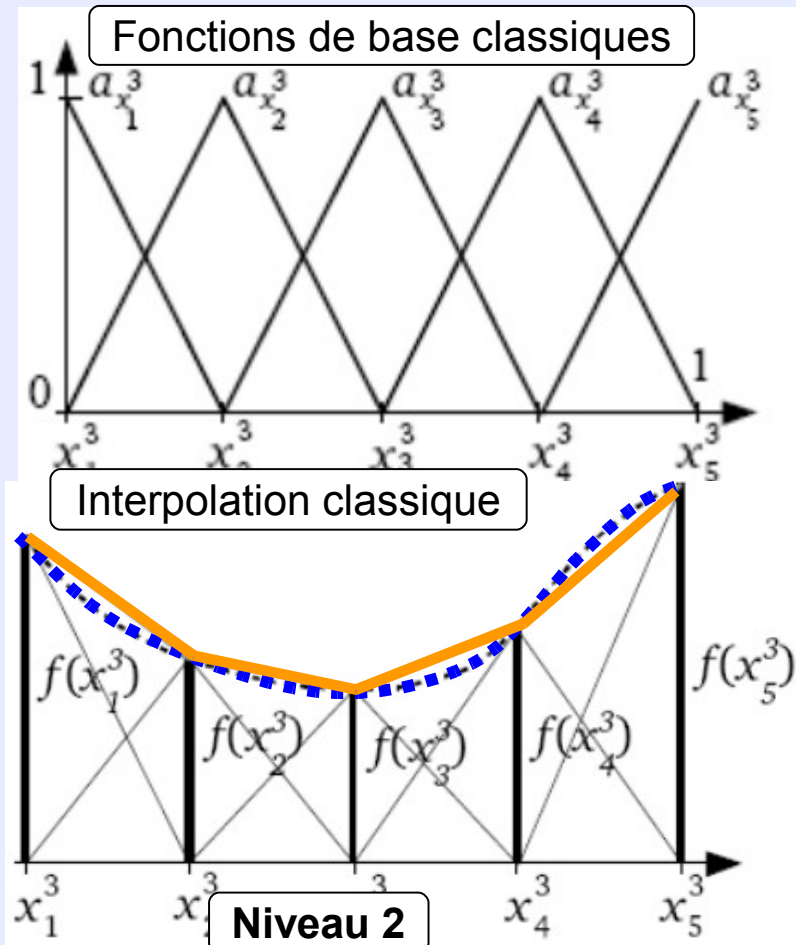
SPARSE GRIDS

- Technique d'**interpolation sur grille épaisse** (construction de Smoliak, 1963)
- **Utilisation** Quadrature (Gerstner-Griebel 1998),
EDP en grande dimension (>3) (Bungartz 1998),...
- **Code** (Klimke 2006)
- **Coût de calcul**

N:=résolution d:=dimension	Nombre de points de grille	Erreur $\ G-g\ _2$	Résolution N=5	Méthode	Dimension		
					d=2	d=10	d=100
Grille pleine	N^d	$O(N^2)$	Nombre de points de grille	Grille pleine	$5^2 = 25$	$5^{10} \approx 10^7$	$5^{100} \approx 10^{70}$
<i>Sparse grid</i>	$O(N \log(N)^{d-1})$	$O(N^2 \log(N)^{d-1})$		<i>Sparse grid</i>	13	221	20 201

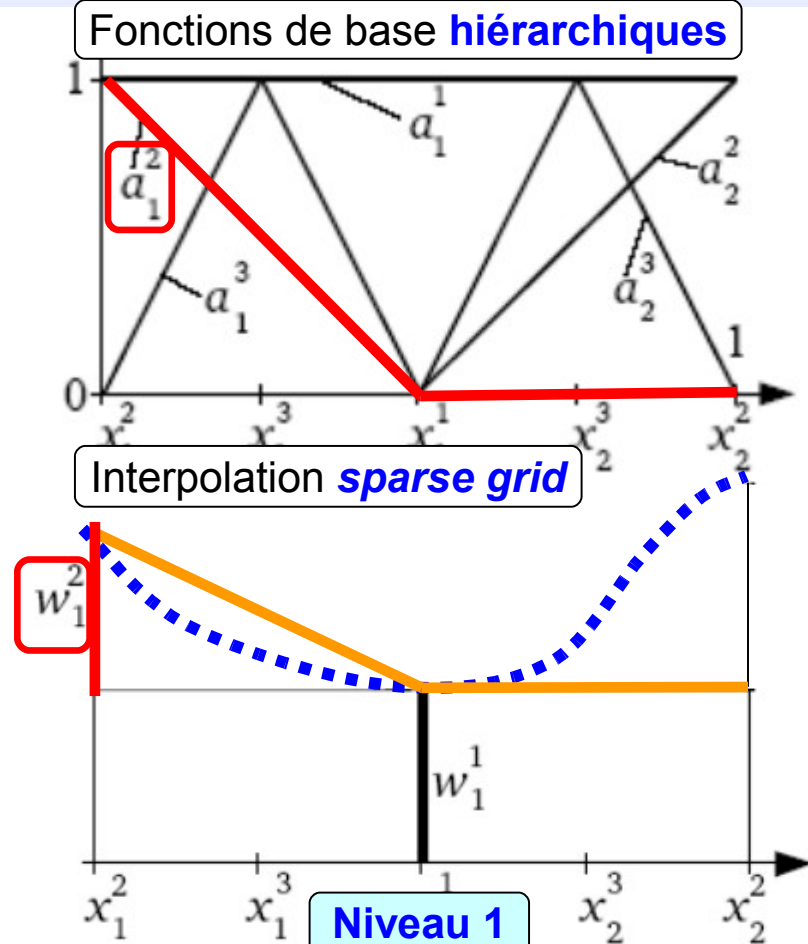
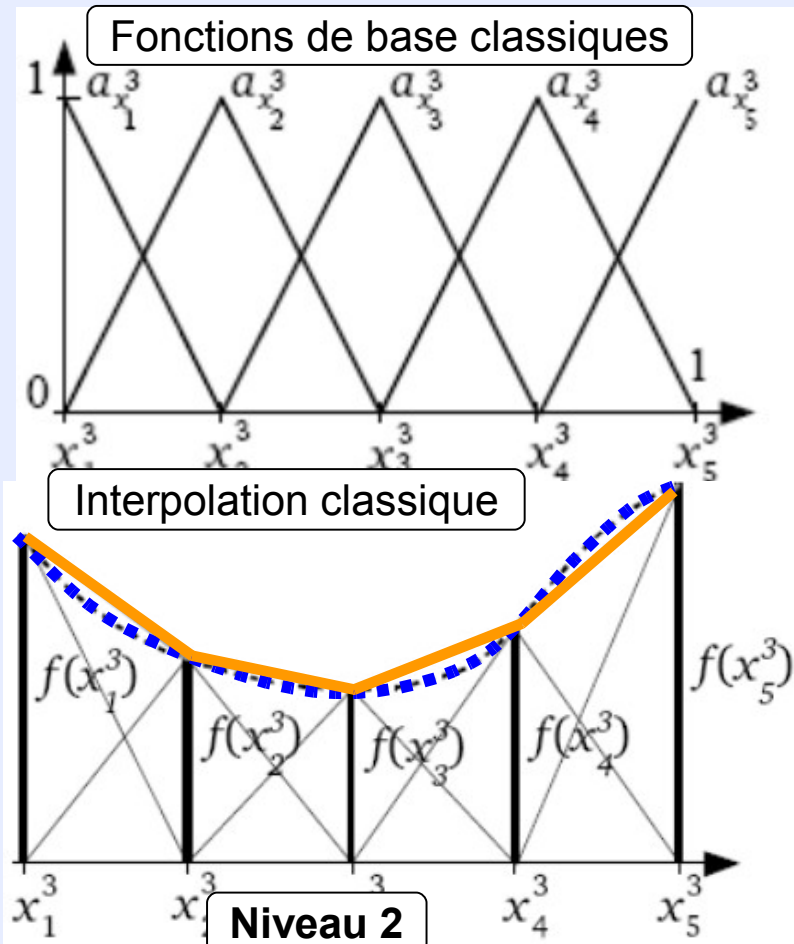
SPARSE GRIDS

● Approche hiérarchique



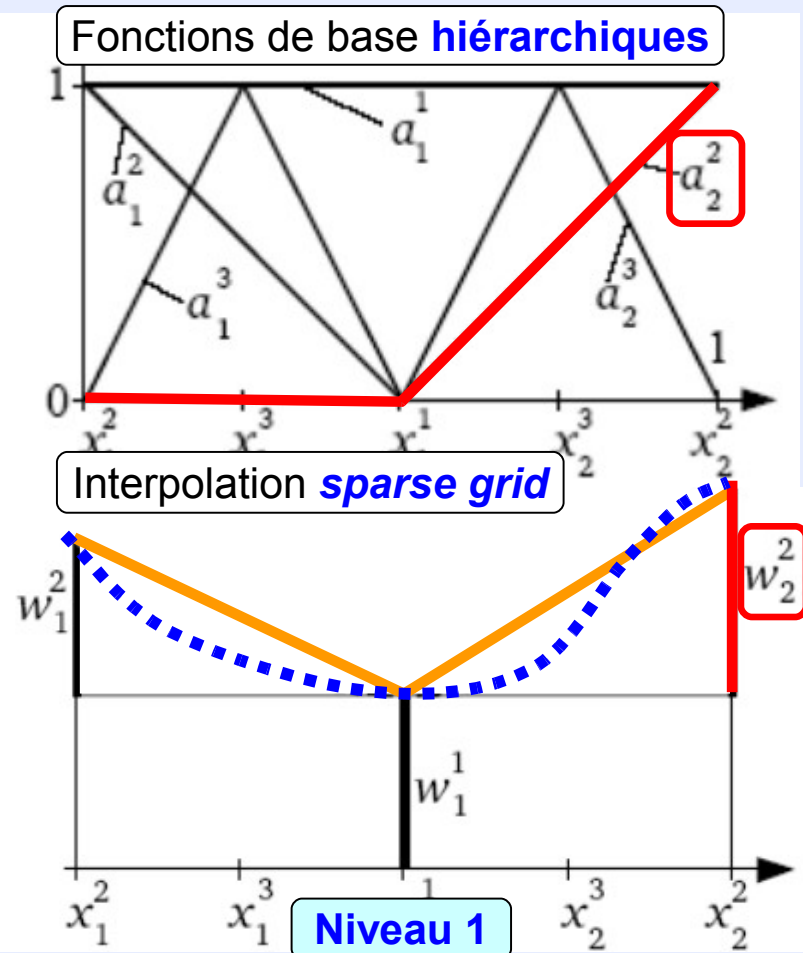
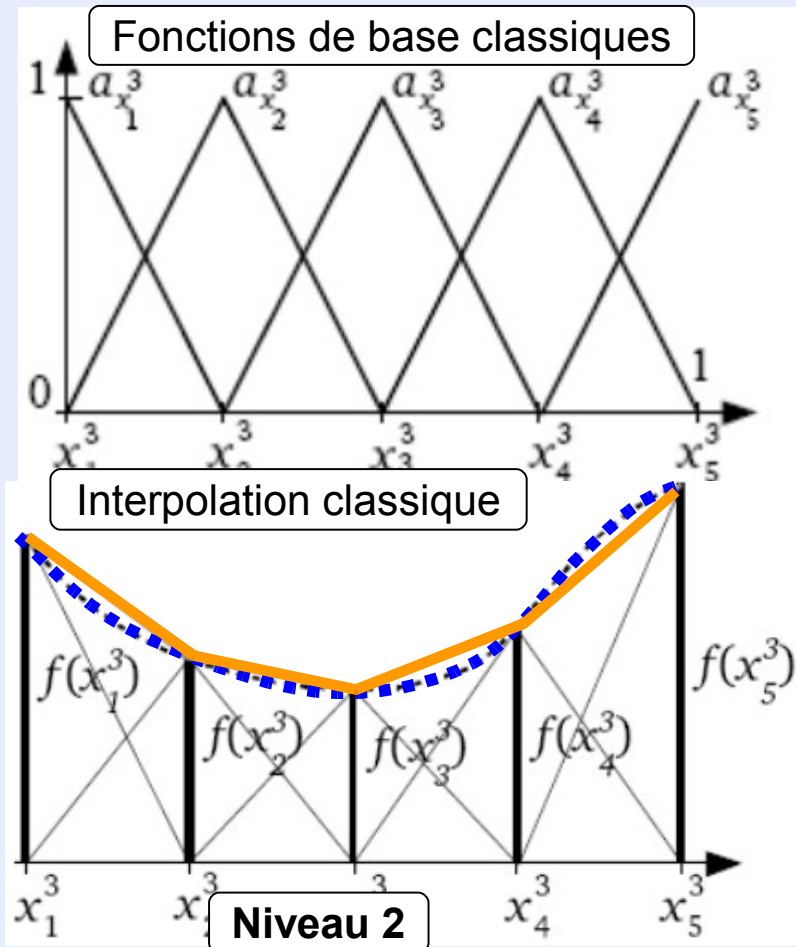
SPARSE GRIDS

● Approche **hiérarchique**



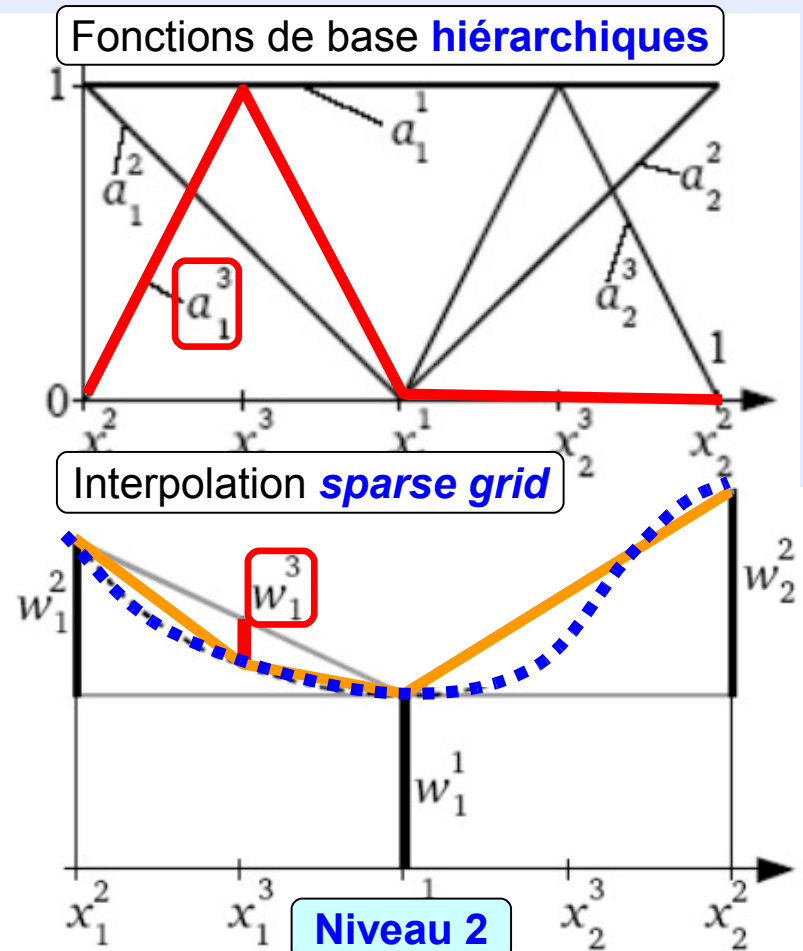
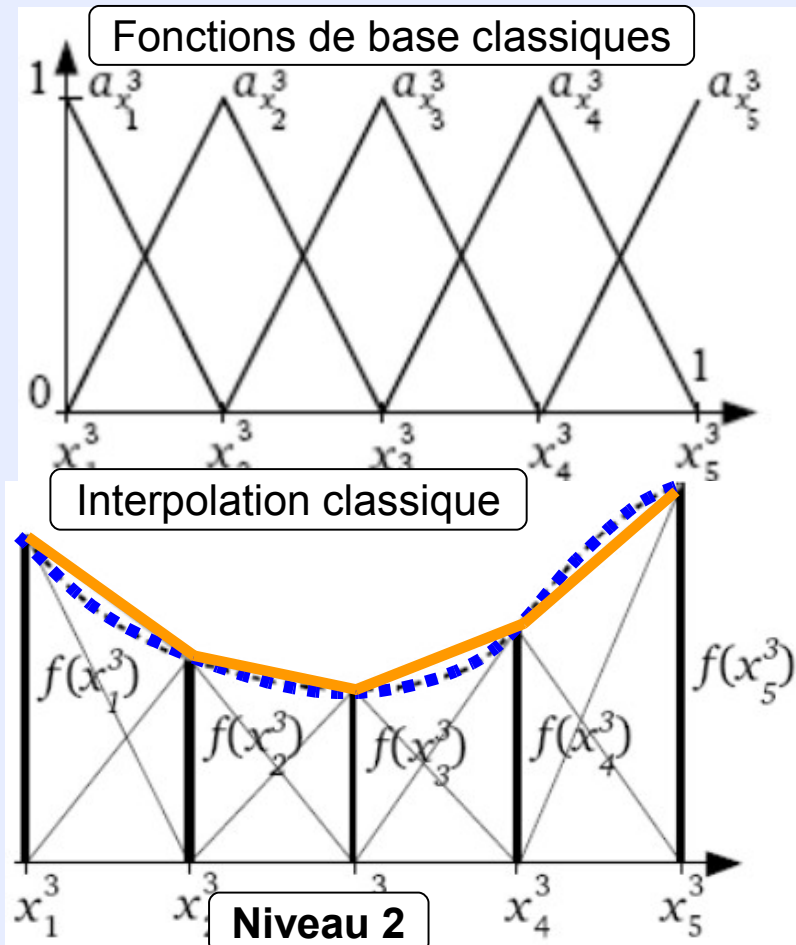
SPARSE GRIDS

● Approche hiérarchique



SPARSE GRIDS

● Approche hiérarchique

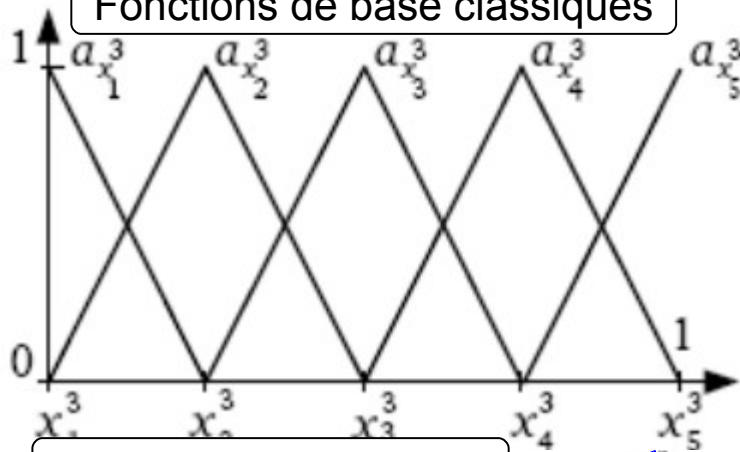


SPARSE GRIDS

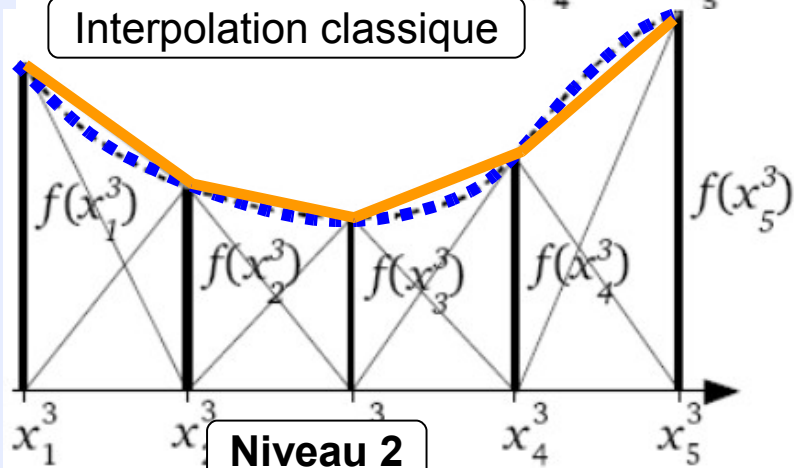
Approche hiérarchique

- Améliorations successives des approximations de niveau inférieur
- Conservation des fonctions de base précédentes
- Coefficients w_j à calculer := Estimation d'erreur

Fonctions de base classiques

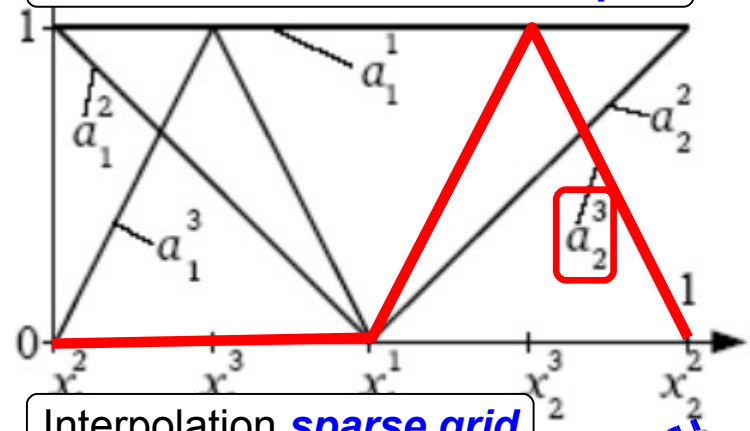


Interpolation classique

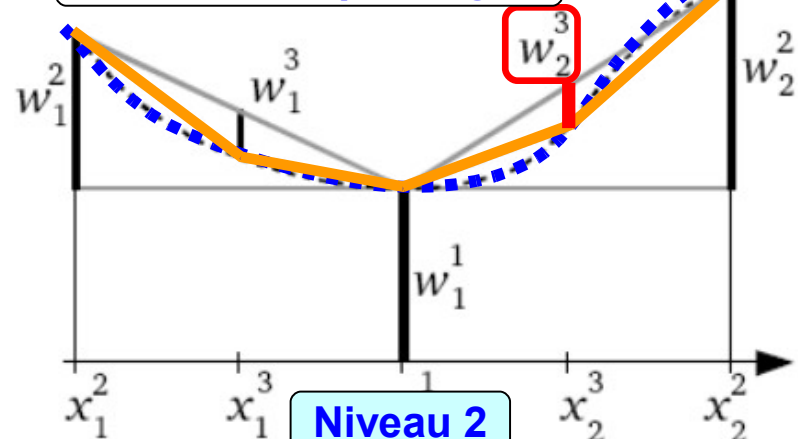


Niveau 2

Fonctions de base hiérarchiques



Interpolation sparse grid

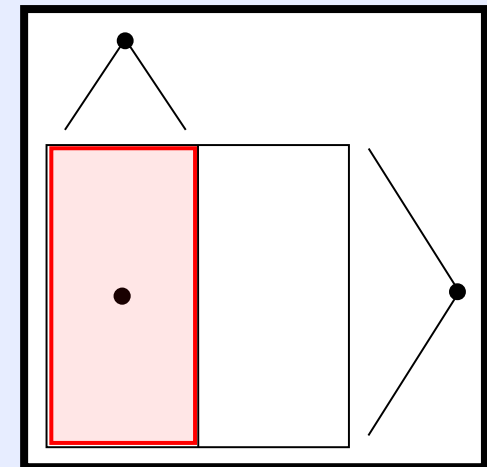
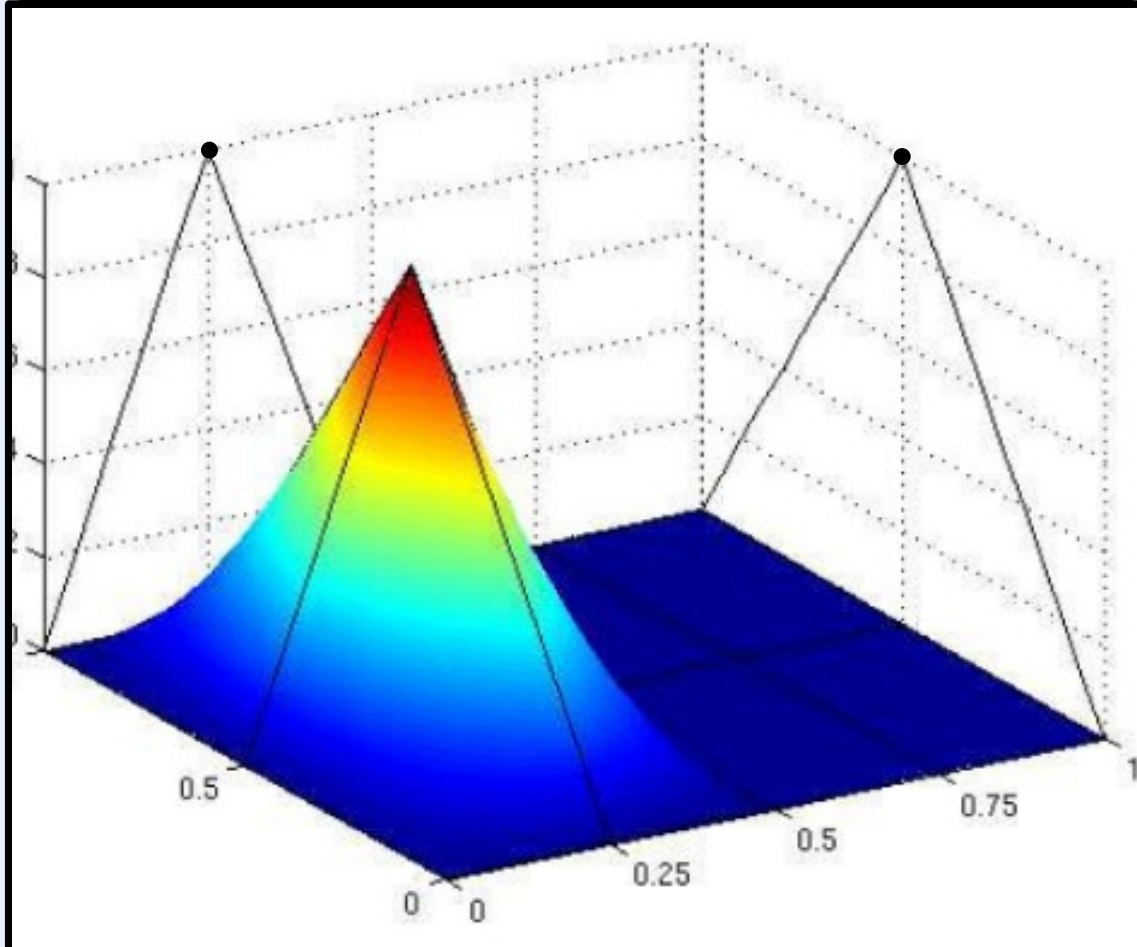


Niveau 2

SPARSE GRIDS

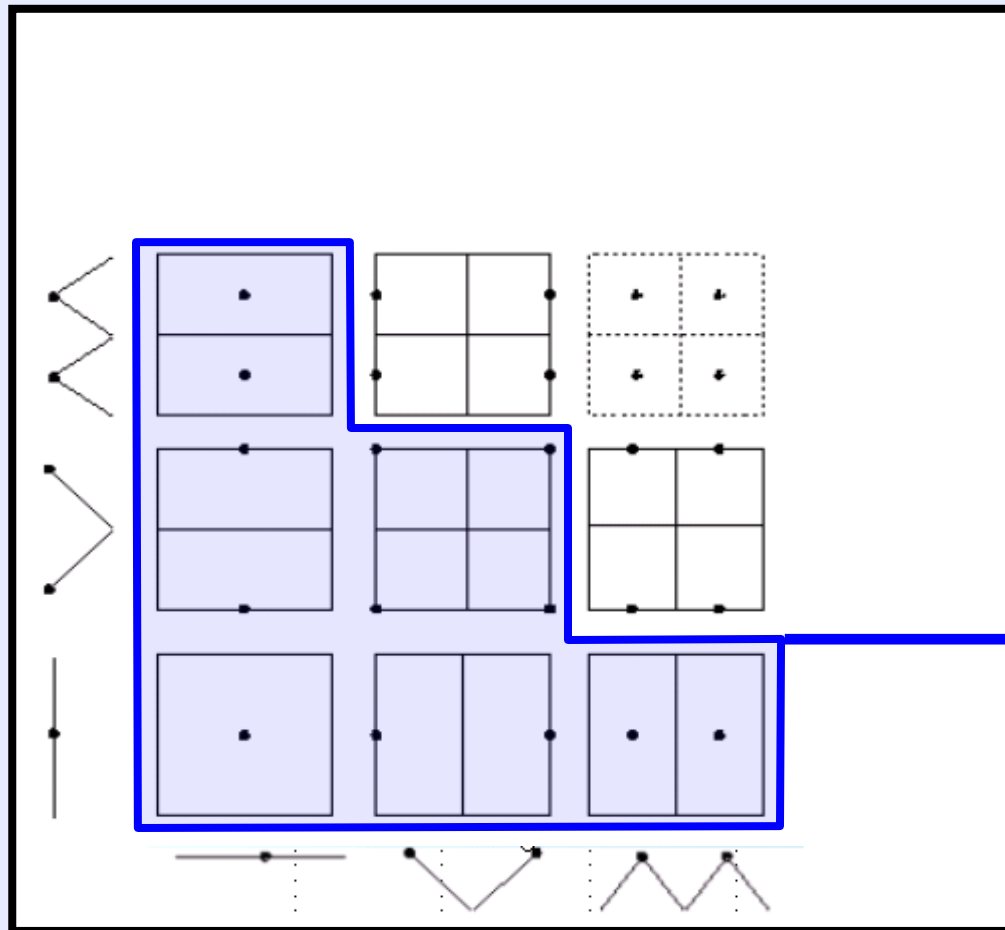
- Principe: **Extension** au cas multivarié des **formules d'interpolation 1D**

Fonction de base 2D := **Produit tensoriel**
de 2 fonctions de base 1D

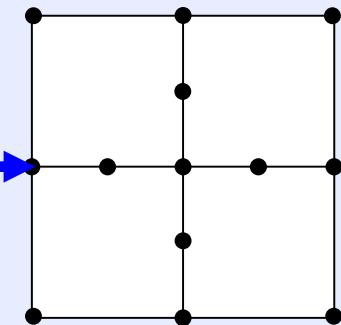


SPARSE GRIDS

- **Sélection** des produits tensoriels des **fonctions de base**: exemple $n=2$

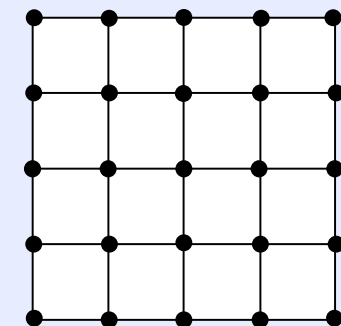


Sparse grid (2,2)



13
points

Grille pleine



25
points

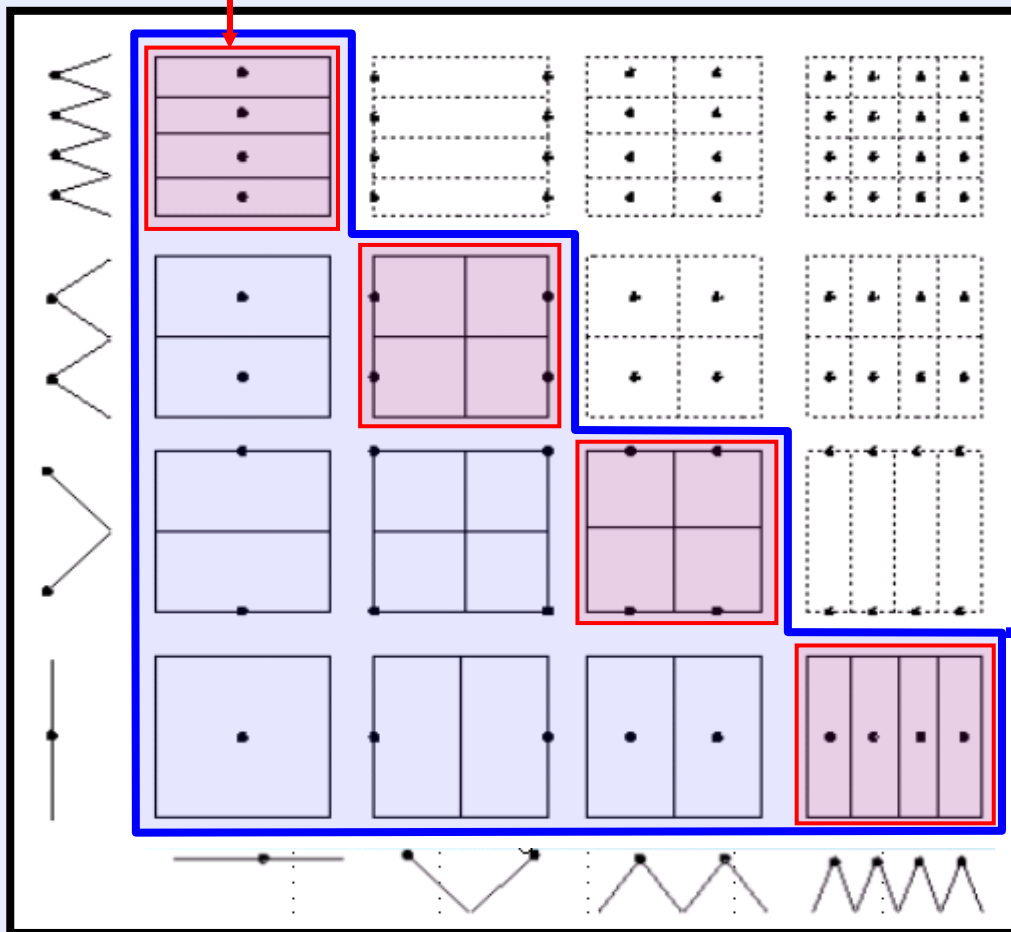
SPARSE GRIDS

➤ **Sélection** des produits tensoriels des **fonctions de base**: exemple $n=2$

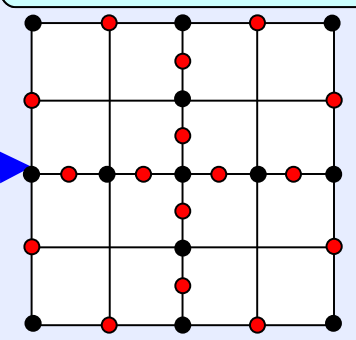
Ici, on **raffine** en **augmentant** d'un niveau dans chaque direction



On **écarte** les **fonctions de base** à support petit

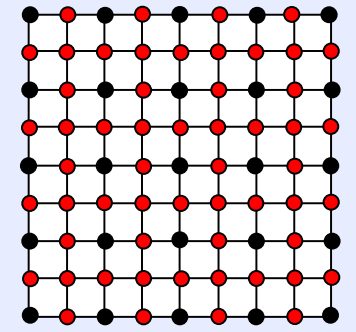


Sparse grid (3,3)



29 points

Grille pleine



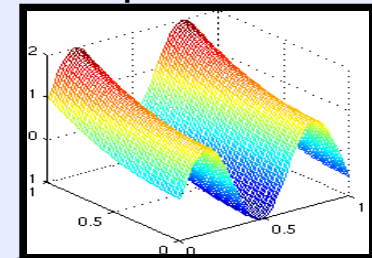
81 points

SPARSE GRIDS

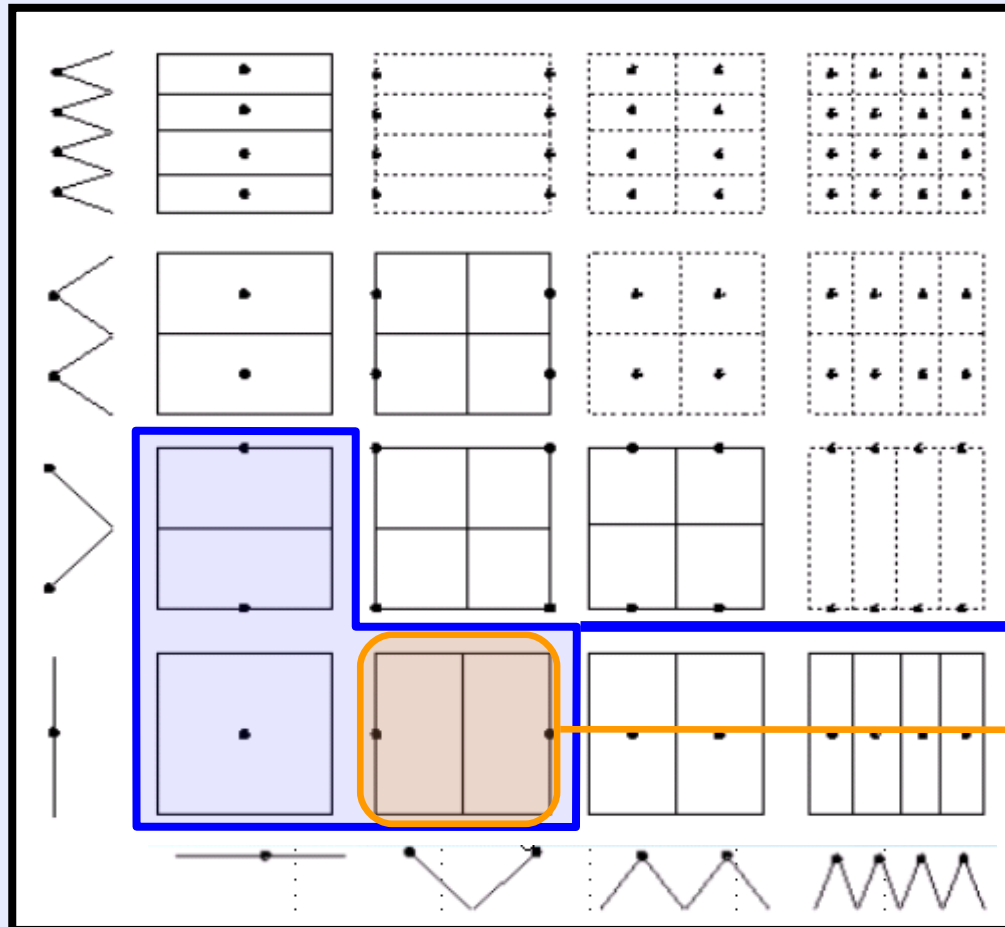
- **Sélection** des produits tensoriels des **fonctions de base**: exemple $n=2$

Mode adaptatif (Gernster-Griebel 2003)

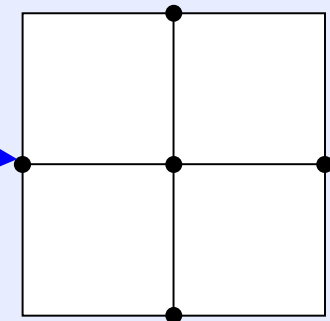
:= processus **itératif** qui **augmente les niveaux**
dans les **directions importantes** de manière **automatique**



Sparse grid (1,1)



Estimation d'erreur la plus grande
sur les **derniers niveaux atteints**

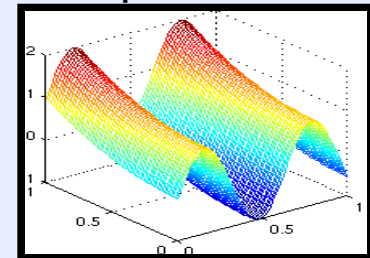


SPARSE GRIDS

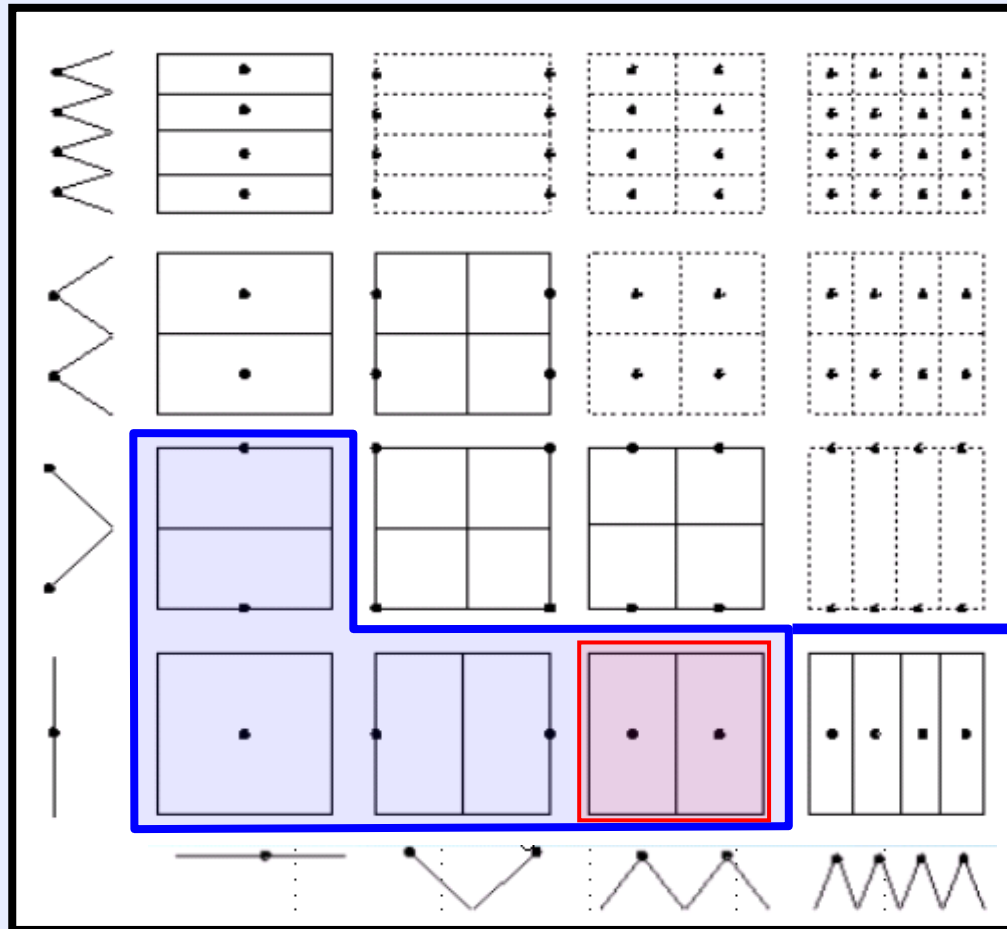
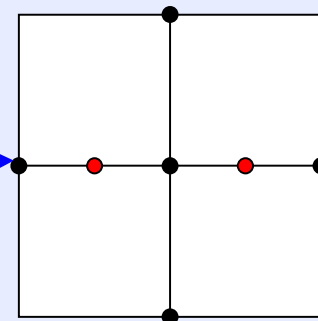
- **Sélection** des produits tensoriels des **fonctions de base**: exemple $n=2$

Mode adaptatif (Gernster-Griebel 2003)

:= processus **itératif** qui **augmente les niveaux**
dans les **directions importantes** de manière **automatique**



Sparse grid (1,2)

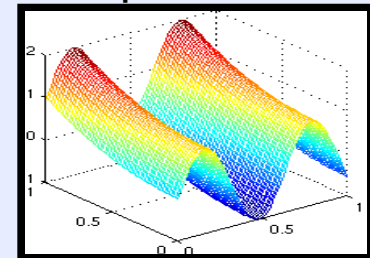


SPARSE GRIDS

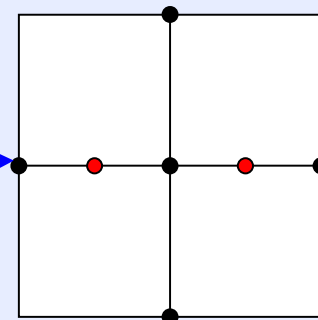
- **Sélection** des produits tensoriels des **fonctions de base**: exemple $n=2$

Mode adaptatif (Gernster-Griebel 2003)

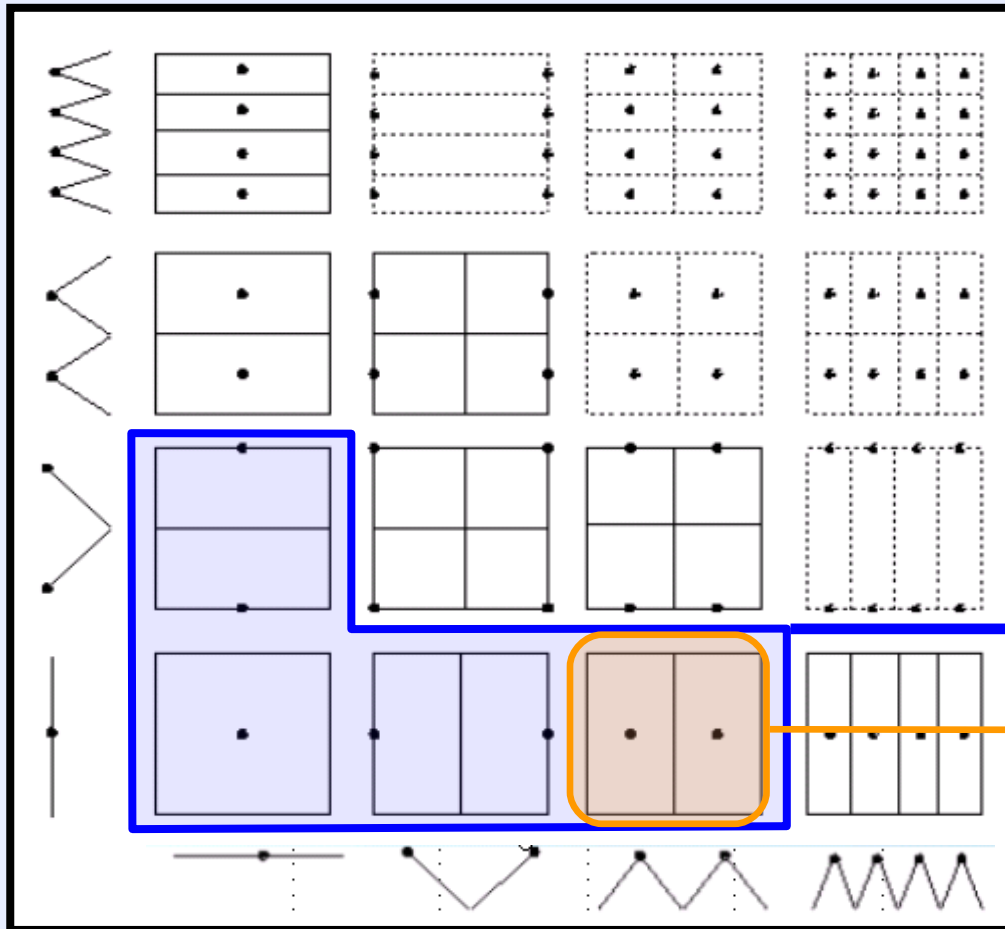
:= processus **itératif** qui **augmente les niveaux**
dans les **directions importantes** de manière **automatique**



Sparse grid (1,2)



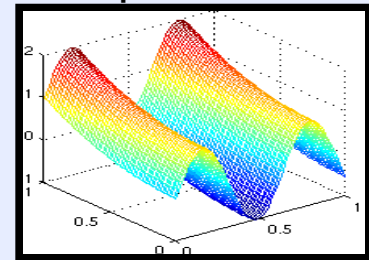
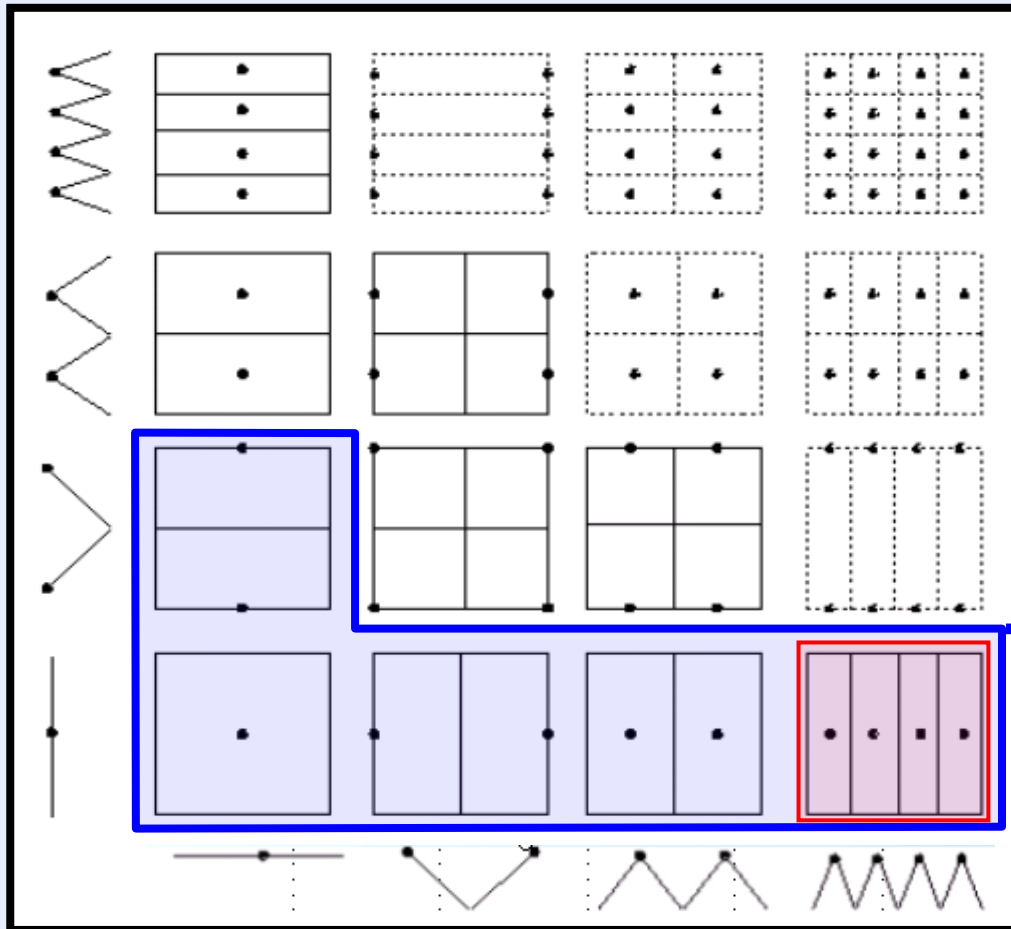
Estimation d'erreur la plus grande
sur les **derniers niveaux atteints**



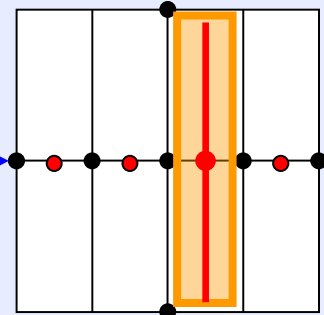
SPARSE GRIDS

➤ Sélection des produits tensoriels des **fonctions de base**: exemple $n=2$

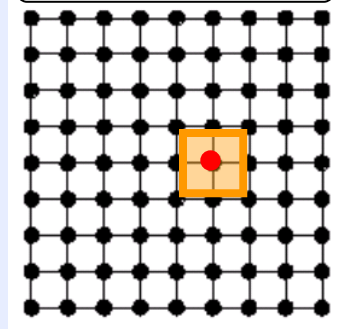
Fonctions de base **anisotropes**
 ➔ Gestion des **directions importantes**



Sparse grid (1,3)

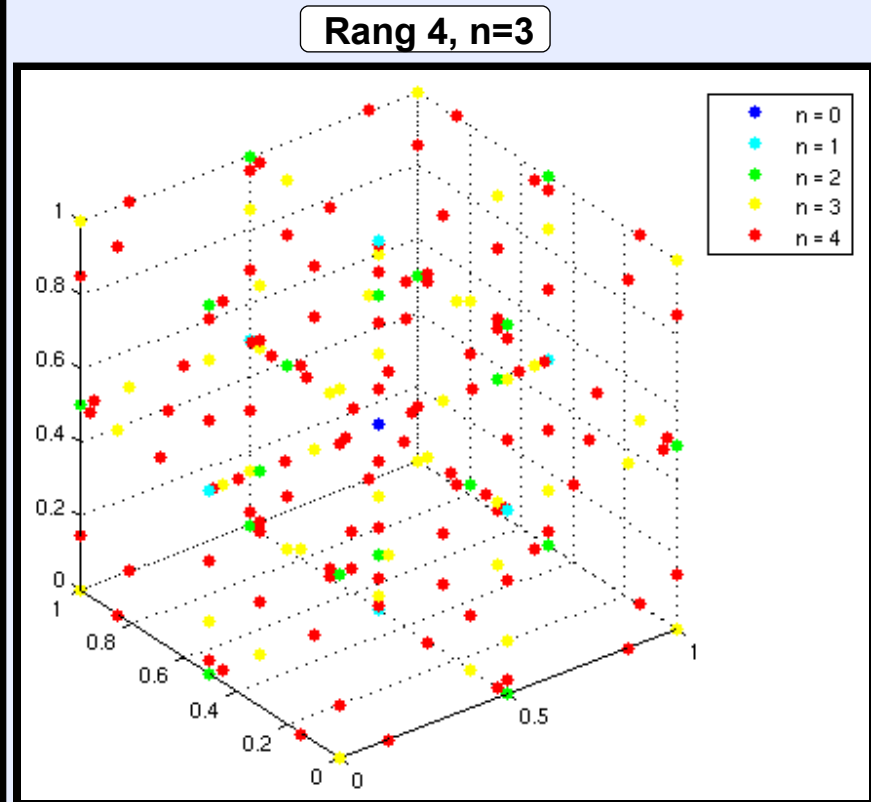
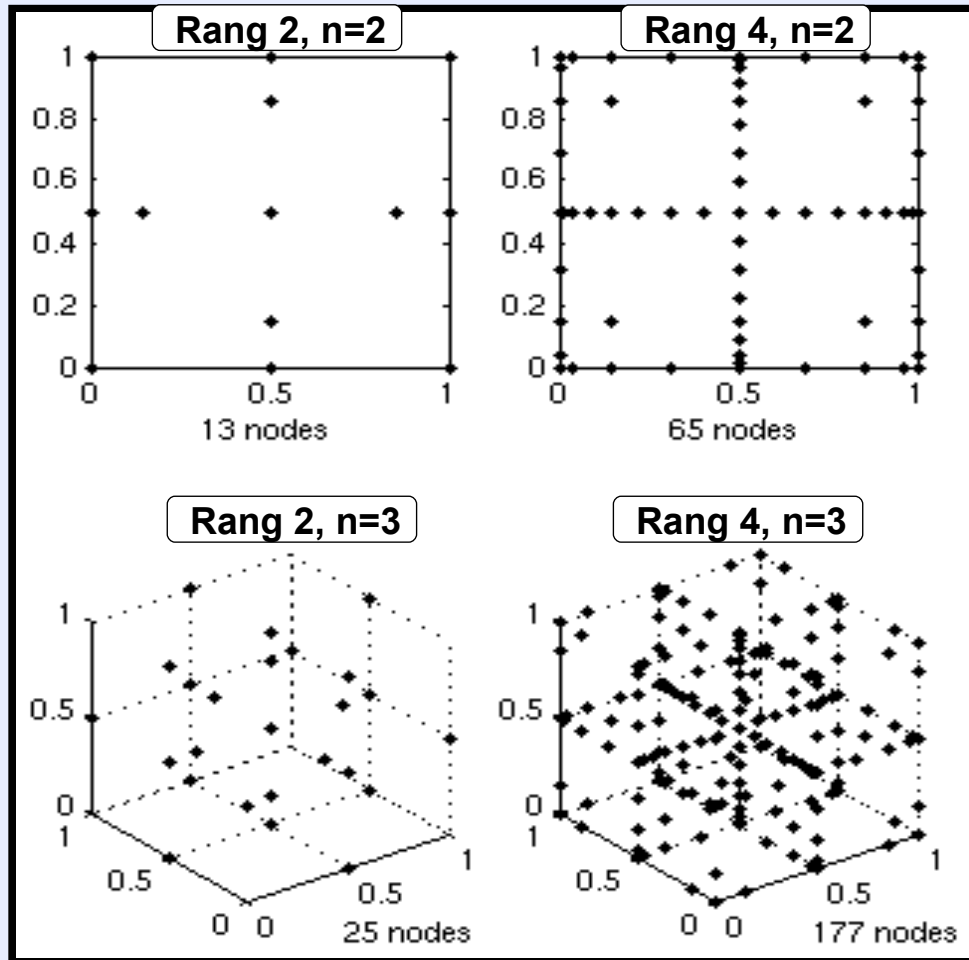


Grille pleine



SPARSE GRIDS

➤ Exemples de *sparse grids*



PLAN de l'exposé

I Etude de fiabilité d'une chaîne de calcul **II Conception d'une antenne spatiale**

1 Problèmes à résoudre

2 Méthode utilisée

3 Cas test à 9 paramètres

4 Cas test à 30 paramètres

5 Conclusion

1 Données du problème

2 Calcul des alimentations optimales

3 Optimisation topologique

4 Conclusion

Cas test à 9 PARAMETRES

➤ Scénario associé à la chaîne de calcul

Paramètre	Nom	Caractéristique	Intervalle de définition	Loi de probabilité
p_1	h-cnp	hauteur de canopée	[0 ;10]	Uniforme
p_2	cloud-cover	couverture nuageuse	[0 ;1]	Uniforme
p_3	wind-speed	vitesse du vent	[1 ;10]	Uniforme
p_4	wind-dir	direction du vent	[240 ;300]	Uniforme
p_5	z-rel	hauteur de rejet	[0 ;1]	Uniforme
p_6	c-mass	masse de produit	[10 ;300]	Uniforme
p_7	w-mom	vitesse de rejet	[200 ;800]	N(500,100)
p_8	buoy	température de rejet	[400 ;1000]	N(700,100)
p_9	sltrop	échelle de turbulence	[10 ;50]	N(30,7)

➤ Approximations utilisées

	Nombre de points de construction	Erreur de vérification (lot commun)
Réseau de neurones	500	0.12
Sparse grid mode adaptatif	100	0.11



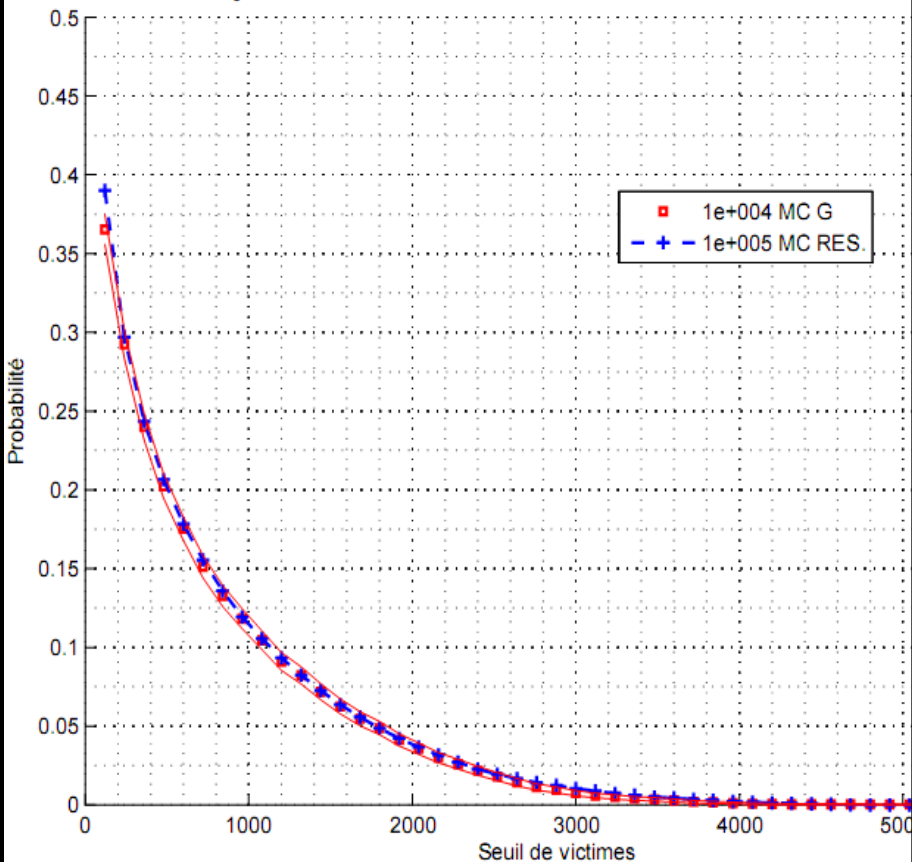
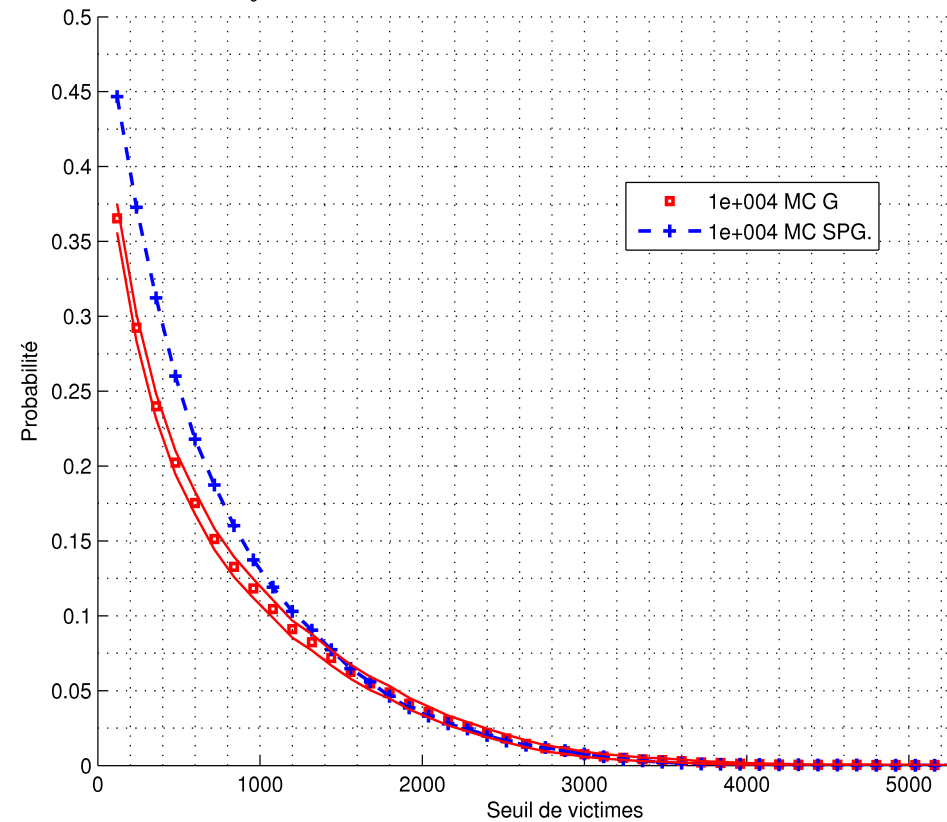
Pour une précision équivalente
la **sparse grid** présente **5 fois moins de points**

Cas test à 9 PARAMETRES

➤ **P₁** Probabilité de dépasser un seuil

Réseau de neurones à 500 points

Sparse grid à 100 points

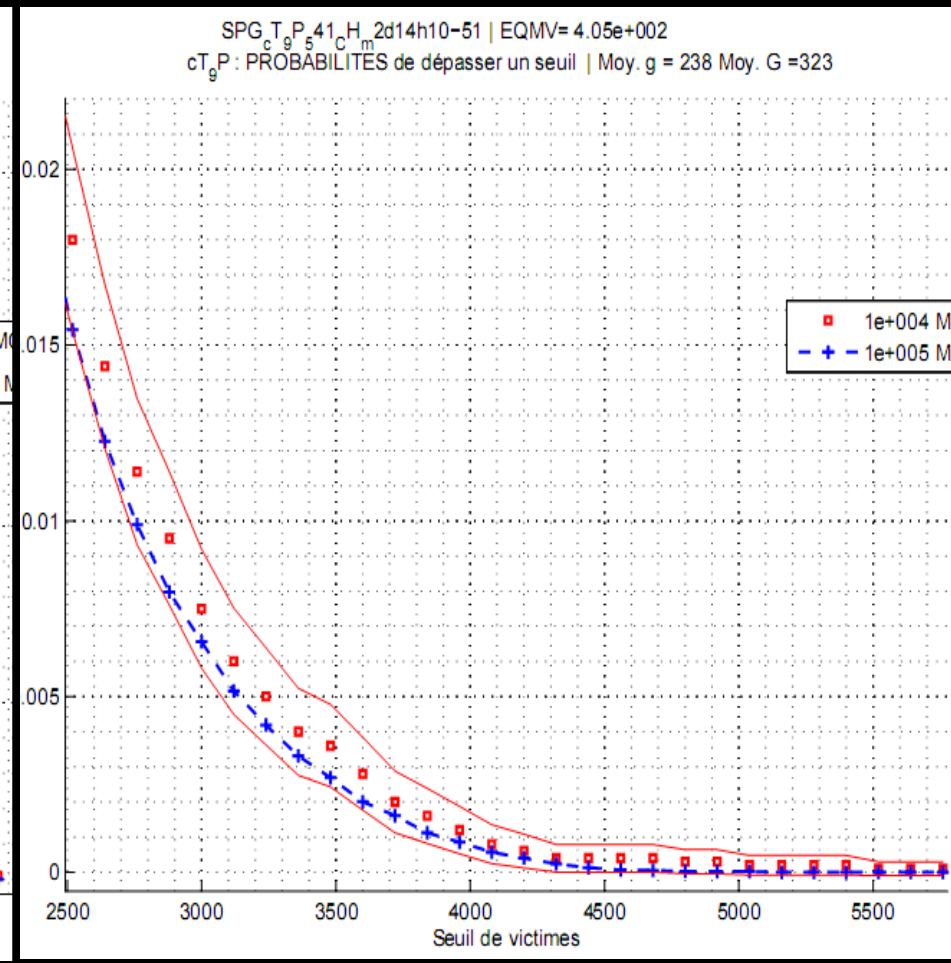
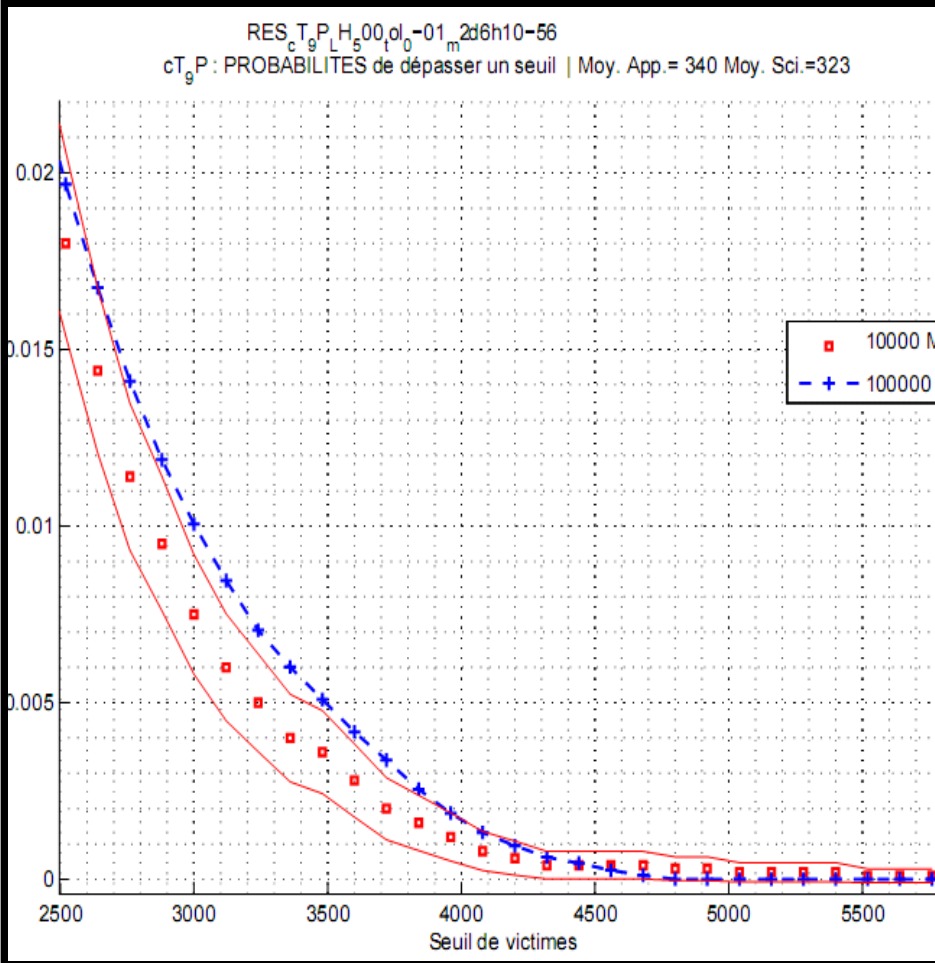
RES_{cT_gP₁H₅o_lo₀-01_m} 2d6h10-56 | EQMA= 1.71e+002 EQMV= 3.71e+002
cT_gP₁: PROBABILITES de dépasser un seuil | Moy. g = 340 Moy. G = 323SPG_{cT_gP₁o₀C_Hm} 2d14h10-29 | EQMV= 1.10e-001
cT_gP₁: PROBABILITES de dépasser un seuil | Moy. g = 217 Moy. G = 323

Cas test à 9 PARAMETRES

➤ **P₁** Probabilité de dépasser un seuil: **probabilités faibles**

Réseau de neurones à 500 points

Sparse grid à 100 points



Cas test à 9 PARAMETRES

➤ **P₂** Point de conception pour **s=50** (lois gaussiennes)

Réseau de neurones à 500 points

Sparse grid à 100 points

Résidus fonction coût:

8e+000 8e+000 8e+000 8e+000 8e+000

COORDONNEES des points de CONCEPTION P*:

	P*1	P*2	P*3	P*4	P*5
p_1	4.92	4.92	4.92	4.92	4.92
p_2	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57
p_3	3.65	3.65	3.65	3.65	3.65
p_4	253.33	253.34	253.33	253.33	253.33
p_5	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56
p_6	141.19	141.23	141.19	141.17	141.19
p_7	488.75	489.81	488.75	488.27	488.75
p_8	692.23	692.14	692.23	692.26	692.23
p_9	29.32	29.32	29.32	29.32	29.32

g(P*) = 50 50 50 50 50
 G(P*) = 53 77 53 63 53

Succès optim.: 100%

Résidus fonction coût:

1e+000 3e+000 1e+000 1e+000 1e+000

COORDONNEES des points de CONCEPTION P*:

	P*1	P*2	P*3	P*4	P*5
p_1	5.57	5.97	5.57	5.57	5.57
p_2	0.54	0.53	0.54	0.54	0.54
p_3	5.53	5.71	5.53	5.53	5.53
p_4	262.75	280.18	262.75	262.75	262.75
p_5	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
p_6	133.65	120.40	133.66	133.65	133.66
p_7	502.42	504.97	502.62	502.50	502.84
p_8	697.94	696.72	697.97	698.05	698.49
p_9	29.73	29.51	29.73	29.73	29.73

g(P*) = 50 50 50 50 50
 G(P*) = 140 129 140 140 140

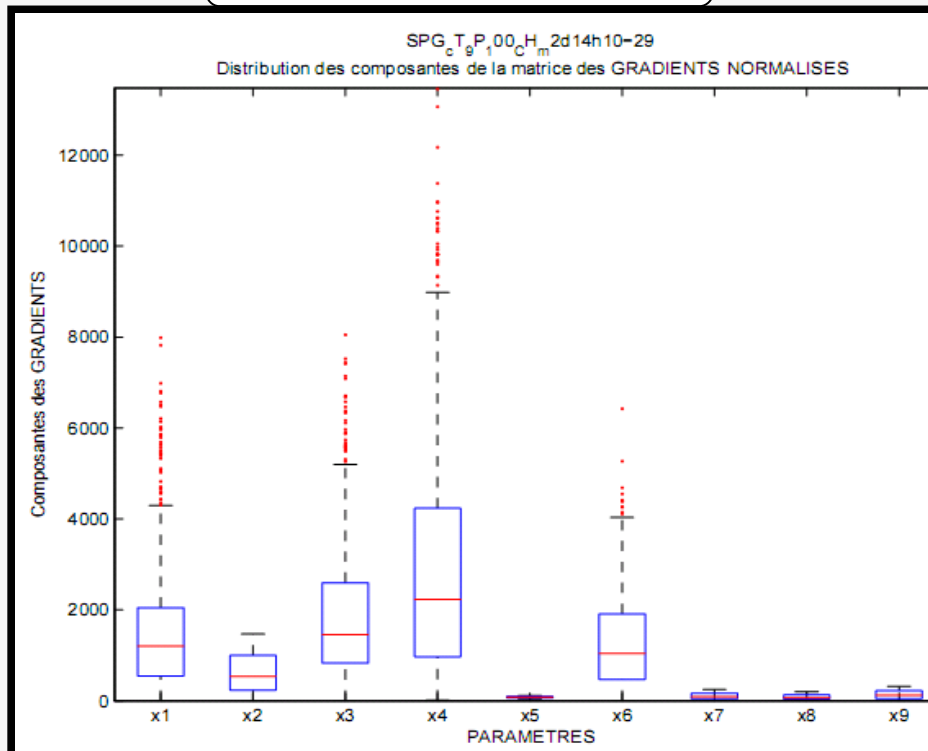
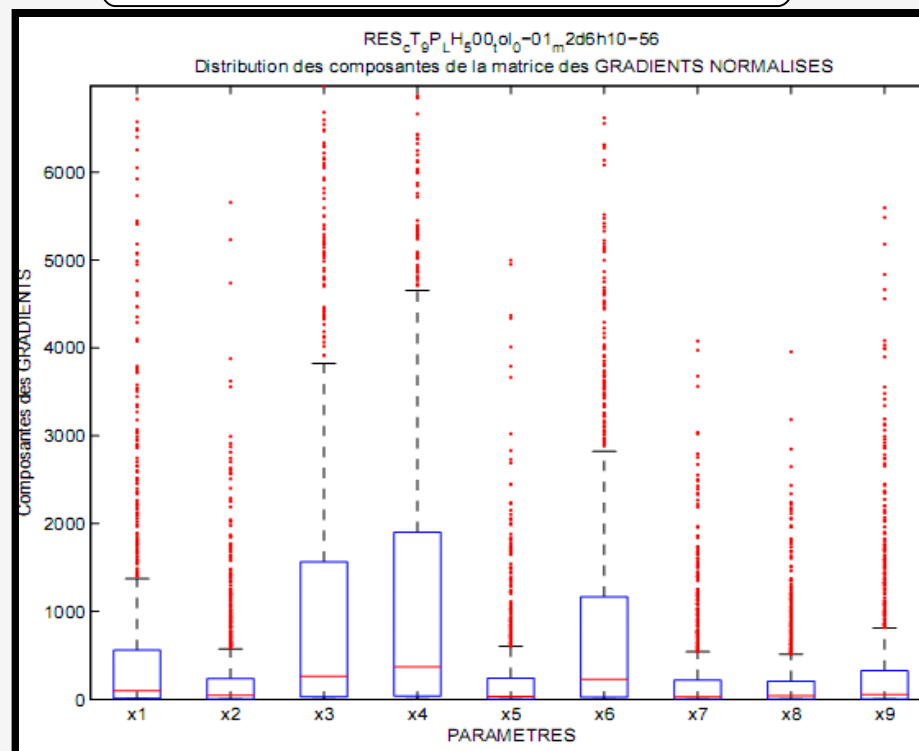
Succès optim.: 71%

Cas test à 9 PARAMETRES

P₃ Classement des paramètres influents

Réseau de neurones à 500 points

Sparse grid à 100 points



Paramètres		
principaux	secondaires	négligeables
p_4 direction du vent	p_6 masse de produit	p_9 échelle de turbulence
p_3 vitesse du vent	p_1 hauteur de canopée	p_5 hauteur de rejet
		p_2 couverture nuageuse
		p_7 vitesse de rejet
		p_8 température de rejet

Paramètres		
principaux	secondaires	négligeables
p_4 direction du vent	p_3 vitesse du vent	p_9 échelle de turbulence
	p_6 masse de produit	p_5 hauteur de rejet
	p_1 hauteur de canopée	p_2 couverture nuageuse
		p_7 vitesse de rejet
		p_8 température de rejet

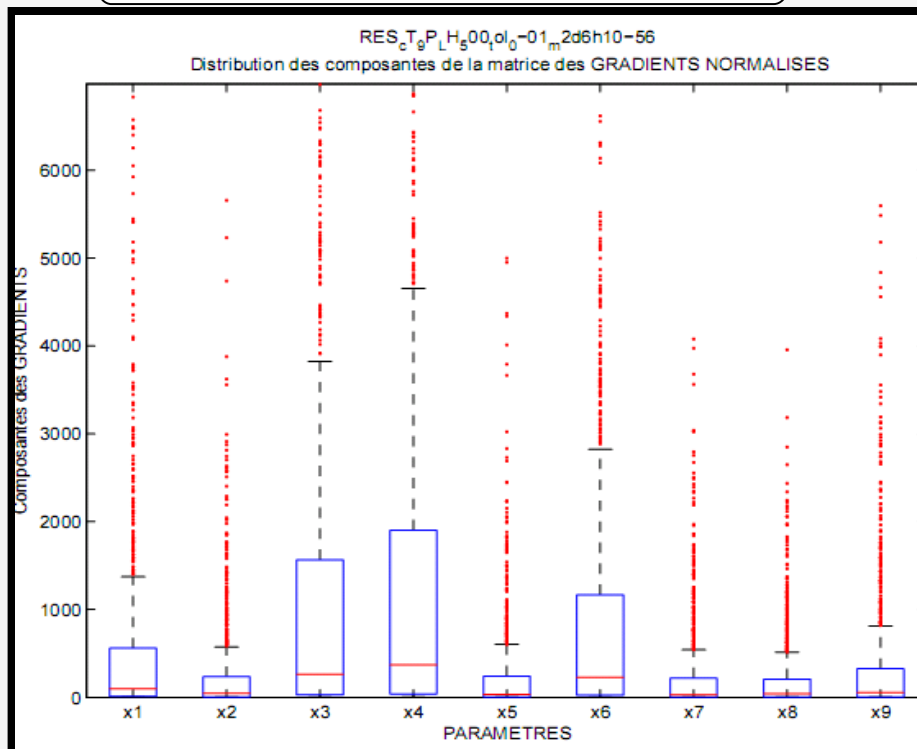
Résultats cohérents



Cas test à 9 PARAMETRES

➤ **P₃** Classement des paramètres influents

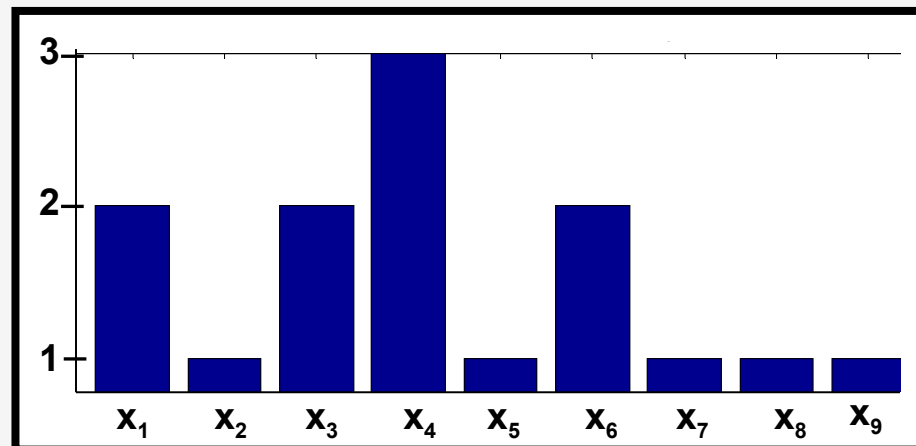
Réseau de neurones à 500 points



Paramètres		
principaux	secondaires	négligeables
p_4 direction du vent	p_6 masse de produit	p_9 échelle de turbulence
p_3 vitesse du vent	p_1 hauteur de canopée	p_5 hauteur de rejet
		p_2 couverture nuageuse
		p_7 vitesse de rejet
		p_8 température de rejet

Sparse grid à 100 points

Niveaux du mode adaptatif dans chaque direction



Paramètres		
principaux	secondaires	négligeables
p_4 direction du vent	p_3 vitesse du vent	p_9 échelle de turbulence
	p_6 masse de produit	p_5 hauteur de rejet
	p_1 hauteur de canopée	p_2 couverture nuageuse
		p_7 vitesse de rejet
		p_8 température de rejet

Résultats cohérents

PLAN de l'exposé

I Etude de fiabilité d'une chaîne de calcul **II Conception d'une antenne spatiale**

1 Problèmes à résoudre

2 Méthode utilisée

3 Cas test à 9 paramètres

4 Cas test à 30 paramètres

5 Conclusion

1 Données du problème

2 Calcul des alimentations optimales

3 Optimisation topologique

4 Conclusion

Cas test à 30 PARAMETRES

➤ Scénario associé à la chaîne de calcul

Paramètre	Nom	Intervalle de définition	Loi de probabilité
p_1	Zrel	[0.5 ; 10]	Uniforme
p_2	Cmass	[10 ; 100]	Uniforme
p_3	Size	[5 ; 10]	Uniforme
p_4	Tdur	$[5 \cdot 10^{-4} ; 0.001]$	Uniforme
p_5	Winom	[5 ; 50]	Uniforme
p_6	Buoy	[20 ; 500]	Uniforme
p_7	Uu-ensm	[0 ; 50]	Uniforme
p_8	Zimin	[30 ; 70]	N(50,5)
p_9	Zimax	[500 ; 1500]	N(1000,150)
p_{10}	Hconst	[0 ; 10]	N(5,1)
p_{11}	Hdiur	[30 ; 70]	N(50,5)
p_{12}	Hcnp	[0 ; 15]	N(7,2)
p_{13}	Albedo	[0 ; 1]	N(0.16,0.05)
p_{14}	Bowen	[0 ; 1]	N(0.6,0.1)
p_{15}	Cloud-cover	[0 ; 1]	Uniforme

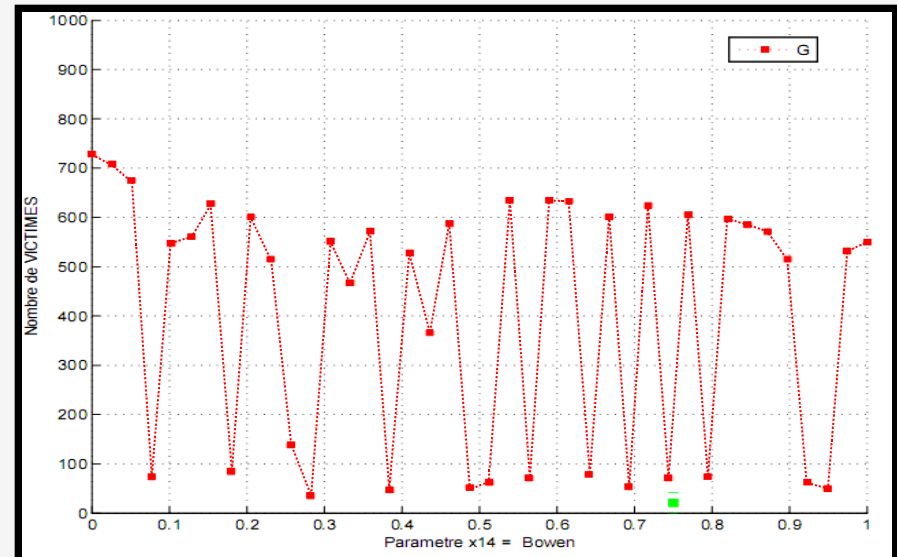
p_{16}	Alpha-max	[0.5 ; 2]	N(1,0.15)
p_{17}	Alpha-min	$[10^{-4} ; 0.01]$	N(0.001, $3 \cdot 10^{-4}$)
p_{18}	Ac-eps	[0.001 ; 0.1]	N(0.01, 0.003)
p_{19}	P-eps	$[10^{-6} ; 10^{-4}]$	N(10^{-5} , $3 \cdot 10^{-6}$)
p_{20}	Tbin-met	[600 ; 36000]	Uniforme
p_{21}	Cmin	[0 ; 10]	N(2,0.6)
p_{22}	Delmin	[0 ; 5]	Uniforme
p_{23}	Wwtrop	[0.001 ; 0.1]	N(0.01, 0.003)
p_{24}	Epstrop	$[10^{-5} ; 0.001]$	N($4 \cdot 10^{-4}$, 10^{-4})
p_{25}	Sltrop	[5 ; 20]	N(10,1.5)
p_{26}	Uu-calm	[0.2 ; 0.3]	N(0.25, 0.01)
p_{27}	Sl-calm	[500 ; 1500]	N(1000, 150)
p_{28}	Grdmin	[0 ; 2]	N(0.25, 0.07)
p_{29}	Z-dosage	[0.8 ; 2]	N(1.5, 0.15)
p_{30}	Density	[1 ; 7]	N(3, 0.6)

➤ Réseau de neurones impraticable



Approximations *sparse grids*
en mode adaptatif

➤ Chaîne de calcul trop bruitée

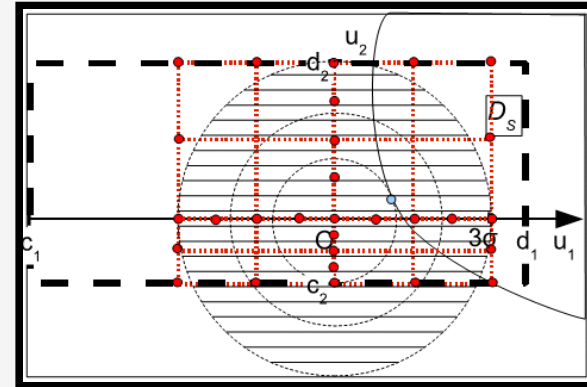
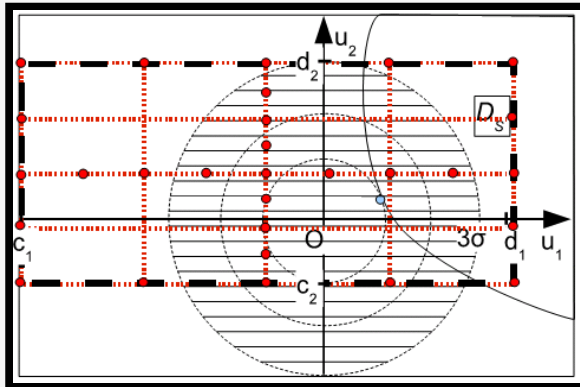


Cas test à 30 PARAMETRES

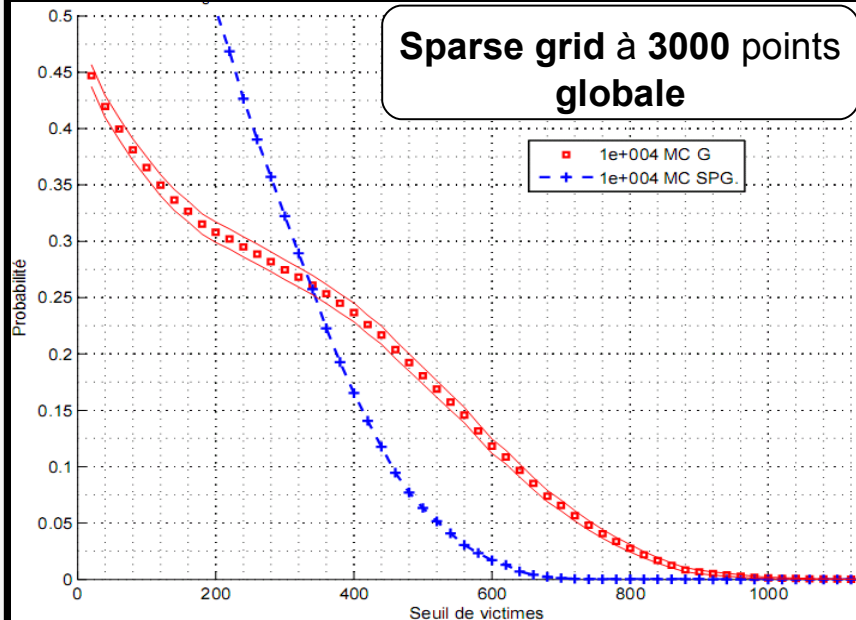
➤ **P₁** Probabilité de dépasser un seuil

**Amélioration par changement de variable
autour du point nominal**

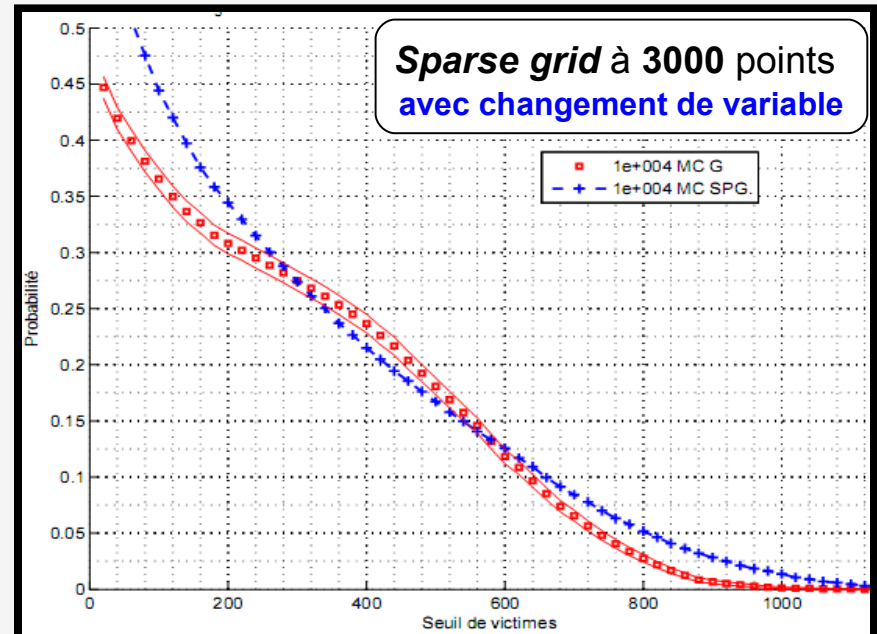
➔ **Déplacement des points de grille**



**Sparse grid à 3000 points
globale**



**Sparse grid à 3000 points
avec changement de variable**



Cas test à 30 PARAMETRES

➤ Nouveau scénario

Paramètre	Intervalle de définition	Loi de probabilité
p_1	[-10;10]	N(3,3)
p_2	[-10;10]	N(3,3)
p_3	[-10;10]	N(3,3)
p_4	[-10;10]	N(3,3)
p_5	[-10;10]	N(3,3)
p_6	[-10;10]	N(3,3)
p_7	[-10;10]	N(3,3)
p_8	[-10;10]	N(3,3)
p_9	[-10;10]	N(3,3)
p_{10}	[-10;10]	N(3,3)
p_{11}	[-10;10]	N(6,1)
p_{12}	[-10;10]	N(6,1)
p_{13}	[-10;10]	N(6,1)
p_{14}	[-10;10]	N(6,1)
p_{15}	[-10;10]	N(6,1)
p_{16}	[-10;10]	N(6,1)
p_{17}	[-10;10]	N(6,1)
p_{18}	[-10;10]	N(6,1)
p_{19}	[-10;10]	N(6,1)
p_{20}	[-10;10]	N(6,1)
p_{21}	[-10;10]	N(-3,0.5)
p_{22}	[-10;10]	N(-3,0.5)
p_{23}	[-10;10]	N(-3,0.5)
p_{24}	[-10;10]	N(-3,0.5)
p_{25}	[-10;10]	N(-3,0.5)
p_{26}	[-10;10]	N(-3,0.5)
p_{27}	[-10;10]	N(-3,0.5)
p_{28}	[-10;10]	N(-3,0.5)
p_{29}	[-10;10]	N(-3,0.5)
p_{30}	[-10;10]	N(-3,0.5)

➤ Fonction de modélisation analytique

$$Gt : [-10, 10]^{30} \rightarrow \mathbb{R}^+$$

$$X \rightarrow \left[- \sum_{i \in \mathbf{I}} (x_i - 6)^2 + 30 \sqrt{\sum_{i \in \mathbf{J}} |x_i - 6|} + b \right]^+$$

$$\mathbf{I} = \boxed{1 \text{ à } 3 \text{ et } 25 \text{ à } 30} \rightarrow \text{Param. importants}$$

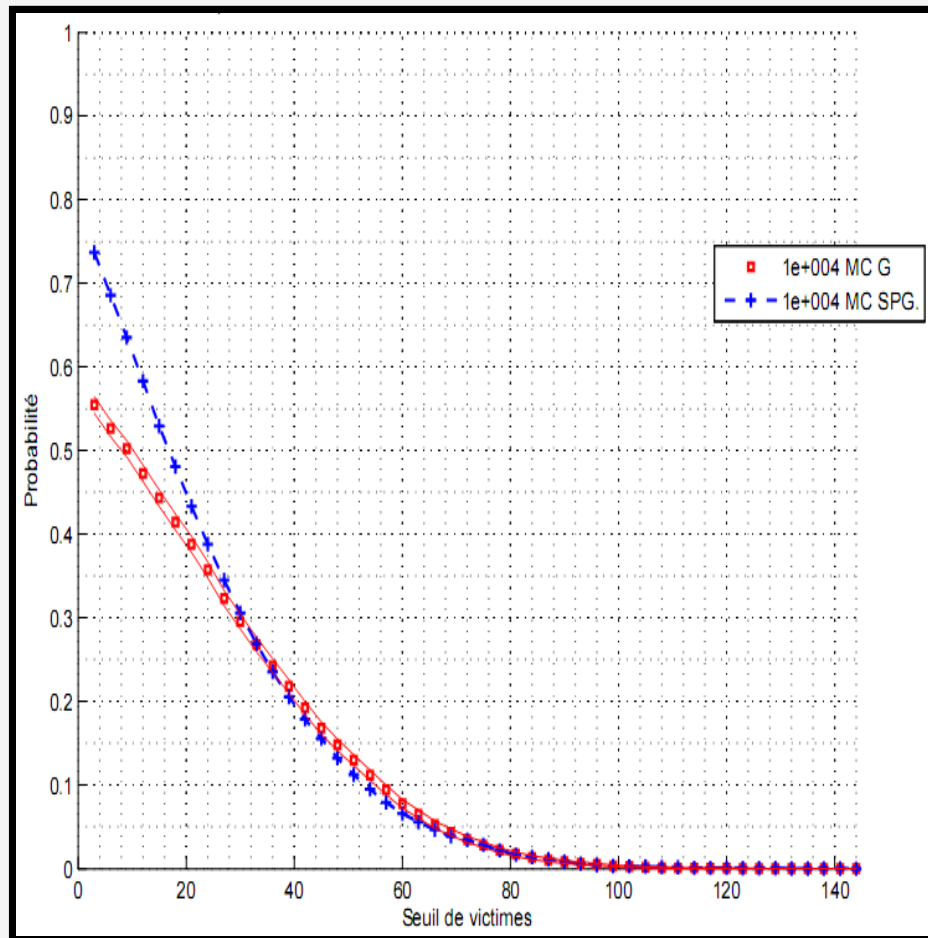
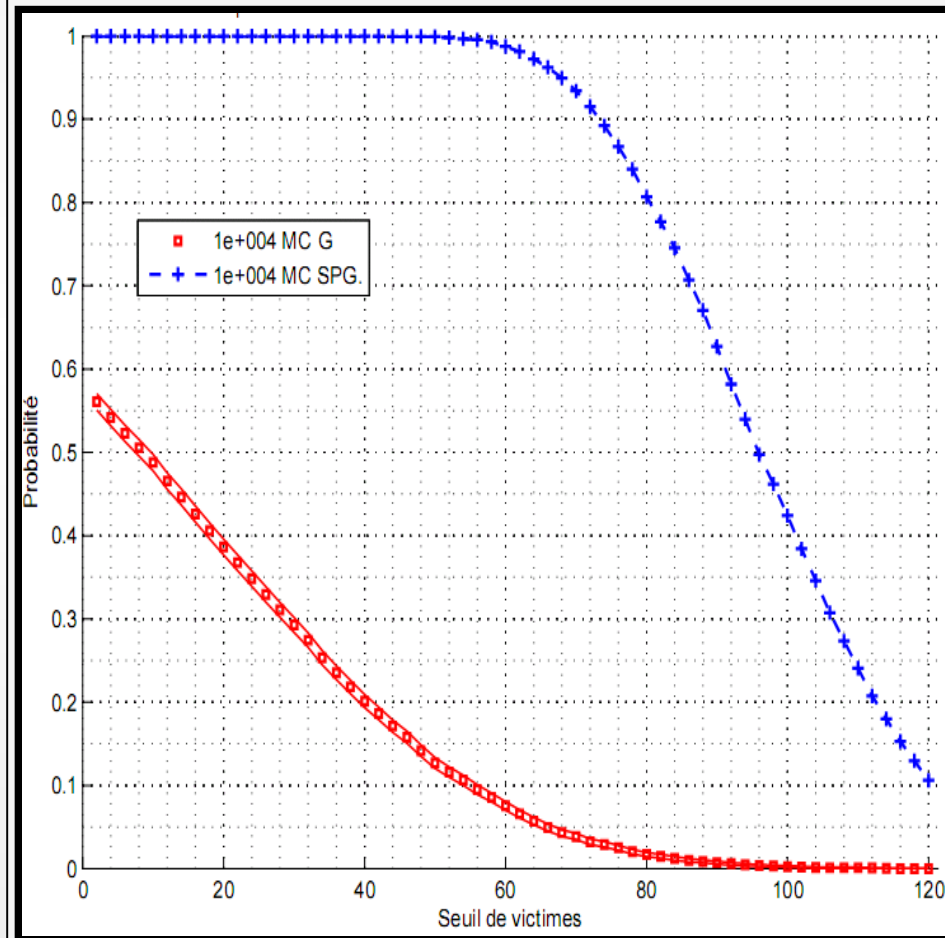
$$\mathbf{J} = \boxed{4 \text{ à } 6 \text{ et } 15 \text{ à } 24} \rightarrow \text{Param. secondaires}$$

Cas test à 30 PARAMETRES

➤ **P₁** Probabilité de dépasser un seuil

Sparse grid à 500 points globale

Sparse grid à 300 points
avec changement de variable



Cas test à 30 PARAMETRES

➤ **P₂** Point de conception pour **s=60**

Sparse grid à 300 points
avec changement de variable

Sparse grid à 100 points
avec changement de variable sur **P₁^{*}**

Résidus fonction coût:			
	2.04	2.04	2.04
COORDONNEES des P* de CONCEPT			
	P*1	P*2	P*3
p_1	3.94	3.94	3.94
p_2	3.26	3.26	3.26
p_3	3.26	3.26	3.26
p_4	2.78	2.78	2.78
p_5	2.78	2.78	2.78
p_6	2.78	2.78	2.78
p_7	3.00	3.00	3.00
p_8	3.00	3.00	3.00
p_9	3.00	3.00	3.00
p_10	3.00	3.00	3.00
p_11	6.00	6.00	6.00
p_12	6.00	6.00	6.00
p_13	6.00	6.00	6.00
p_14	6.00	6.00	6.00
p_15	6.00	6.00	6.00
p_16	6.00	6.00	6.00
p_17	6.00	6.00	6.00
p_18	6.00	6.00	6.00
p_19	6.00	6.00	6.00
p_20	6.00	6.00	6.00
p_21	-3.03	-3.03	-3.03
p_22	-3.03	-3.03	-3.03
p_23	-3.03	-3.03	-3.03
p_24	-3.03	-3.03	-3.03
p_25	-2.73	-2.73	-2.73
p_26	-2.73	-2.73	-2.73
p_27	-2.73	-2.73	-2.73
p_28	-2.73	-2.73	-2.73
p_29	-2.73	-2.73	-2.73
p_30	-2.73	-2.73	-2.73
g(P*)=	60	60	60
G(P*)=	56.30	56.30	56.30
Succès optim.:		100	

Résidus fonction coût:			
	1.98	1.98	1.98
COORDONNEES des P* de CONCEPT			
	P*1	P*2	P*3
p_1	3.95	3.95	3.95
p_2	3.98	3.98	3.98
p_3	3.98	3.98	3.98
p_4	2.77	2.77	2.77
p_5	2.77	2.77	2.77
p_6	2.77	2.77	2.77
p_7	3.00	3.00	3.00
p_8	3.00	3.00	3.00
p_9	3.00	3.00	3.00
p_10	3.00	3.00	3.00
p_11	6.00	6.00	6.00
p_12	6.00	6.00	6.00
p_13	6.00	6.00	6.00
p_14	6.00	6.00	6.00
p_15	6.00	6.00	6.00
p_16	6.00	6.00	6.00
p_17	6.00	6.00	6.00
p_18	6.00	6.00	6.00
p_19	6.00	6.00	6.00
p_20	6.00	6.00	6.00
p_21	-3.03	-3.03	-3.03
p_22	-3.03	-3.03	-3.03
p_23	-3.03	-3.03	-3.03
p_24	-3.03	-3.03	-3.03
p_25	-2.78	-2.78	-2.78
p_26	-2.78	-2.78	-2.78
p_27	-2.78	-2.78	-2.78
p_28	-2.76	-2.76	-2.76
p_29	-2.78	-2.78	-2.78
p_30	-2.76	-2.76	-2.76
g(P*)=	60	60	60
G(P*)=	58.71	58.71	58.71
Succès optim.:		100	

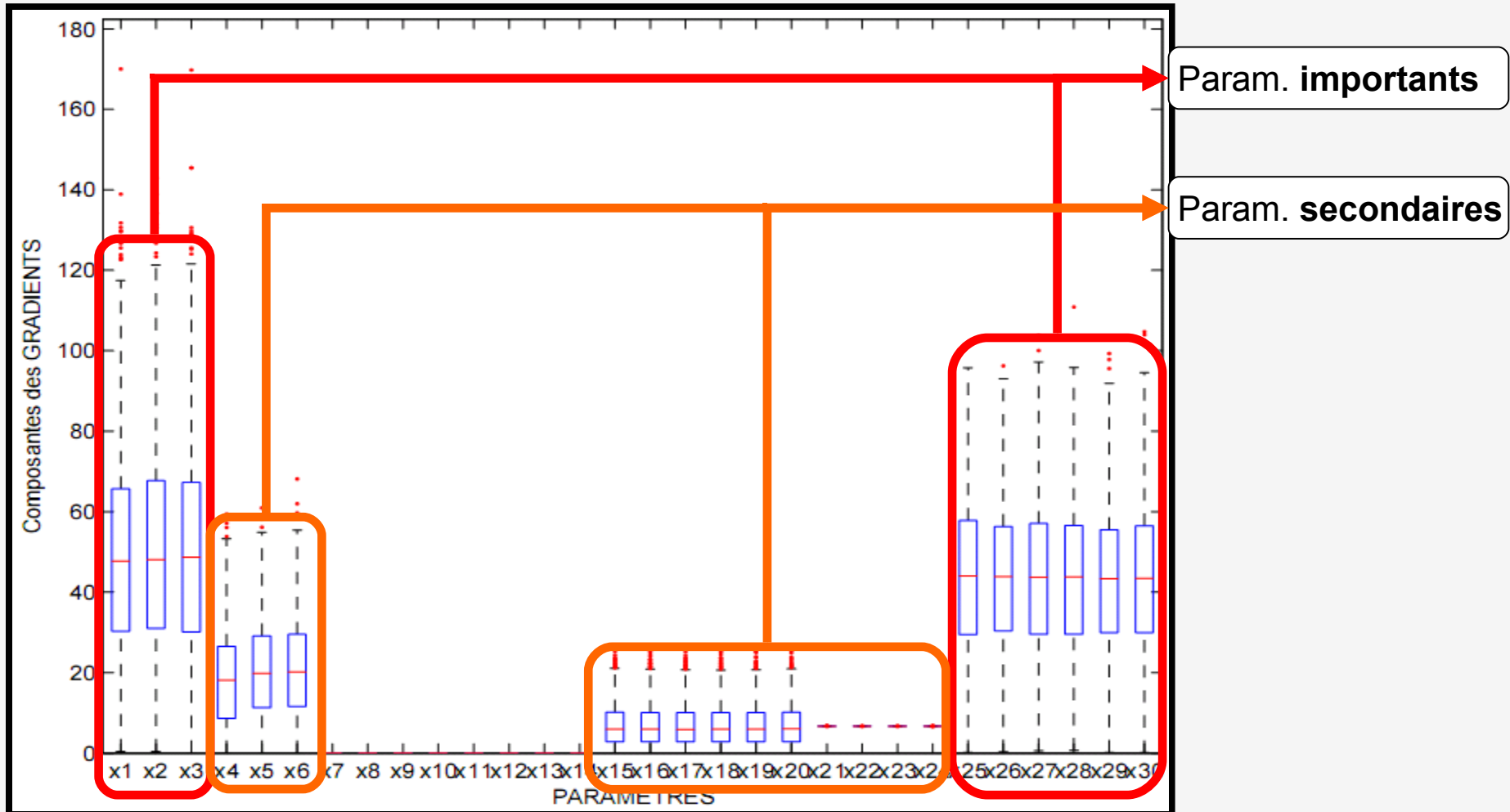
Amélioration par approximations successives

Convergence

Cas test à 30 PARAMETRES

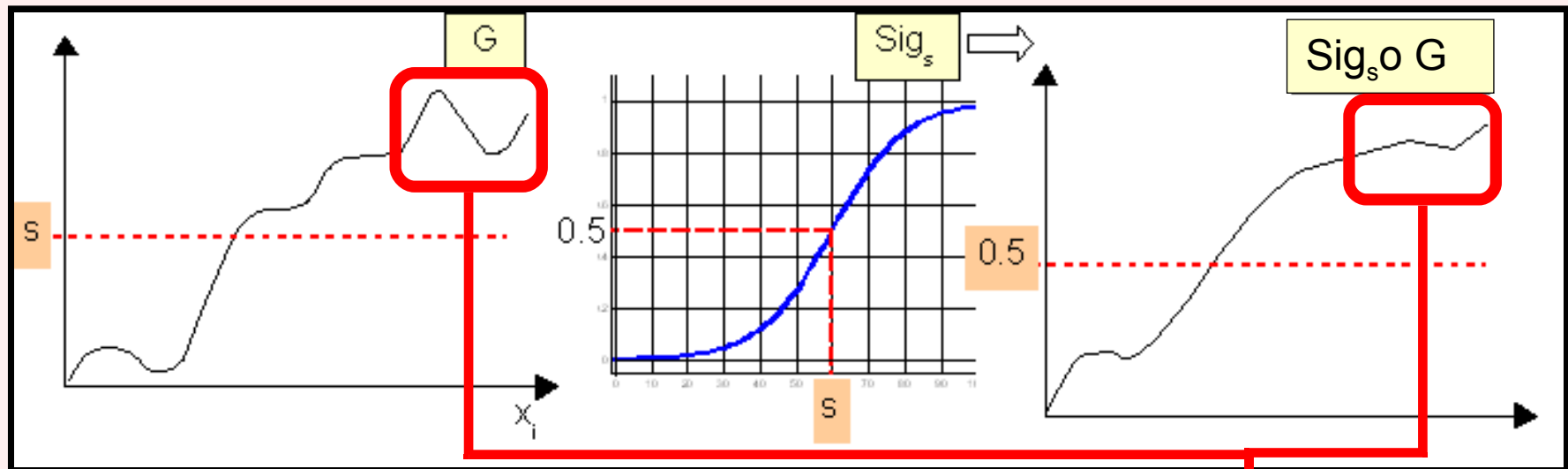
➤ **P₃** Classement des paramètres influents

Sparse grid à 300 points avec changement de variable



P₁ IDÉE CLE: SEUILLAGE des données

- Pour améliorer le calcul de probabilités pour un seuil s donné
 - Appliquer une **sigmoïde Sig_s** à la sortie de manière à **séparer** les valeurs $G(X)$ de part et d'autre de s
 - Calculer la **probabilité** avec **l'approximation de $\text{Sig}_s \circ G$**



**Fonction lissée
plus simple à approcher**

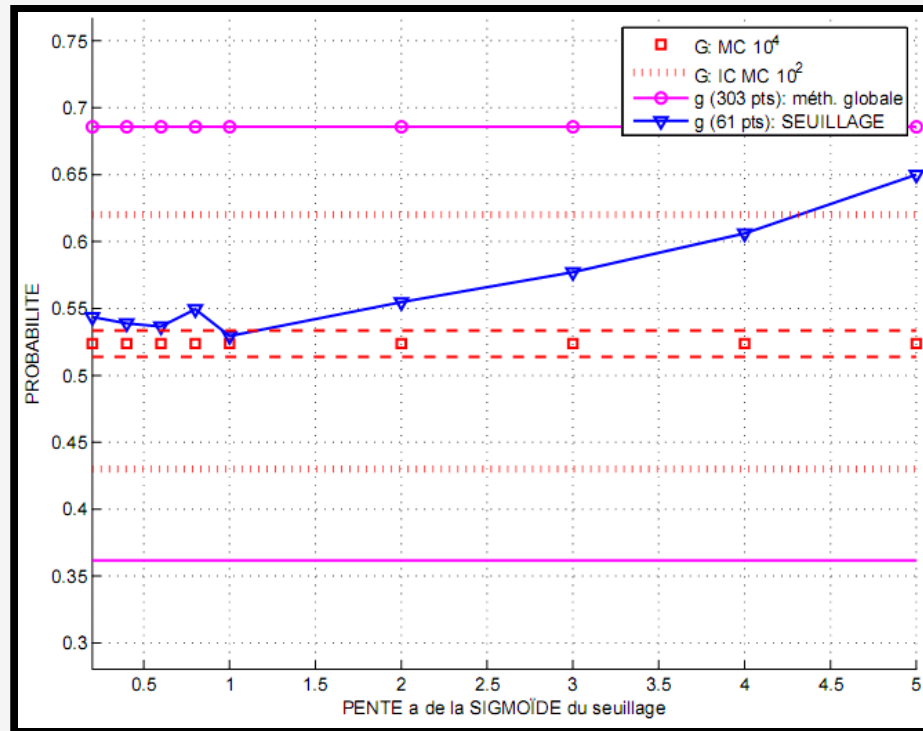
Cas test à 30 PARAMETRES

➤ **P₁** Probabilité de dépasser un seuil

Seuillage des données: résultats en fonction de la pente de la sigmoïde

s = 6

Sparse grid à 60 points avec seuillage



➔ Pour un **seuil donné** **Amélioration** par rapport à l'approximation globale pour un **coût inférieur**

PLAN de l'exposé

I Etude de fiabilité d'une chaîne de calcul **II Conception d'une antenne spatiale****1** Problèmes à résoudre**2** Méthode utilisée**3** Cas test à 9 paramètres**4** Cas test à 30 paramètres**5** Conclusion**1** Données du problème**2** Calcul des alimentations optimales**3** Optimisation topologique**4** Conclusion

ETUDE de FIABILITE

➤ Difficultés

- Le modèle **G** est de type boîte noire, coûteux et bruité

➔ **Gradient non disponible**

- Etude en **grande dimension**

➤ Idées clés

- **Modèle de substitution** pour résoudre les 3 problèmes de fiabilité à la fois

➔ **Approximation g** ➤ Evaluation **non coûteuse**

➤ **Avec gradient**

- **Méthode hiérarchique et adaptative** ➔ **Sparse grids**

ETUDE de FIABILITE

➤ **Résultats** P_1 Probabilités P_2 Point de conception P_3 Paramètres influents

➤ **Cas test à 9 paramètres avec code de calcul**

Approximation	Réseau de neurones	<i>Sparse grid</i>
Coût	500	100

➤ **Cas test à 30 paramètres avec fonction analytique**

Idées clés	<i>Sparse grid</i> avec changement de variable	Approximations successives	Seuillage
Coût	300	⊕ 100	~100 par seuil
Problèmes	P_1 P_2 P_3	P_2	P_1



Etude complète effectuée à un coût réduit

➤ Dans le cadre d'un contrat avec le **CEG/DGA**

➤ Livraison d'un **logiciel d'analyse de risques CEGAP** (en développement)

➤ **En cours**

➤ Les *sparse grids* sont une technique **émergente très prometteuse** en **grande dim.**

➤ **Améliorations** → **Régularisation** • **Reprise** sur un **sous-domaine**
Changement de variable sur **lois gaussiennes**

PLAN de l'exposé

I Etude de fiabilité d'une chaîne de calcul (collaboration avec CEG / DGA)

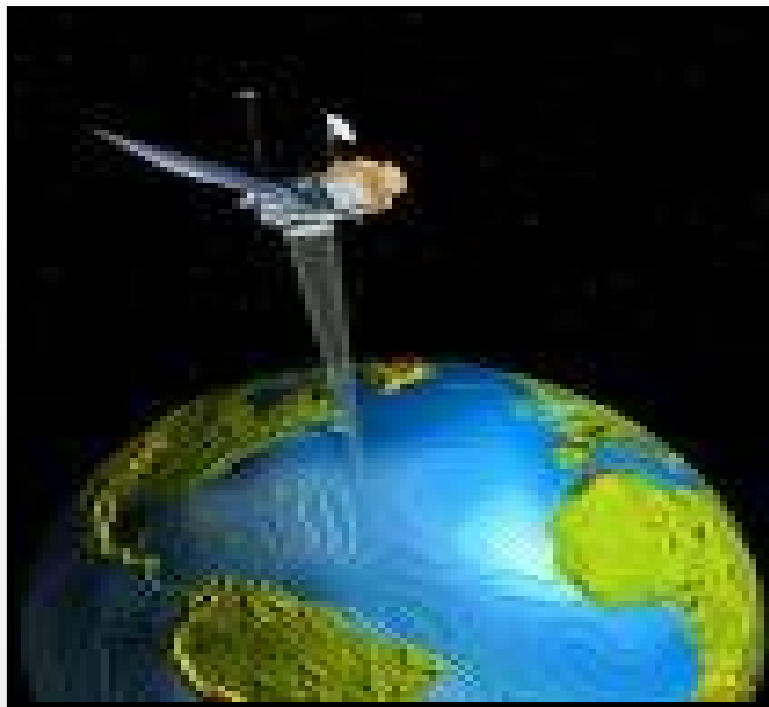
- 1** Problèmes à résoudre
- 2** Méthode utilisée
- 3** Cas test à 9 paramètres
- 4** Cas test à 30 paramètres
- 5** Conclusion

II Conception d'une antenne spatiale (collaboration avec Thalès Alenia Space)

- 1** Données du problème
- 2** Calcul des alimentations optimales
- 3** Optimisation topologique
- 4** Conclusion

CONTEXTE

- Etude menée dans le cadre du **projet OTOP** sélectionné par l'**ANR**
- ✚ Partenaires: **Thalès Alenia Space** (ex Alcatel), **CNES**, **France Telecom**, **Ansys**
- **Contexte industriel** en collaboration avec **Thalès Alenia Space**
 - Gérard **CAILLE** et Yann **CAILLOCE**



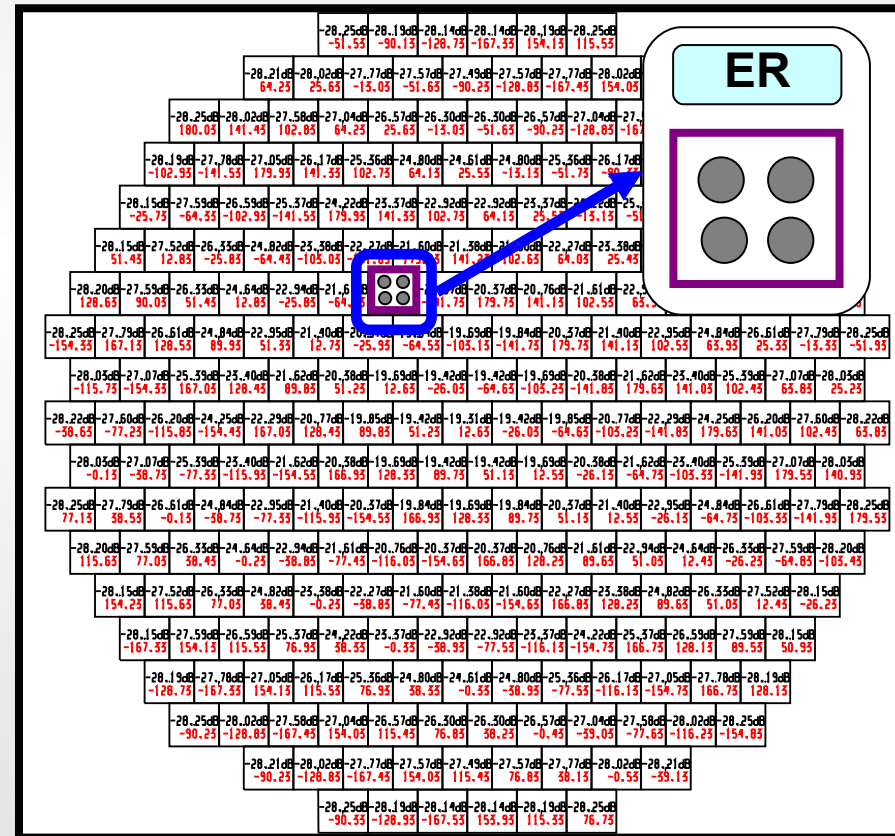
ANTENNE SATELLITAIRE

- ❖ **Emission** sur plusieurs fréquences (en bande Ka (~20 Ghz) ou bande Ku (~12 Ghz))
- ❖ **Applications multimedia** internet à accès rapide et télévision haute définition

STRUCTURE

- ❖ **Réseau plan régulier** (diamètre ~1m)
- ❖ Constitué d'**éléments rayonnants (ER)**
- ❖ Chaque ER est alimenté à l'aide
 - d'un **déphaseur**
 - d'un **amplificateur** (optionnel)

➡ Formation de **faisceaux reconfigurables**



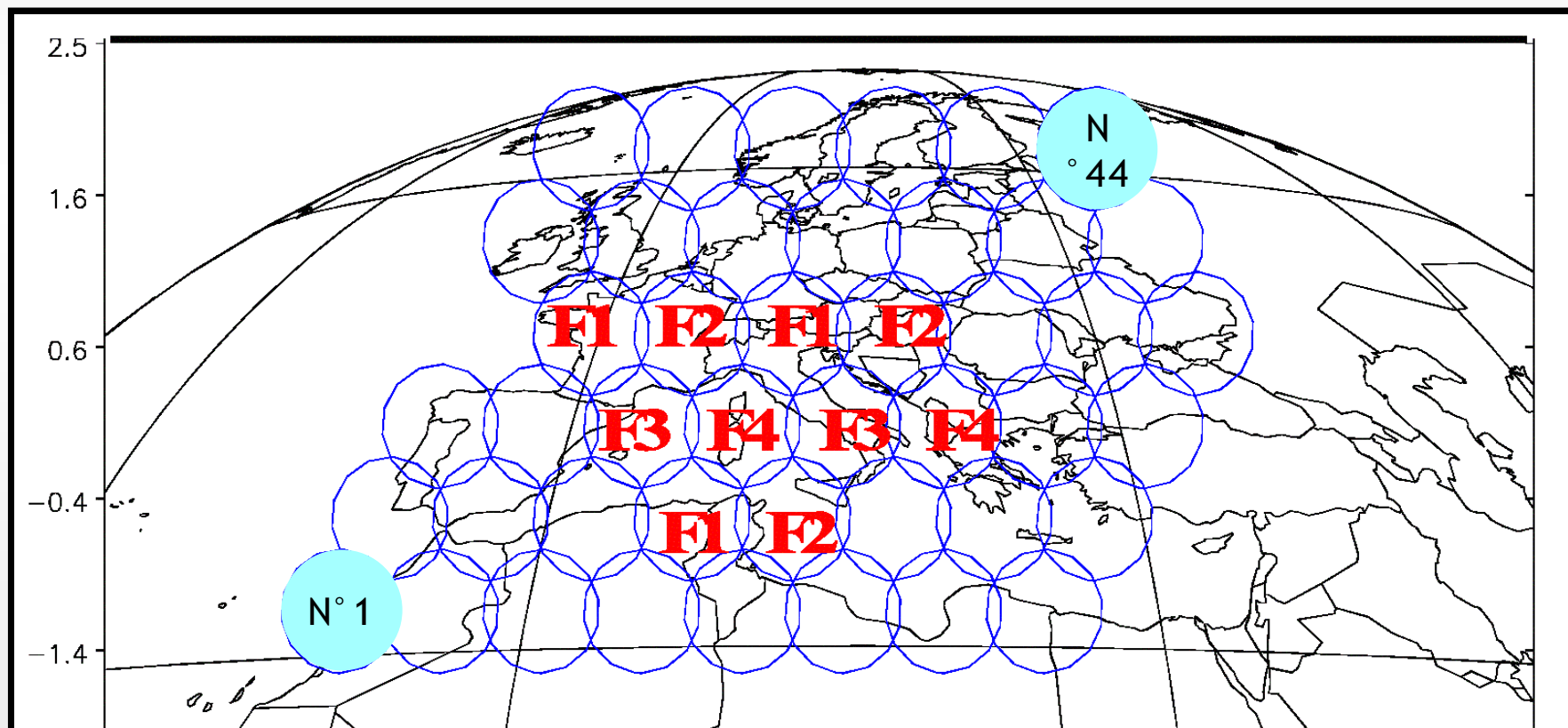
COUVERTURE de l'antenne

❖ **p spots fins** (0.6° à 1°), ici $p=44$ sur l'Europe

❖ **Principe**

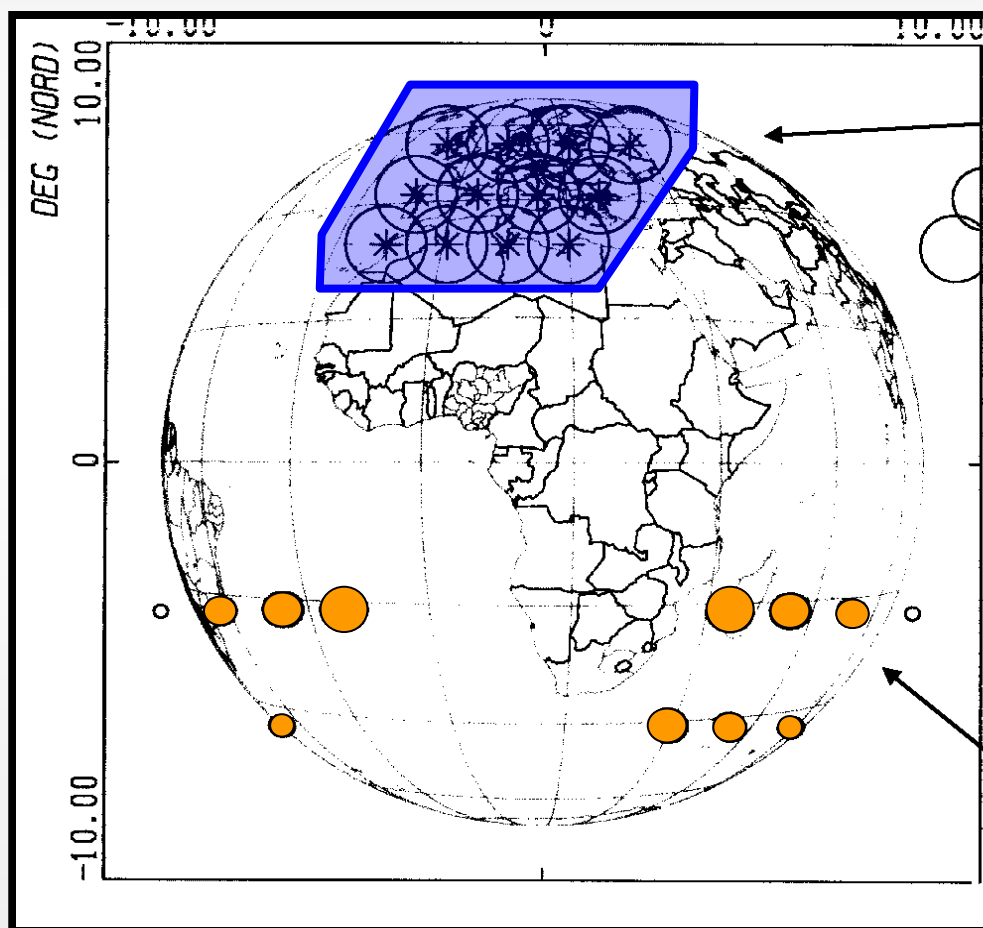
Le **déphasage entre les ER** permet de **focaliser** et **diriger** l'énergie émise

➡ **Couverture simultanée** d'une large zone



COUVERTURE de l'antenne

- ❖ Un **grand nombre d'ER** permet
 - ➔ D'atteindre les **performances exigées**
 - ➔ De **rejeter** les **lobes non désirés**



Zone de couverture
 ➔ **Lobe principal**
 où se concentre la puissance

Lobes secondaires non désirés
 ➔ **Interférences**
 ➔ **Pertes de puissance**

OBJECTIF: FONCTIONNEMENT de l'antenne**● Calcul des alimentations**

- Trouver les **lois d'alimentation des ER**
pour **dépointer** et **concentrer la puissance émise sur chacun des spots**

OBJECTIF: PROBLEME de DESIGN**● Contraintes économiques**

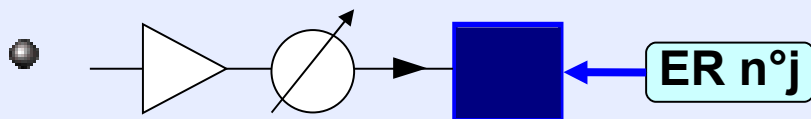
- **Réduire le nombre d'ER**
tout en **conservant les performances** de l'antenne

● Contraintes industrielles

- Trouver une méthode de
regroupement automatique des **ER élémentaires** de départ
selon quelques **formes simples réalisables**

➡ Antenne finale à **réseau irrégulier**

ALIMENTATION d'un ER



$$a_j = A_j e^{i\Phi_j} \in \mathbb{C}$$

Module

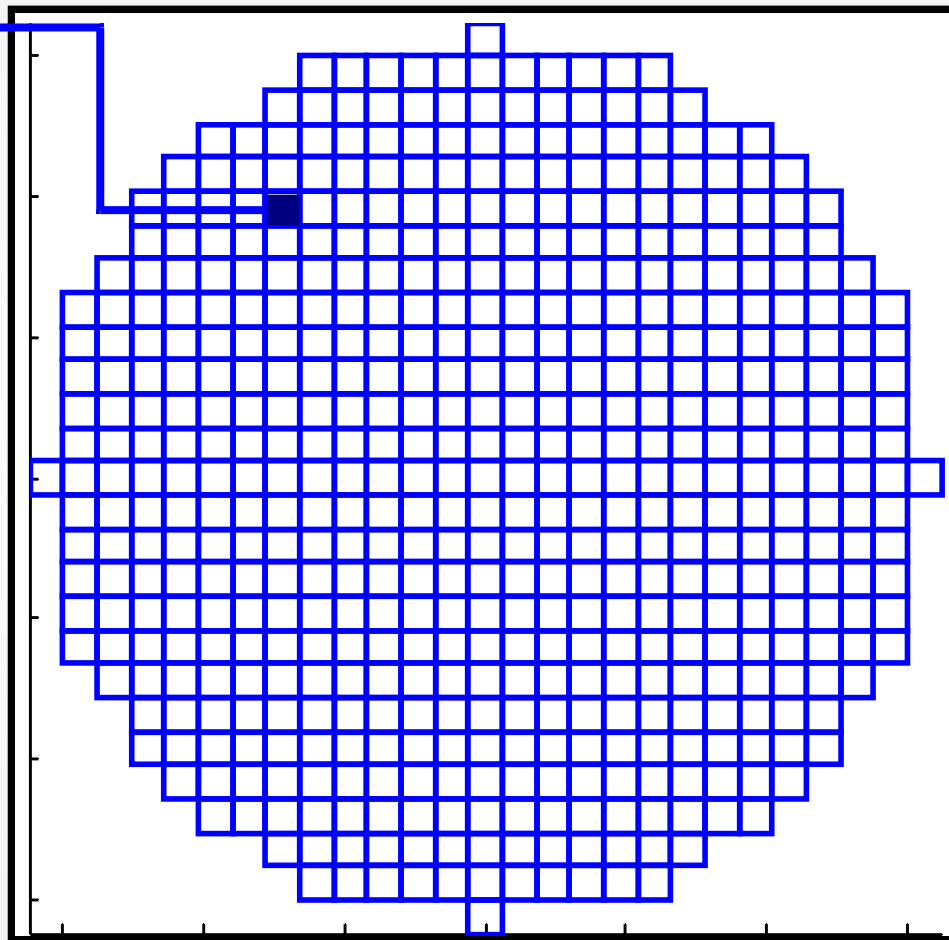
Phase

ALIMENTATION de l'ANTENNE

$$a = (a_1, \dots, a_n) \in \mathbb{C}^n$$

Inconnue du problème

Antenne n ER



CONTRAİNTE INDUSTRIELLE

❖ Puissance d'alimentation de l'antenne fixée

● Normalisée

$$\|a\|^2 = \sum_{j=1}^n |a_j|^2 = 1$$

➤ Identiquement distribuée sur toutes les sources ➡ Pas d'amplificateurs



CONTRAİNTES sur les MODULES

$$\forall j = 1 \dots n \quad |a_j| = \frac{1}{\sqrt{n}} \quad \rightarrow$$

Degrés de liberté
= Uniquement les **n phases**

CHAMP électromagnétique E de l'antenne

- Le **champ total** se calcule par **superposition des champs élémentaires**

$$E(a, x) = \sum_{j=1}^n a_j E_j(x) \in \mathbb{C}$$

Inconnu

Donné

Champ de
l'ER n°j au
point x

✗ Point x sur la Terre



➔ E est **combinaison linéaire** des a_j

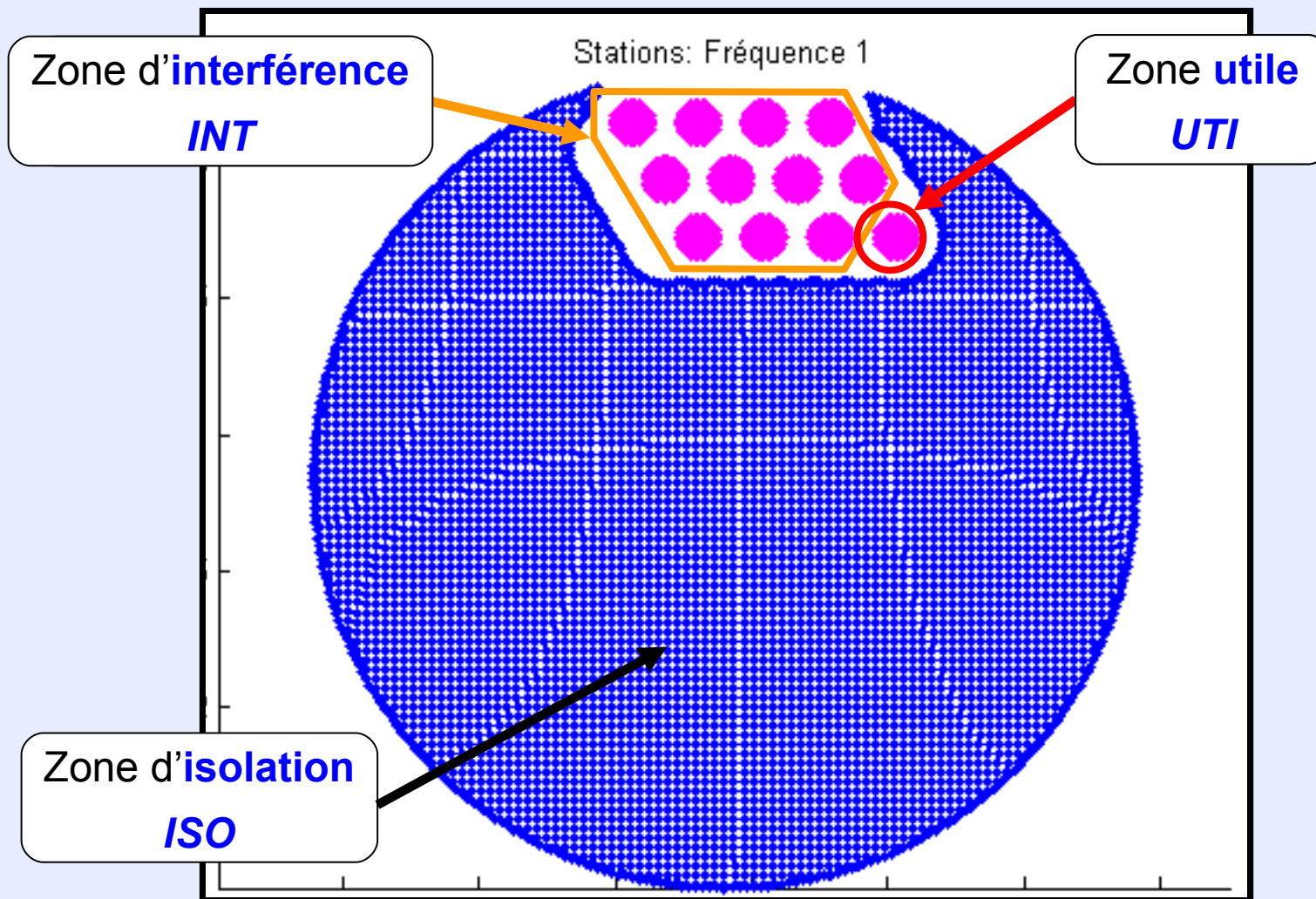
DIRECTIVITE D de l'antenne

- Directivité** := Puissance rayonnée dans la direction x

$$D_{dB}(a, x) = 10 \cdot \log_{10} \left(|E(a, x)|^2 \right)$$

DOMAINES de contrôle sur la Terre

- ❖ p spots ici distribués selon quatre fréquences avec $p=44$



SYNTHESE de RESEAU

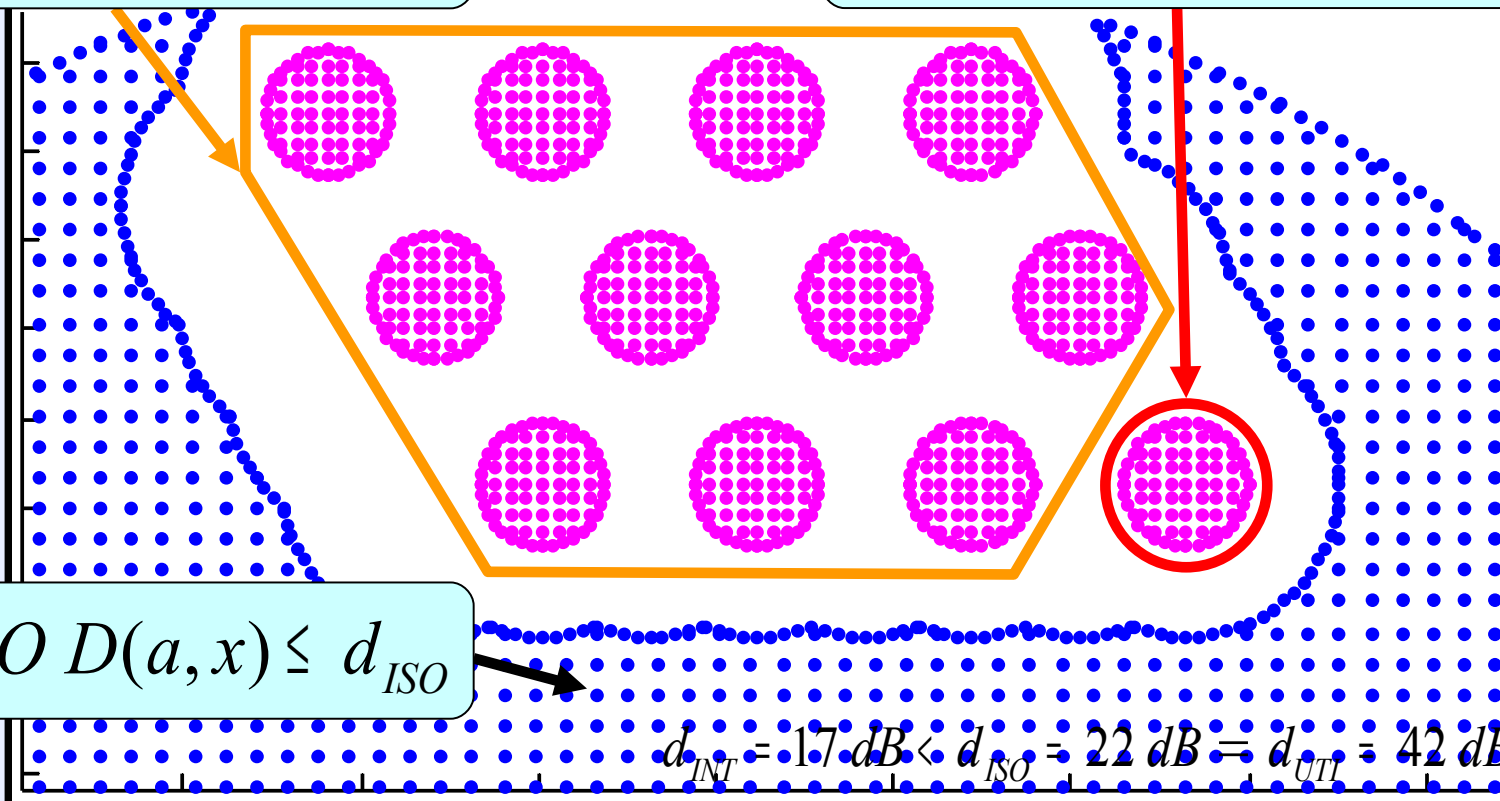
- Pour **chaque spot** successivement **zone utile**:
Calculer a telle que la **directivité D** vérifie les **inégalités** (:= gabarit)

Minimiser la puissance émise

$$\forall x \in INT \ D(a, x) \leq d_{INT}$$

Maximiser la puissance émise

$$\forall x \in UTI \ D(a, x) \geq d_{UTI}$$



PLAN de l'exposé

I Etude de fiabilité d'une chaîne de calcul**II** Conception d'une antenne spatiale**1** Problèmes à résoudre**2** Méthode utilisée**3** Cas test à 9 paramètres**4** Cas test à 30 paramètres**5** Conclusion**1** Données du problème**2** Calcul des alimentations optimales**3** Optimisation topologique**4** Conclusion

1er PROBLEME: CALCUL des alimentations OPTIMALES

- Soit une antenne à géométrie donnée (n ER) et un spot k donné (p zones utiles),

(P_k) Calculer l'alimentation a^k telle que

- D respecte les **inégalités de directivité**
- Sous les **contraintes de module**



Problème
d'optimisation sous
contraintes

DIFFICULTE



Espace de recherche de **grande dimension**
(n = plusieurs centaines d'ER)



Problème **non linéaire**



Nombreux minima locaux à cause des contraintes



Problème difficile

Dubois-Rousselet (1997), Armand(2006),...

PROPRIETE de la DIRECTIVITE

$$D_{dB}(a, x) = 10 \cdot \log_{10}(D(a, x)) \quad a_j = A_j \cdot e^{i\Phi_j}$$

log₁₀ → Décibels ⊕ Phases ← e^{iΦ_j}

➔ Non-linéarité

IDEE CLE: réduire la non-linéarité

Pas de décibels

⊕

Parties réelles et imaginaires

$$a_j = \text{Re}(a_j) + i \cdot \text{Im}(a_j)$$



La **directivité D** est **quadratique** et **convexe**
par rapport aux variables de calcul $\text{Re}(a_j)$ et $\text{Im}(a_j)$

INEGALITES de DIRECTIVITE

- $\forall x \in INT \quad D(a, x) \leq d_{INT}$
 $\forall x \in ISO \quad D(a, x) \leq d_{ISO}$
 $\forall x \in UTI \quad D(a, x) \geq d_{UTI}$

Type **maximisation**
d'une **fonction convexe**

Nombreuses solutions

CONTRAINTES de MODULE

- $\forall j = 1 \dots n \quad |a_j| = \frac{1}{\sqrt{n}}$

Domaine de recherche
non convexe

IDEE CLE: rendre le PROBLEME CONVEXE

Etude de faisabilité (non industrielle)

Maillage en tout point possible

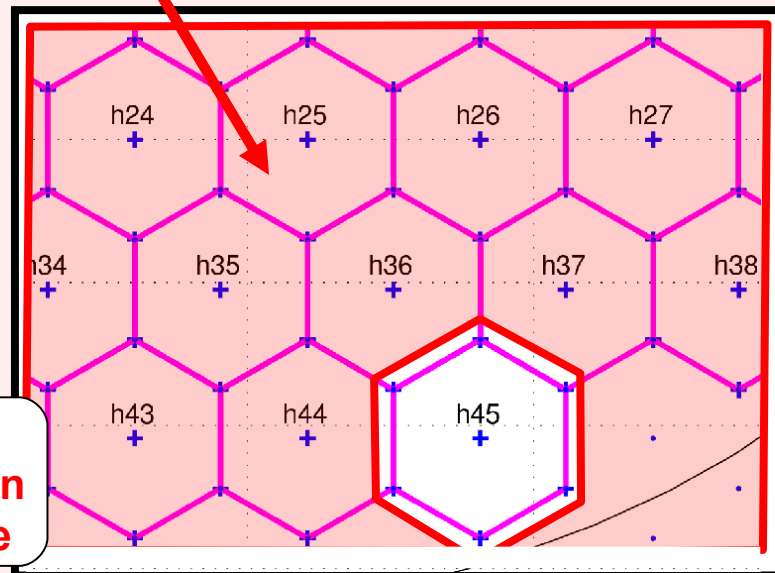
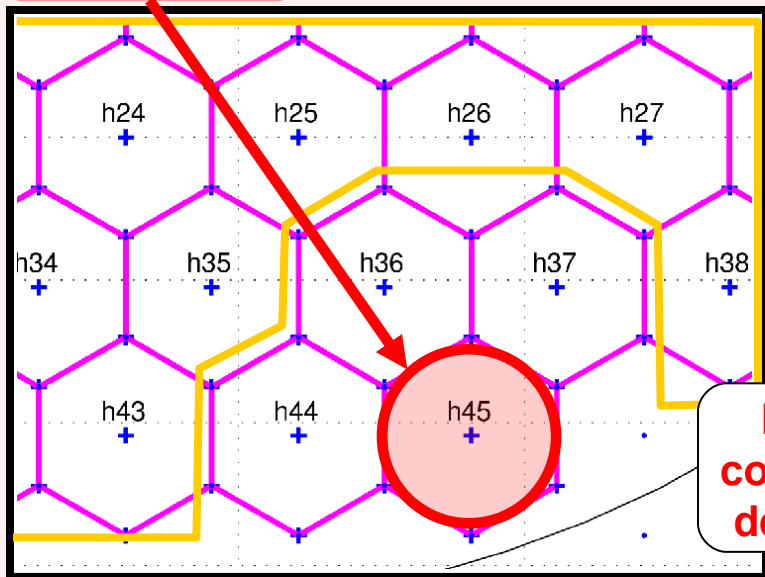
Problème d'origine

Problème reformulé

➤ Directivité sur zone utile

$$\forall x \in UTI \quad D(a, x) \geq d_{UTI}$$

$$\forall x \in \Phi \setminus UTI \quad D(a, x) \leq d$$



Principe: conservation de l'énergie

Maximiser D dans le spot UTI

Minimiser D à l'extérieur du spot UTI

Minimisation d'une fonction convexe

➔ Simplification

IDEE CLE: rendre le PROBLEME CONVEXE

Etude industrielle

Maillage incomplet

Problème d'origine

Problème reformulé

➤ Directivité sur zone utile

$\forall x \in UTI \quad D(a, x) \geq d_{UTI}$

$E(a, x_0) = E_0 \quad E_0 ? \quad d_{UTI}$

Minimiser D à l'extérieur du spot

$x_0 = \text{centre du spot UTI}$

Maximiser le champ E au centre

E linéaire en a
 ➔ Domaine de recherche **convexe**

➤ Contraintes de module

$\forall j = 1 \dots n \quad |a_j| = \frac{1}{\sqrt{n}}$

A l'optimum, les contraintes seront saturées

$\forall j = 1 \dots n \quad |a_j| \leq \frac{1}{\sqrt{n}}$

➔ Domaine de recherche **convexe**

PROBLEME d'ORIGINE (P_1)

Calculer a (parties réelles et im.) tq

● Inégalités de directivité

$$\forall x \in INT \quad D(a, x) \leq d_{INT}$$

$$\forall x \in ISO \quad D(a, x) \leq d_{ISO}$$

$$\forall x \in UTI \quad D(a, x) \geq d_{UTI}$$

➤ Sous les contraintes de module

$$\forall j = 1 \dots n \quad |a_j| = \frac{1}{\sqrt{n}}$$

PROBLEME REFORMULE (P_2)

Calculer a (parties réelles et im.) tq

● Inégalités de directivité

$$\forall x \in INT \quad D(a, x) \leq d_{INT}$$

$$\forall x \in ISO \quad D(a, x) \leq d_{ISO}$$

$$x_0 \text{ centre de UTI } E(a, x_0) = E_0$$

● Sous les contraintes de module

$$\forall j = 1 \dots n \quad |a_j| \leq \frac{1}{\sqrt{n}}$$

Problème
d'optimisation

Minimiser D
convexe

Domaines
convexes

SIMPLIFICATION du problème

● (P₂) Problème
d'optimisation convexe

Le minimum de (P₂) est
le minimum global
recherché dans (P₁)

➤ Pénalisation de toutes les contraintes ➤ Construction d'une fonction coût
J à minimiser pour (P₁) ou (P₂)

➤ Méthode de Gauss-Newton

IDEE CLE pour les REGROUPEMENTS

Cas relaxé := suppression de la contrainte sur les modules de a

(P_k) Calculer l'alimentation a^k telle que

- D respecte les **inégalités de directivité**

❖ **Degrés de liberté supplémentaires = modules** $|a_j|, j = 1 \dots n$

➡ **Meilleures performances**

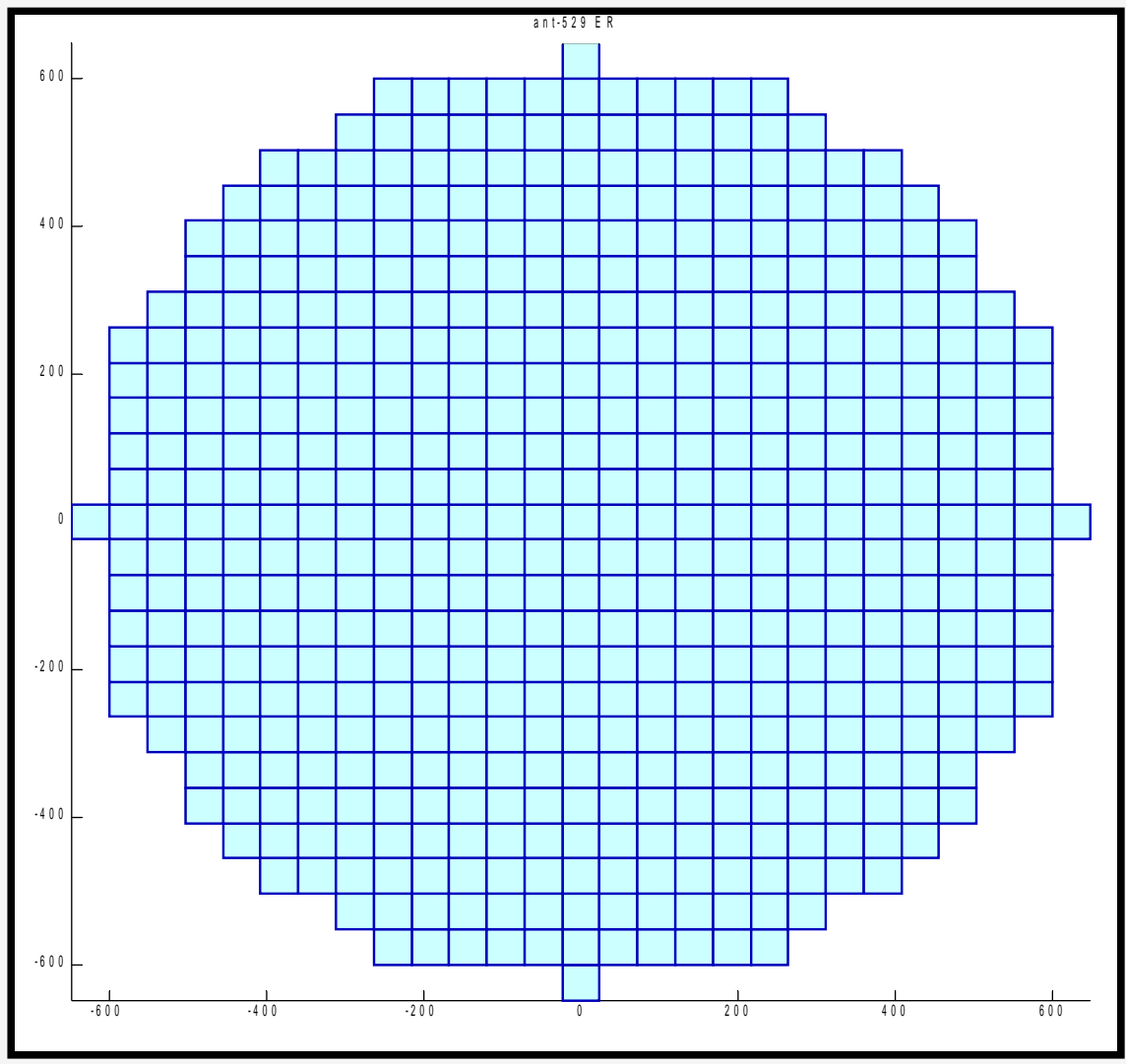
● **Modules optimaux = Critère de regroupement** des ER

PLAN de l'exposé

I Etude de fiabilité d'une chaîne de calcul**II** Conception d'une antenne spatiale**1** Problèmes à résoudre**2** Méthode utilisée**3** Cas test à 9 paramètres**4** Cas test à 30 paramètres**5** Conclusion**1** Données du problème**2** Calcul des alimentations optimales**3** Optimisation topologique**4** Conclusion

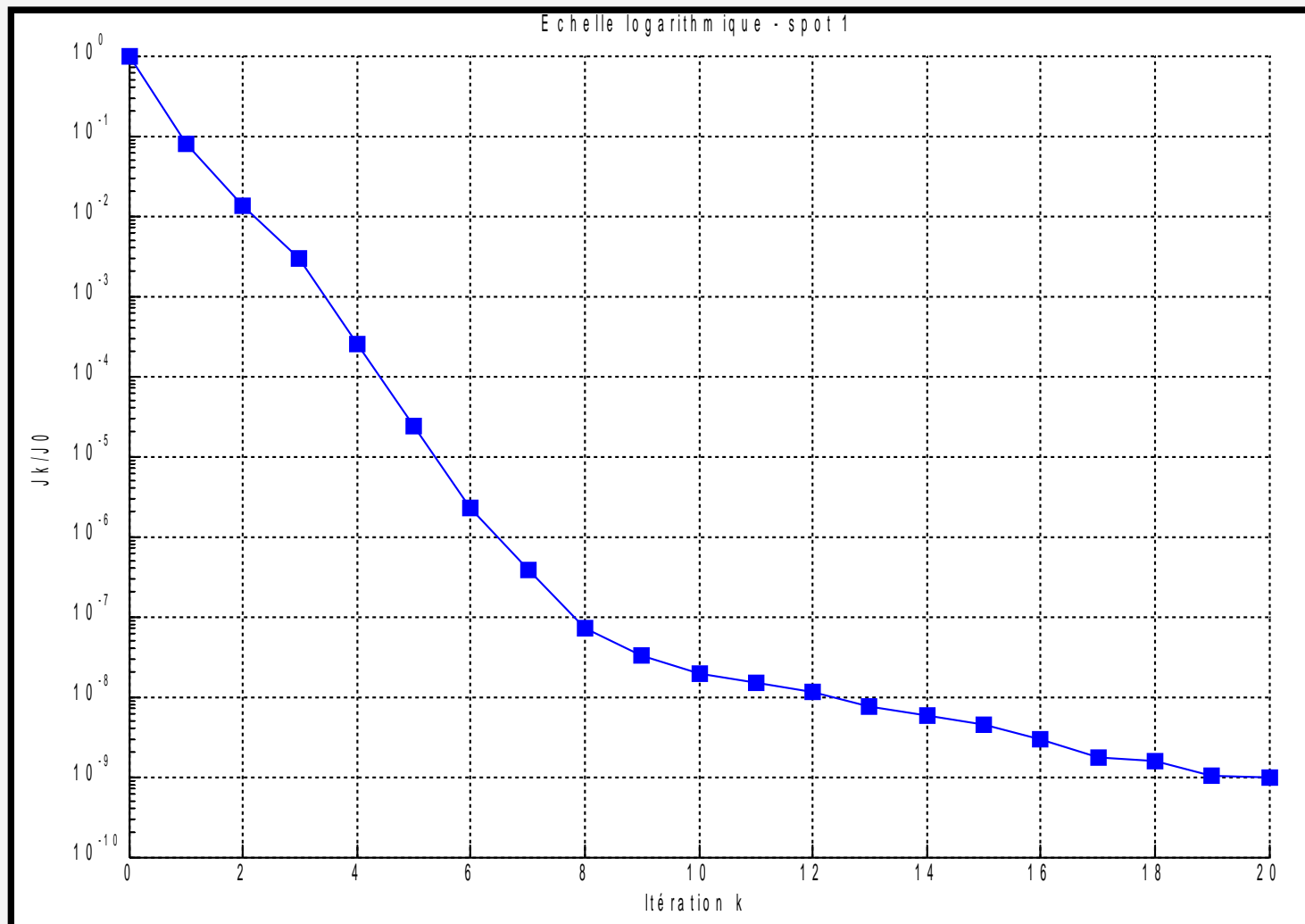
ANTENNE INITIALE

► **Ant₀ 529 ER_{el}**



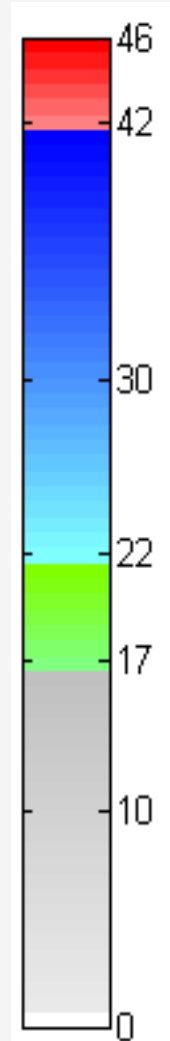
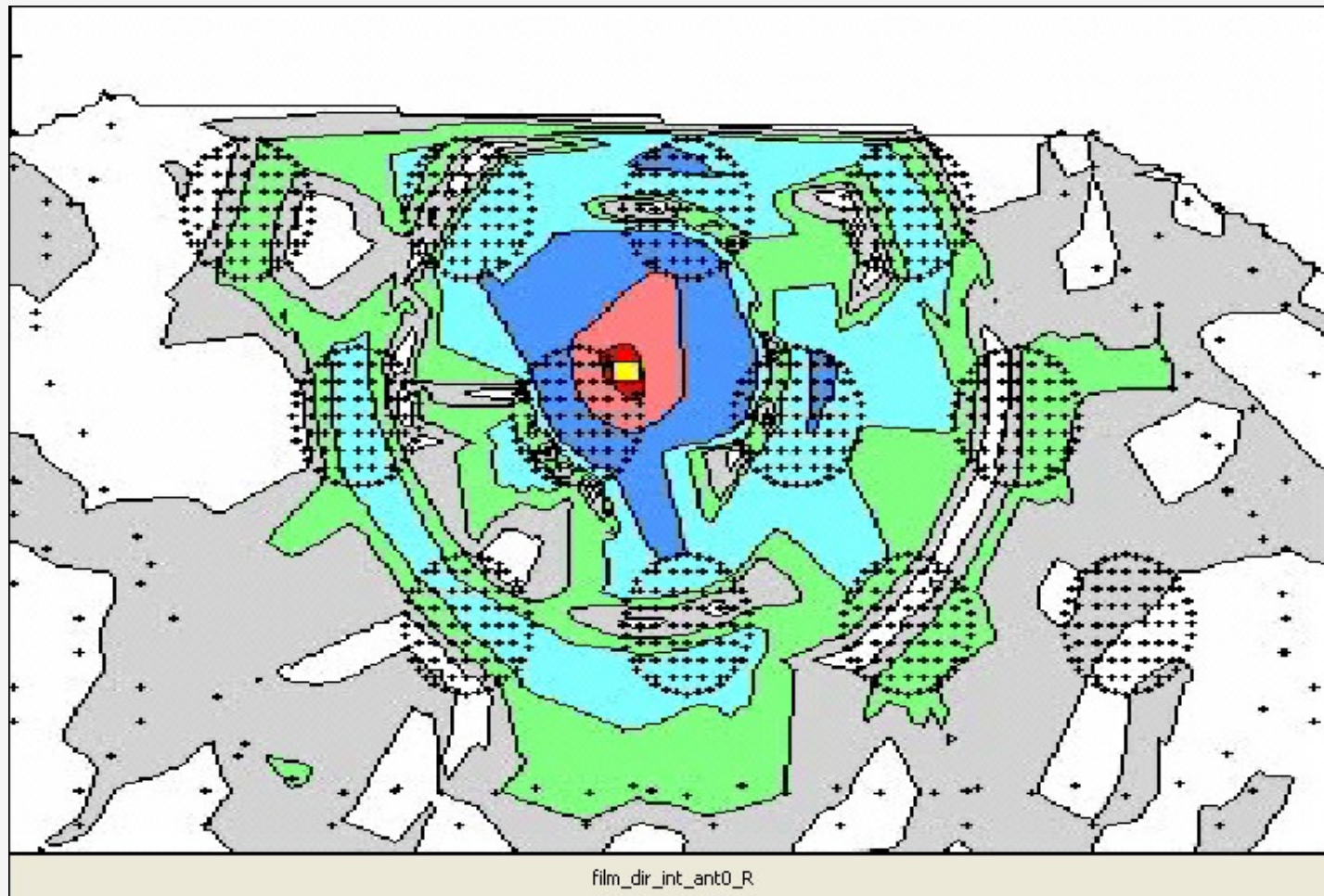
ALIMENTATION OPTIMALE: spot 1

► **Ant₀ cas relaxé** Fonction coût J en fonction des itérations



ALIMENTATION OPTIMALE: spot 1

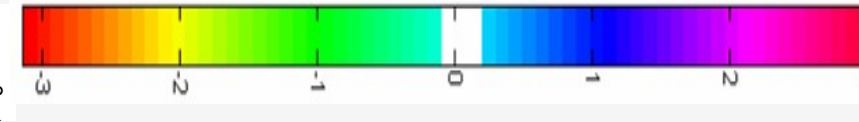
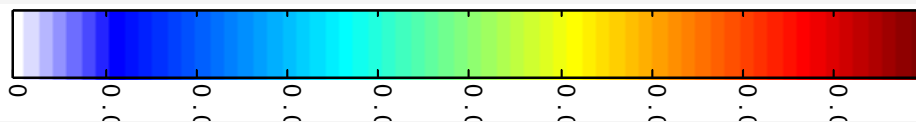
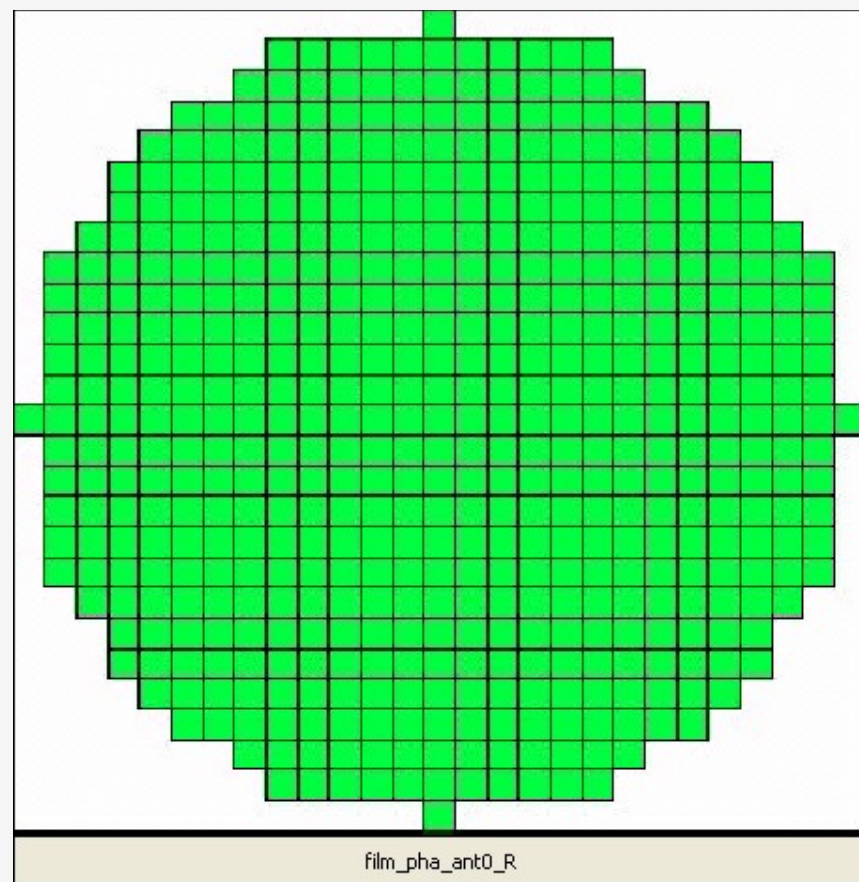
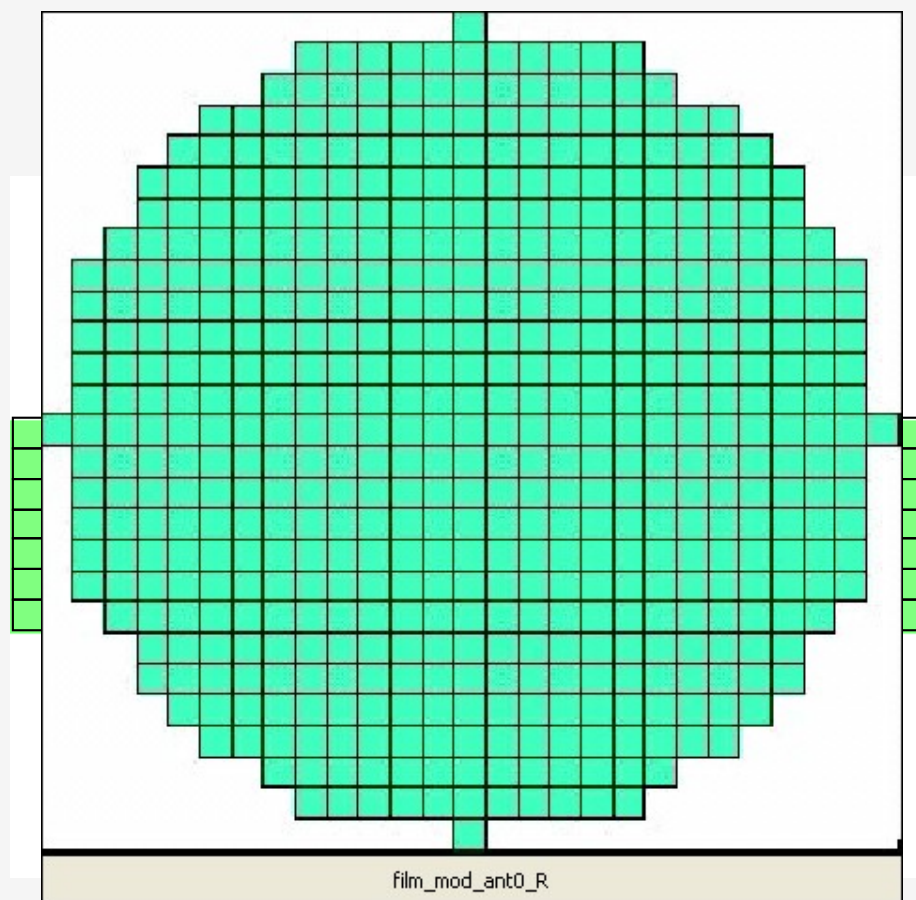
► **Ant₀ cas relaxé** Directivité (dB) en fonction des itérations



ALIMENTATION OPTIMALE: spot 1

► **Ant₀ cas relaxé**

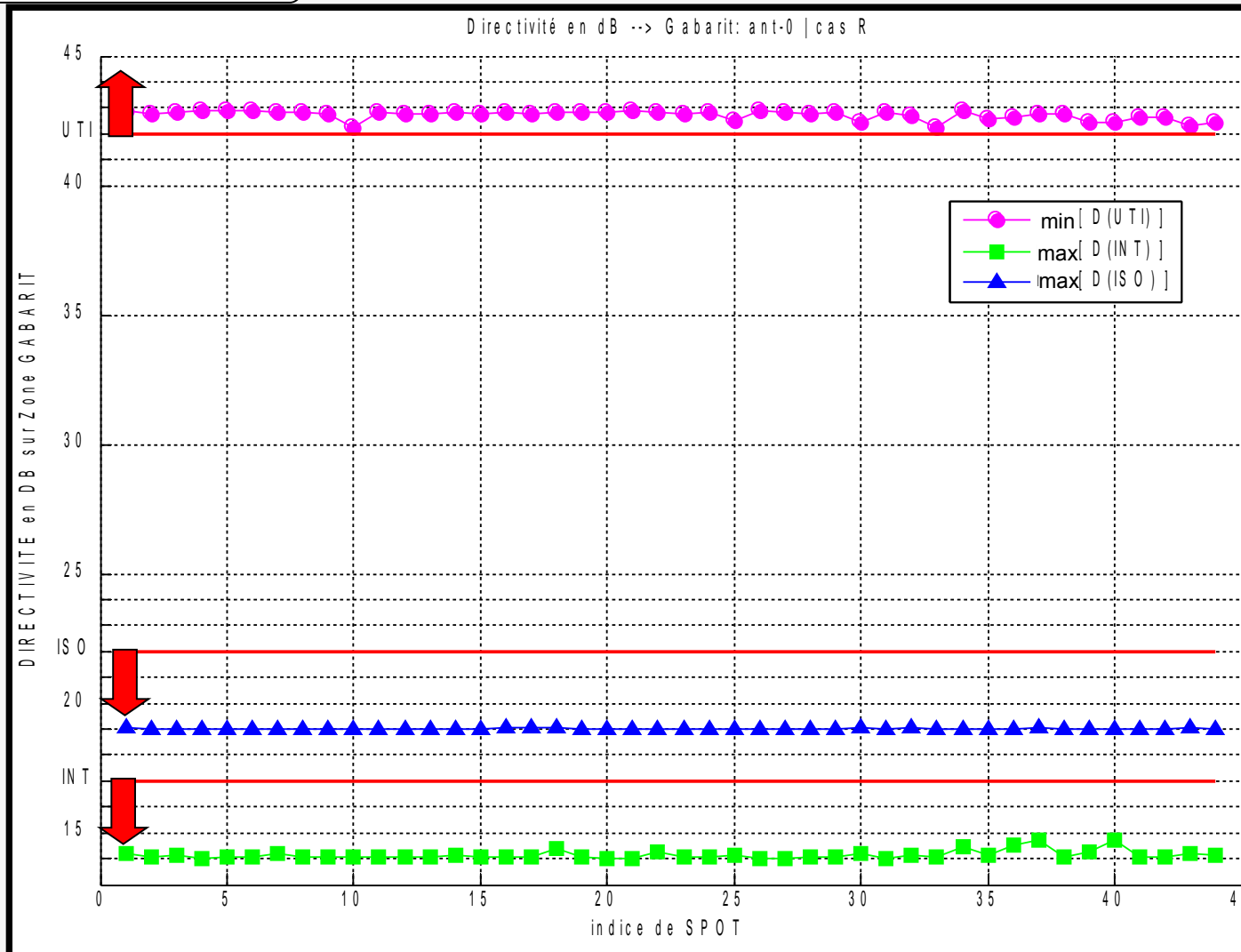
Modules et phases en fonction des itérations



ALIMENTATIONS OPTIMALES: ensemble des spots

Ant₀ cas relaxé

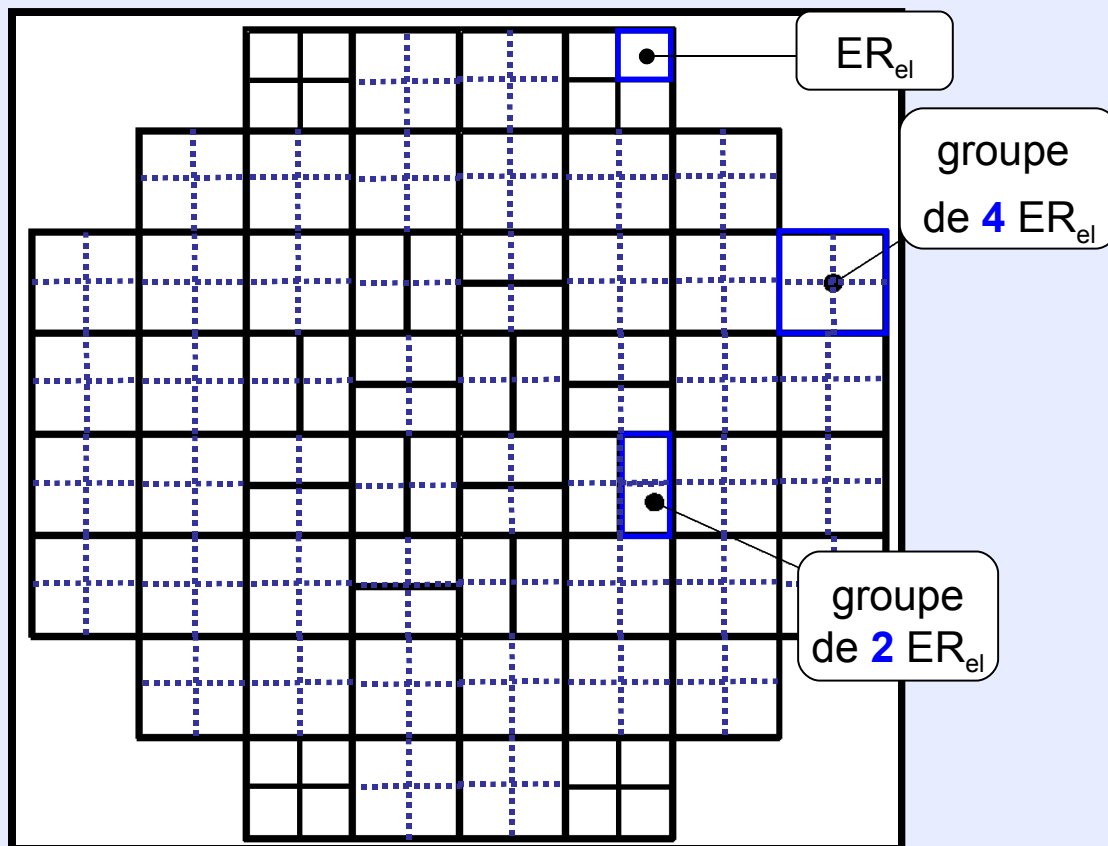
Performances de directivité



ANTENNE avec REGROUPEMENTS d' ER_{el}

- Réseau **non régulier**

n ER_{el} regroupés



- Antenne de départ: n_0 ER_{el} sous-jacents avec $n < n_0$

VALEURS CIBLES

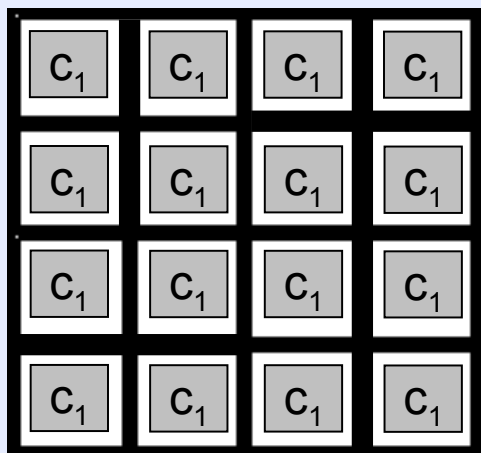
- Valeurs de contraintes sur les modules des ERel := Cibles

Antenne initiale: n_0 ER_{el}

$$\forall j = 1 \dots n_0 \quad |a_j| = \frac{1}{\sqrt{n_0}}$$

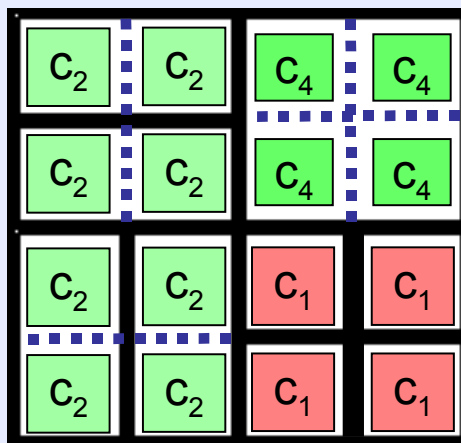
Antenne avec regroupements: $n < n_0$ ER

$$\text{Puissance} = \text{ER}_2 \left(\frac{1}{\sqrt{2}\sqrt{n}} \right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{2}\sqrt{n}} \right)^2 = \frac{1}{\sqrt{n}}$$



$$c_1 = \frac{1}{\sqrt{n_0}}$$

Fixes



Cible ER_{el}

$$\frac{1}{\sqrt{n}} > \frac{1}{\sqrt{n_0}}$$

Cible ER type 2

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{n}} < \frac{1}{\sqrt{n_0}}$$

- Dépendent De n := nombre total d'ER
- Du type d'ER : 1, ..., 4 ER_{el}

IDEE CLE: ALIMENTATION OPTIMALE dans le cas RELAXE

❖ Critère de regroupement des ER_{el}

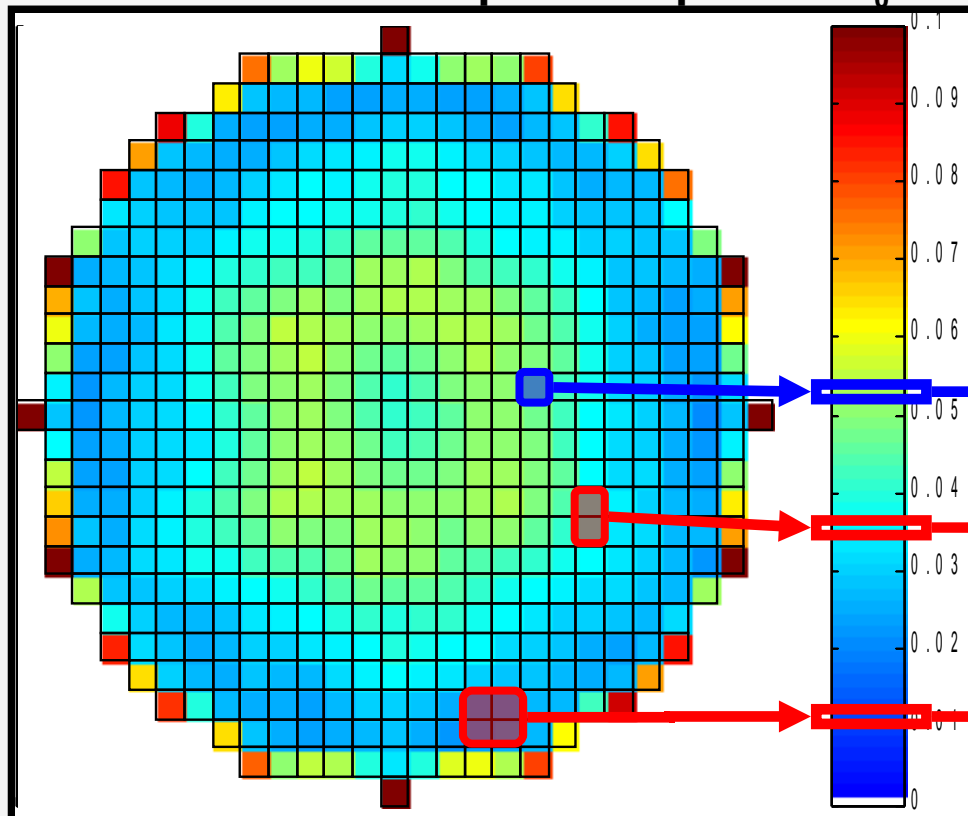
Modules optimaux pour Ant_0 = **Cibles souhaitées** pour Ant_k

● **Regrouper un ER_{el}** si son **module optimal** est **petit**

➡ **Baisser la cible** ➡ **Rapprocher du module optimal** ➡ **Plus besoin de ce degré de liberté**

ILLUSTRATION

▶ **Carte de modules optimaux pour Ant_0**



$$\frac{1}{\sqrt{n_0}}$$

Cible ER_{el}

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{n_0}}$$

Cible ER type 2

$$\frac{1}{\sqrt{4}} \frac{1}{\sqrt{n_0}}$$

Cible ER type 4

ALGORITHME

Calcul des modules optimaux

- 1 Pour l'antenne initiale Ant_0 , calculer les **alimentations optimales** dans le **cas relaxé** pour **tous les spots** utiles

$$a^k \in C^{n_0}, k = 1 \dots p$$

IDEE CLE: SVD

❖ Problème

- ❖ p zones utiles \longrightarrow p cartes de **modules optimaux différentes**
- ❖ Or on cherche une **géométrie unique valable pour tous les spots**

❖ Solution

- ❖ Se ramener à **une carte unique** grâce à une **méthode de réduction de données**



La **décomposition en valeurs singulières (SVD)**

ALGORITHME

Calcul des modules optimaux

- 1 Pour l'antenne initiale Ant_0 , calculer les **alimentations optimales** dans le **cas relaxé**
pour **tous les spots** utiles

$$a^k \in \mathbb{C}^{n_0}, k = 1 \dots p$$

- 2 Former la **matrice A** des **modules optimaux** $A = \left(|a^1| \dots |a^p| \right) \in \mathbb{R}^{n_0 \times p}$

- 3 Appliquer la **SVD** $A = U S V^*$

SVD

$$\begin{matrix} \diamond \\ \left. \begin{matrix} p \\ A \\ n_0 \end{matrix} \right\} = \begin{matrix} \begin{matrix} U \\ n_0 \end{matrix} \end{matrix} \begin{matrix} \begin{matrix} S \\ p \end{matrix} \end{matrix} \begin{matrix} V^* \end{matrix}$$

- ❖ S matrice **diagonale** formée de **valeurs singulières** $\sigma_1 \dots \sigma_p$
qui en pratique **décroissent rapidement**

- ❖ Les colonnes $U_1 \dots U_p$ sont des **vecteurs orthonormés**

ALGORITHME

Calcul des modules optimaux

- 1 Pour l'antenne initiale Ant_0 , calculer les **alimentations optimales** dans le **cas relaxé** pour **tous les spots** utiles

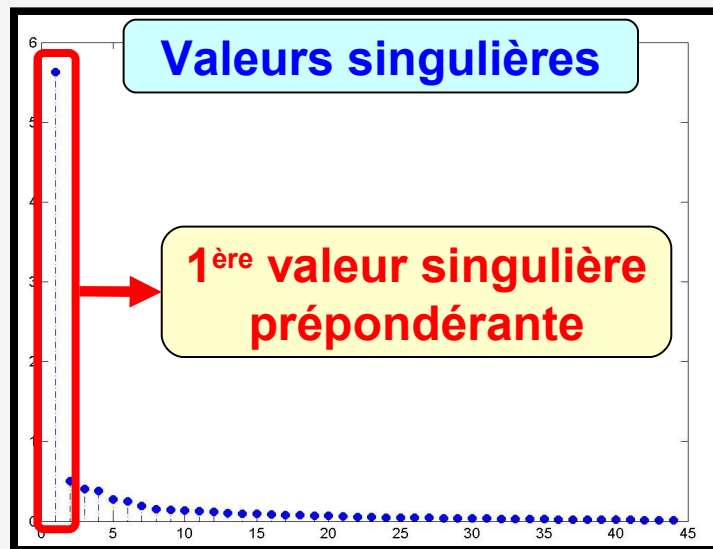
$$a^k \in \mathbb{C}^{n_0}, k = 1 \dots p$$

- 2 Former la **matrice A** des **modules optimaux** $A = \left(|a^1| \dots |a^p| \right) \in \mathbb{R}^{n_0 \times p}$

- 3 Appliquer la **SVD** $A = U S V^*$

RESULTAT NUMERIQUE

SVD de la matrice des modules optimaux



SVD

➤ Reconstruction de A

- Avec **toutes** les valeurs singulières

$$A = \sum_{j=1}^p \sigma_j U_j V_j^*$$

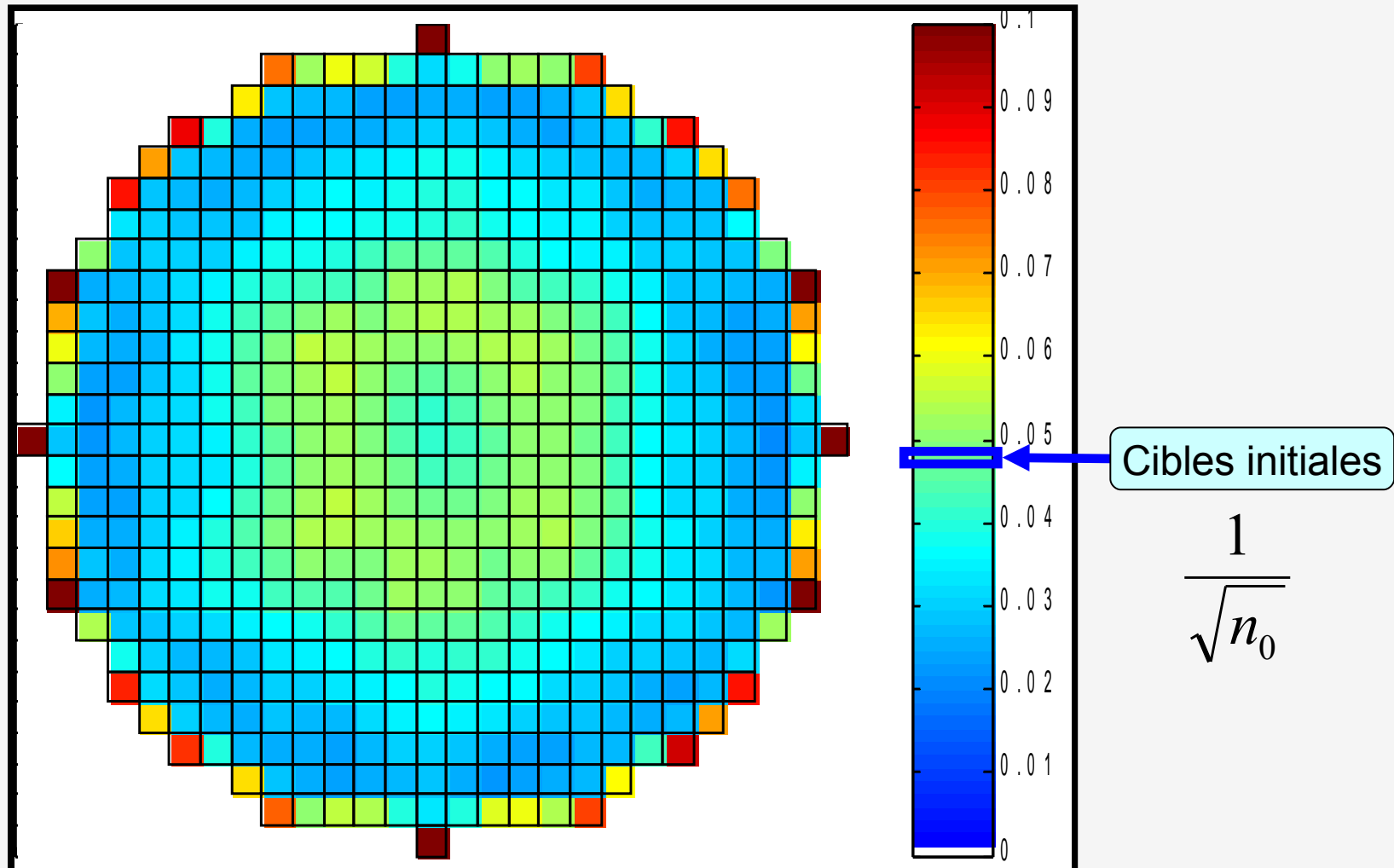
- Avec **la première** valeur singulière

$$A \approx \sigma_1 U_1 V_1^*$$

CARTE des MODULES OPTIMAUX

► Premier vecteur colonne de U →

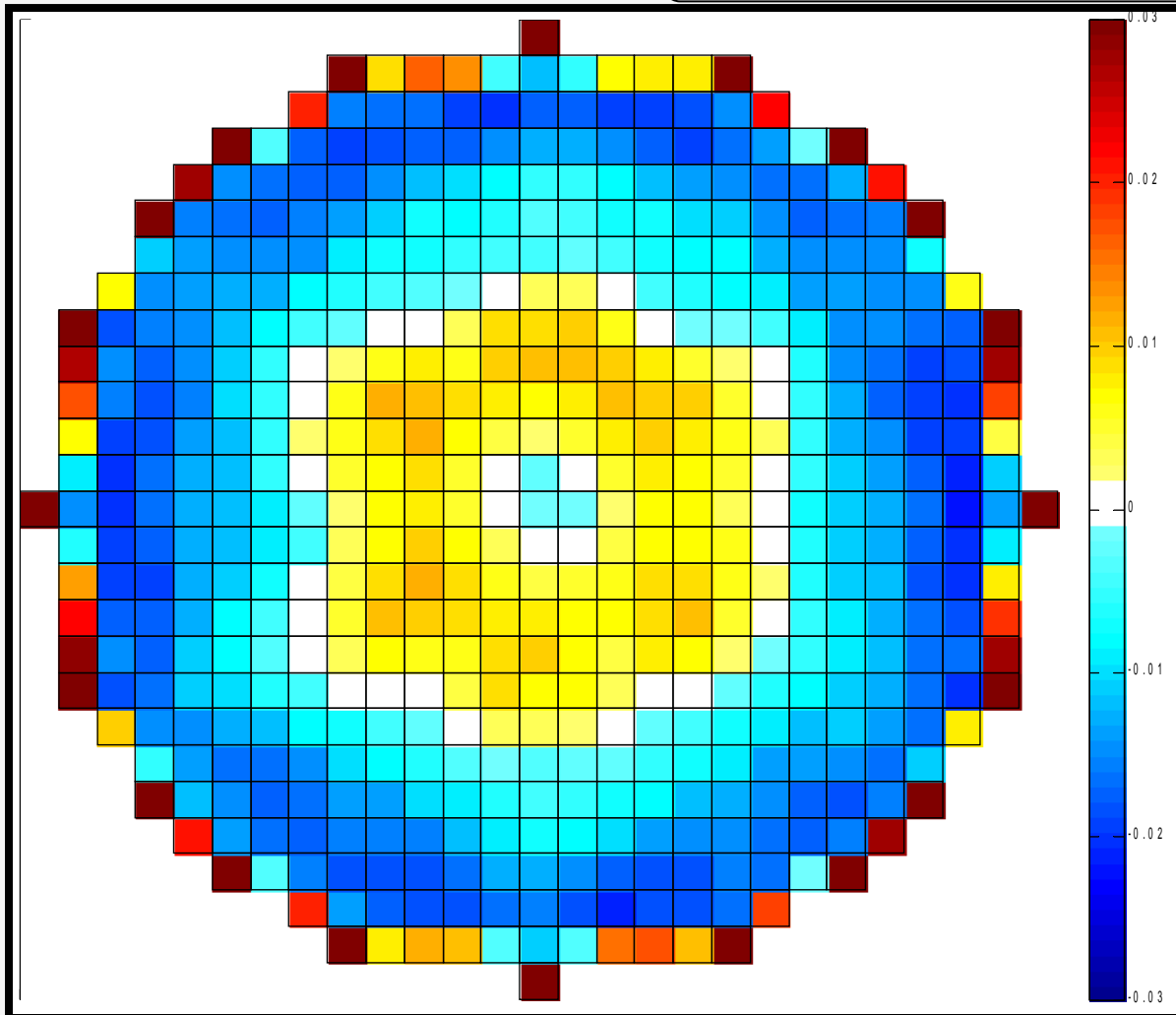
Résumé des **modules optimaux**
pour tous les spots



CARTE des MODULES OPTIMAUX

► Premier vecteur colonne de U

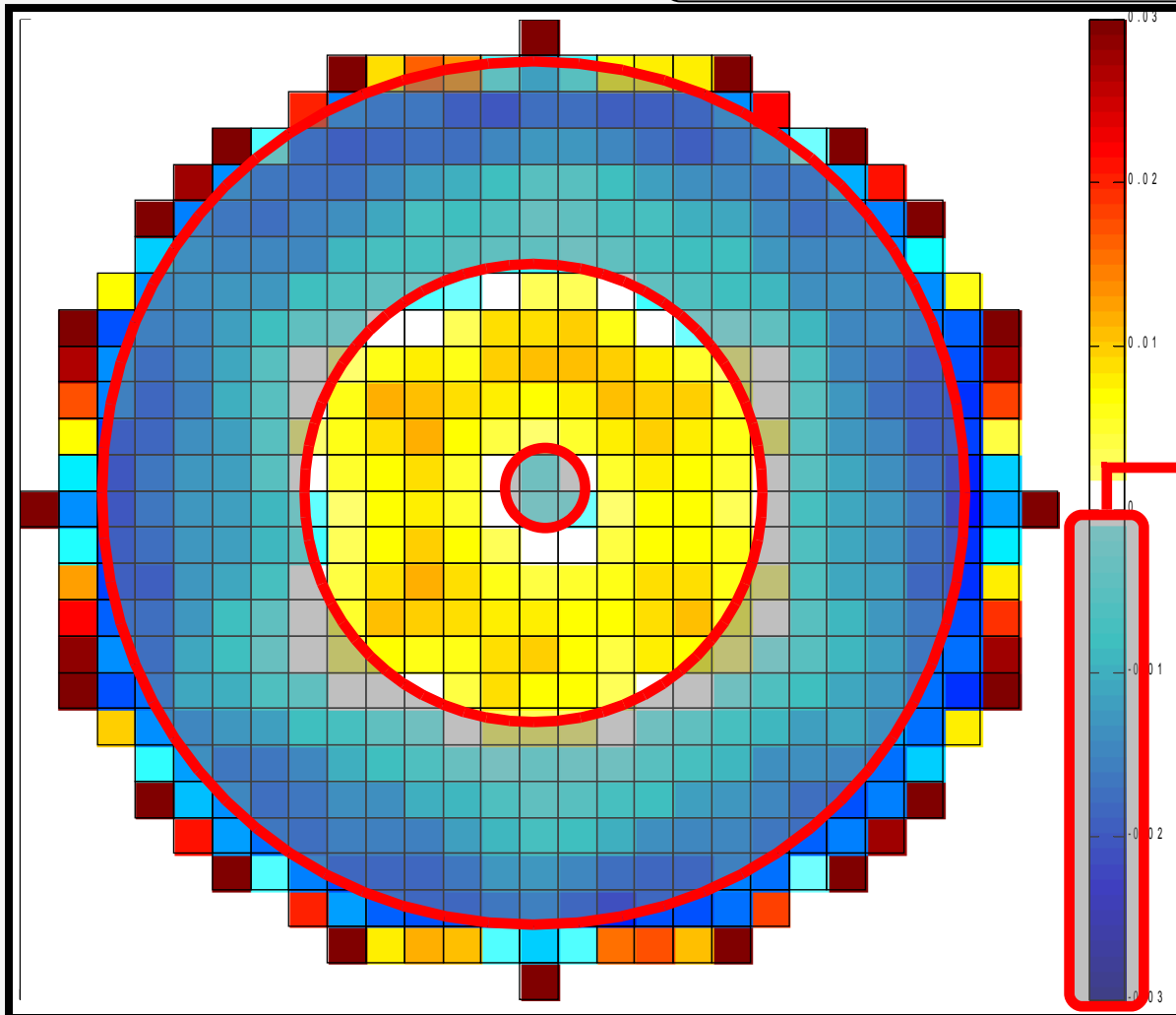
$\text{Err}(\text{Ant}_0)$ = différence
entre **cibles initiales** et **modules optimaux**



CARTE des MODULES OPTIMAUX

► Premier vecteur colonne de U

$Err(Ant_0) =$ différence
entre **cibles initiales** et **modules optimaux**



**Modules optimaux
faibles**

Zones de
regroupements
d' ER_{el}

ALGORITHME

Optimisation topologique

1 $\text{Ant}_K := \text{Ant}_1$ géométrie initiale

2 Tant que J_K décroît

• Fonction coût

$$J_K := \sum_{i=1}^{n_0} \left(c_i^K - m_i \right)^2$$

➤ Soit i_M l'**indice** d'**ERel** sous-jacent

d'**erreur maximale** entre **cibles courantes** et **modules optimaux**

➤ Effectuer **tous les regroupements autorisés** avec les **ER voisins** de l'**ERel** n° i_M

(on s'autorise à **casser des ER**)

➤ Pour chaque regroupement, calculer J_{K+1}

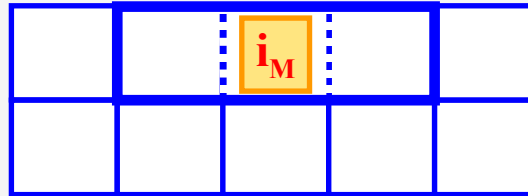
➤ Choisir la **géométrie** Ant_{K+1} associée à la valeur J_{K+1} **minimum**

➤ $\text{Ant}_K := \text{Ant}_{K+1}$

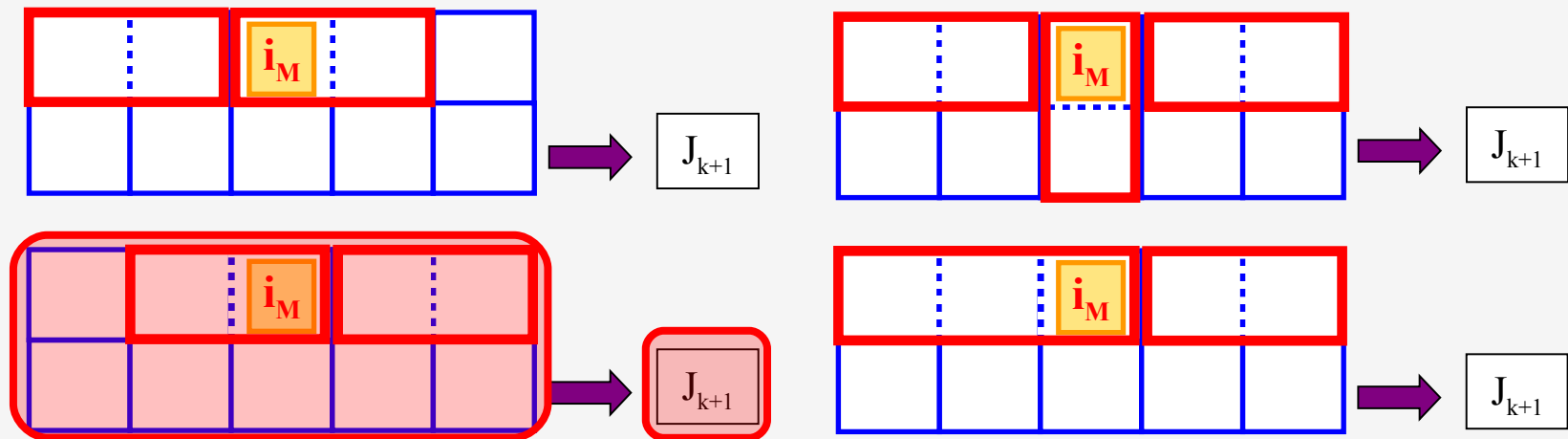
3 $\text{Ant}_{\text{opt}} := \text{Ant}_K$

ILLUSTRATION de l'ALGORITHME d'OPTIMISATION TOPOLOGIQUE

⊕ Ant_k



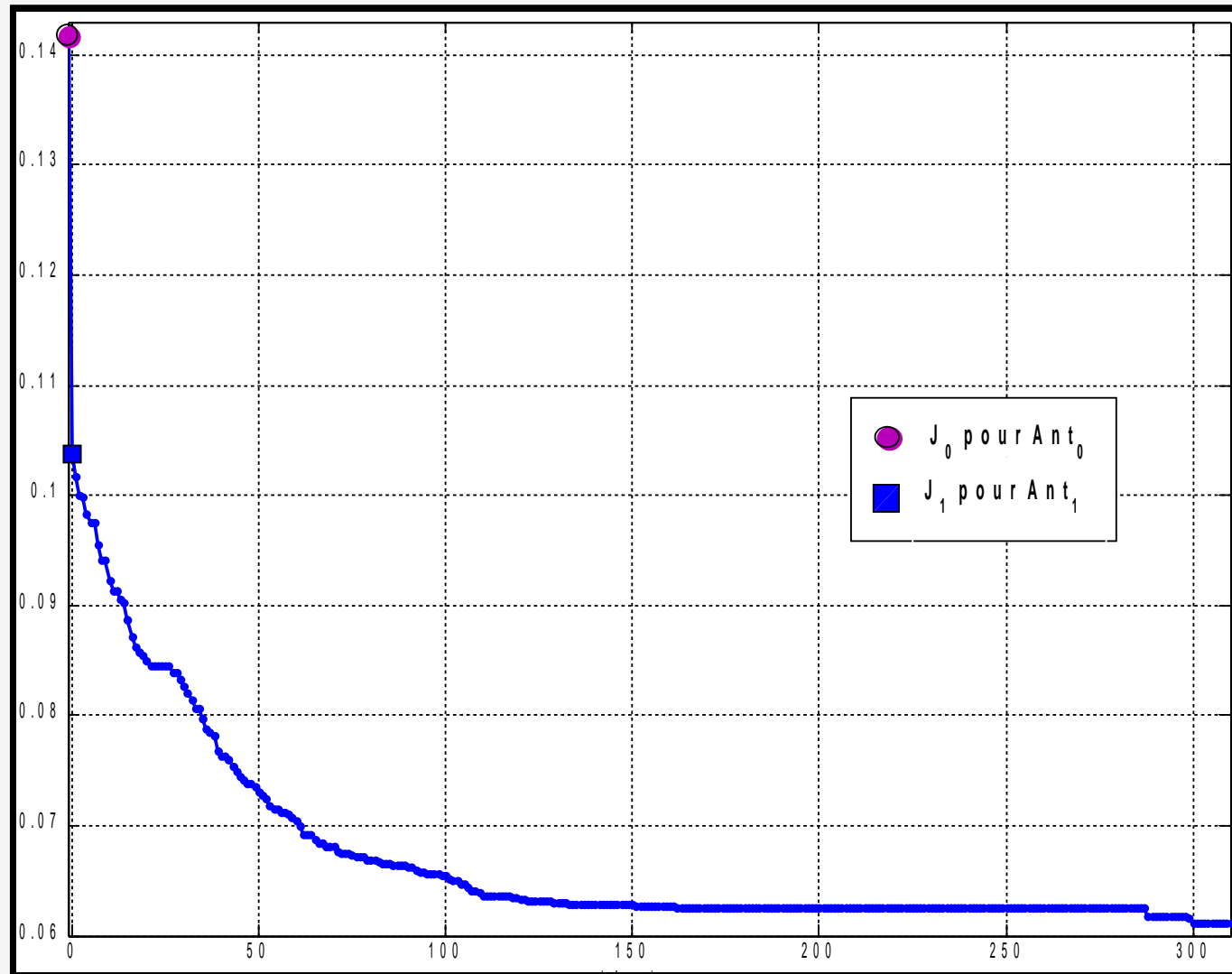
⊕ Tests de regroupements



Valeur **minimum** de J_{K+1} ➔ choix de Ant_{K+1}

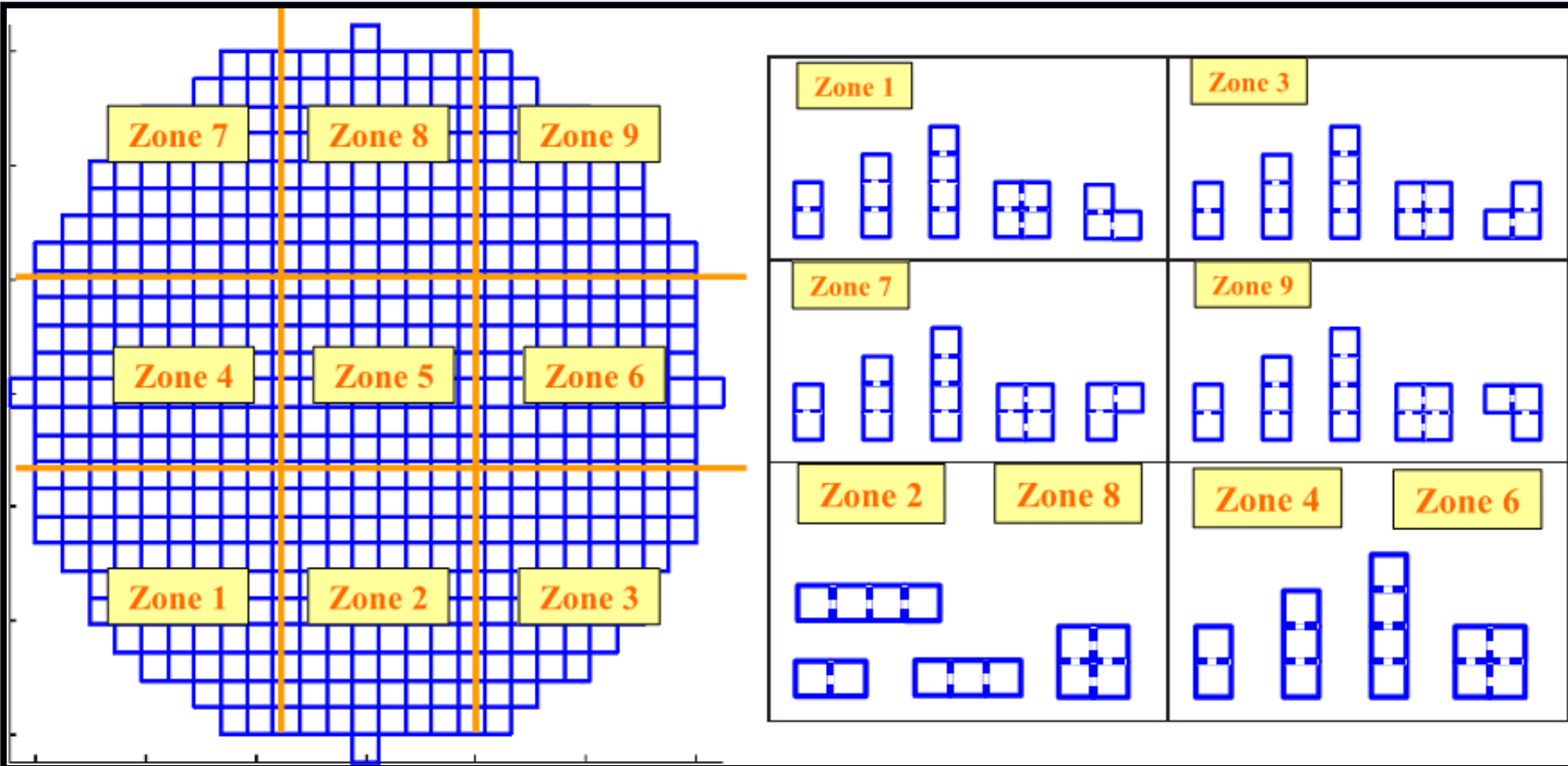
OPTIMISATION TOPOLOGIQUE

► Fonction coût J en fonction des itérations



CONTRAINTES INDUSTRIELLES

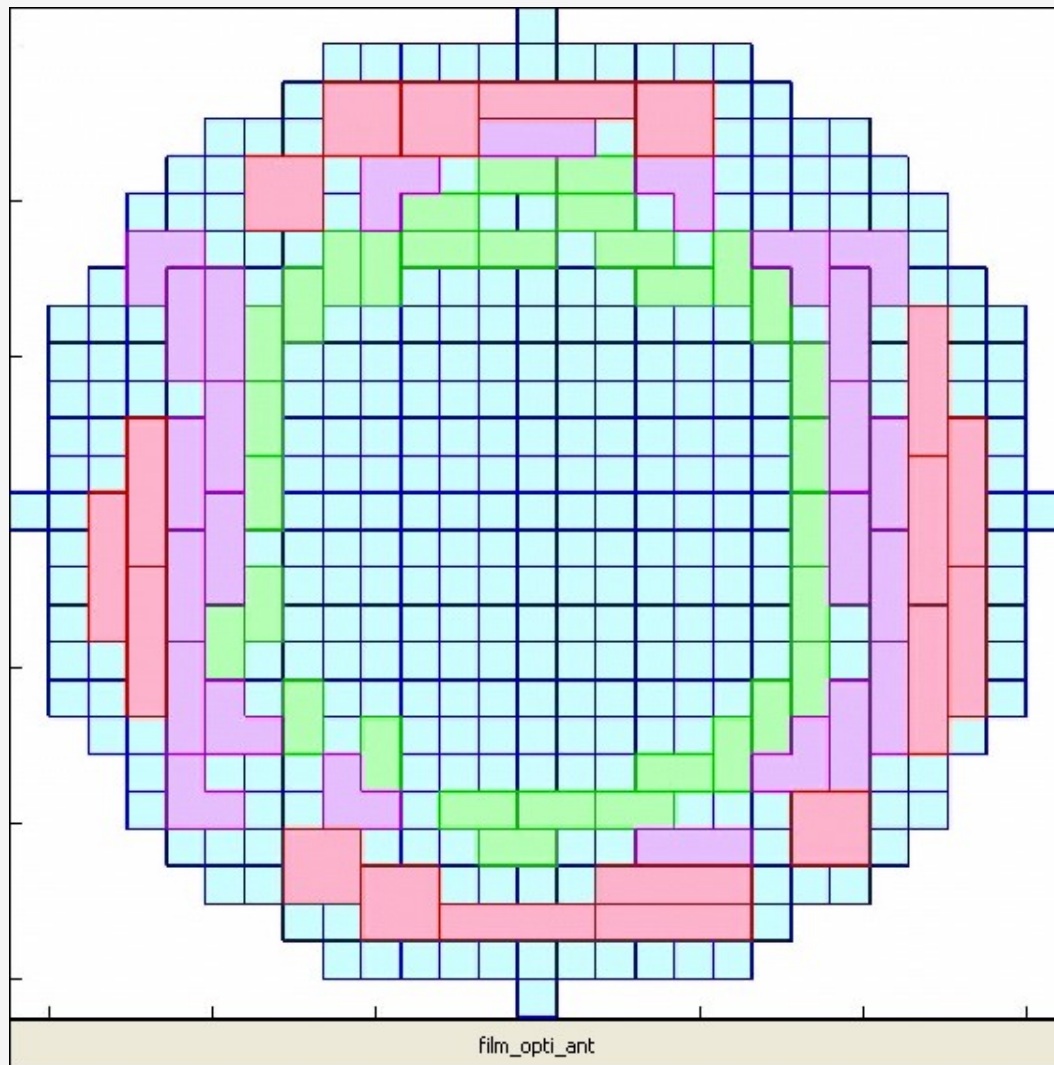
➤ Formes d'ER autorisées



OPTIMISATION TOPOLOGIQUE

► Regroupements d' ER_{el} en fonction des itérations

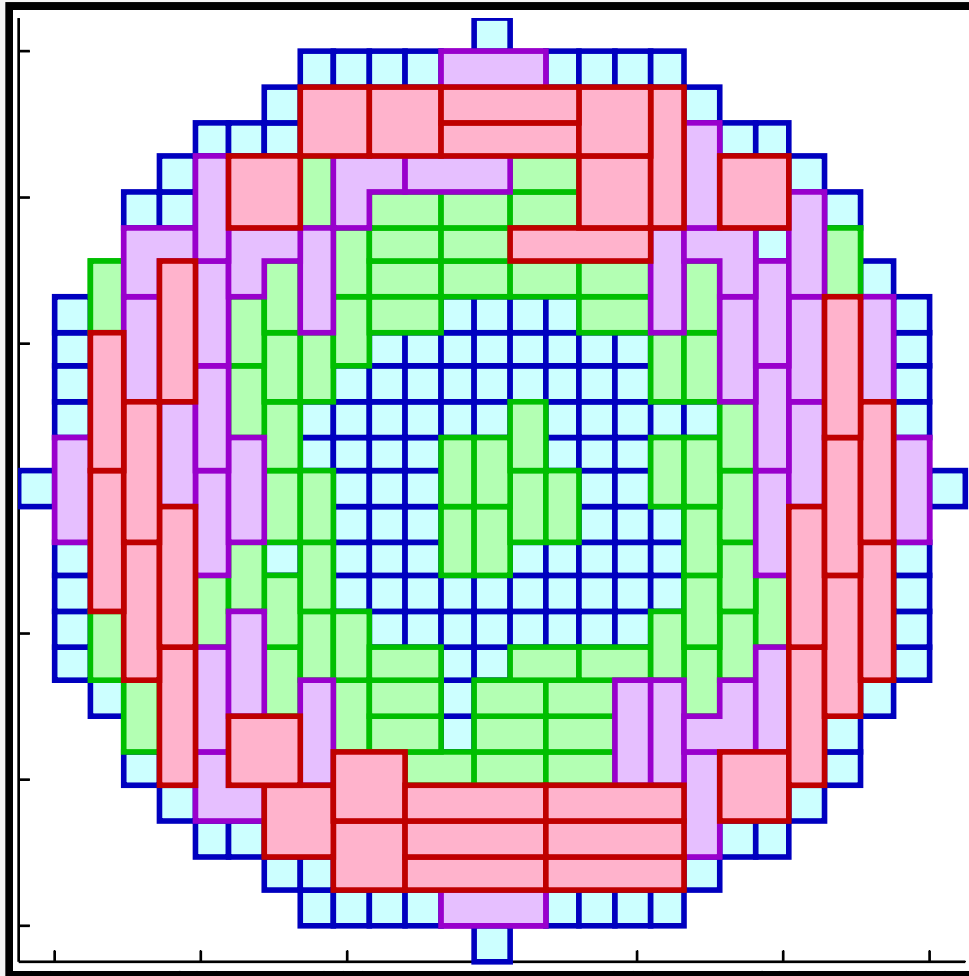
Ant_1 à Ant_{opt}



OPTIMISATION TOPOLOGIQUE



Antenne optimisée Ant_{opt} 284 ER



	Ant_0	Ant_{opt}
Nombre d'ER	529	284

- 46%

➤ **Remarque**

Les ingénieurs Thalès ont demandé un regroupement des Erel du bord de l'antenne ➔

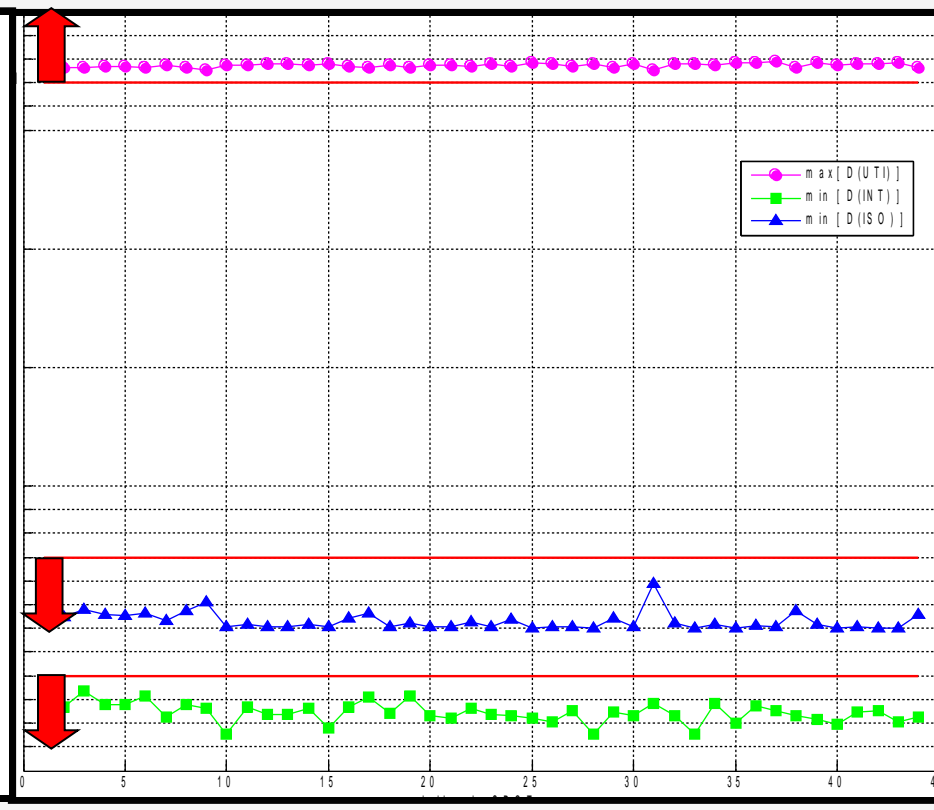
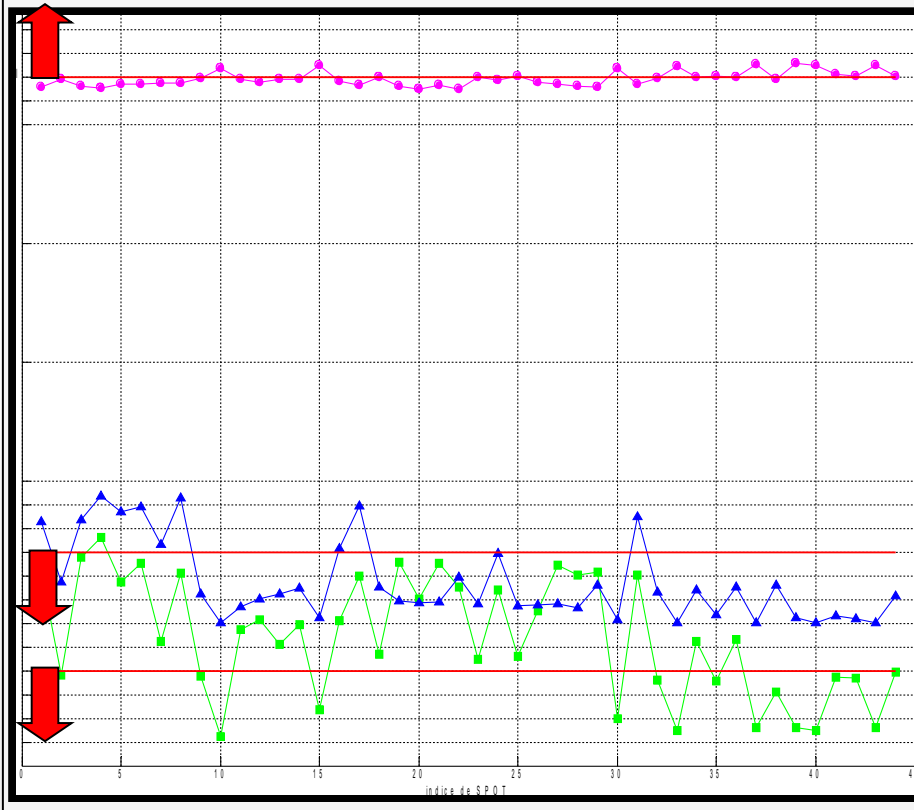
Ant_{opt2}
à 250 ER

VALIDATION de l'ANTENNE OPTIMALE

- Performances de directivité: alimentions optimales sur tous les spots

Antenne de départ Ant_0 529 ER

Antenne optimisée Ant_{opt2} 250 ER



PLAN de l'exposé

I Etude de fiabilité d'une chaîne de calcul**II** Conception d'une antenne spatiale**1** Problèmes à résoudre**2** Méthode utilisée**3** Cas test à 9 paramètres**4** Cas test à 30 paramètres**5** Conclusion**1** Données du problème**2** Calcul des alimentations optimales**3** Optimisation topologique**4** Conclusion

1^{er} problème: CALCUL des ALIMENTATIONS OPTIMALES

❖ Difficulté

● **Problème d'optimisation difficile** avec de nombreux minima locaux

❖ Idées clés

➤ Réduire la non-linéarité

➔ Optimiser par rapport aux **parties réelles et imaginaires** de a

➤ Reformuler le problème initial

Conservation de l'énergie ➔ Problème d'**optimisation convexe**

❖ Algorithme proposé

● **Rapide** ➔ Optimum en **20 itérations**

● **Robuste** ➔ **Performances réalisées**
pour tous les spots avec de la marge

2^{ème} problème: OPTIMISATION TOPOLOGIQUE

❖ Difficultés

➤ **Pas de méthode automatique connue** pour réduire le nombre d'ER

➤ **Contraintes industrielles** ➔ Peu de formes d'ER possibles

❖ Idées clés

➤ **Suppression de la contrainte sur les modules** ➔ **Modules optimaux**
➔ **Critère** basé sur la **puissance des ER regroupés**

● **Réduction de l'information** ➔ **SVD**

● **Fonction coût** ➔ **Type gradient topologique**

❖ Algorithme proposé

● **Antenne optimale** ➔ ● **Réduction de la complexité**
(nombre d'ER divisé par deux)
● **Performances améliorées**

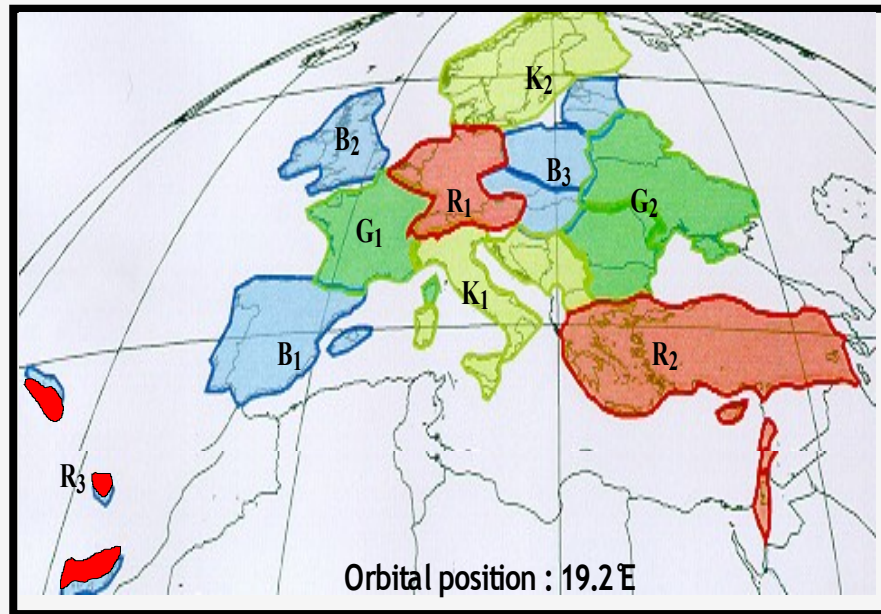
➤ Dans le cadre du **projet OTOP**

➤ Création d'un **logiciel d'aide à la conception** ➔ Collaboration **Ansys**

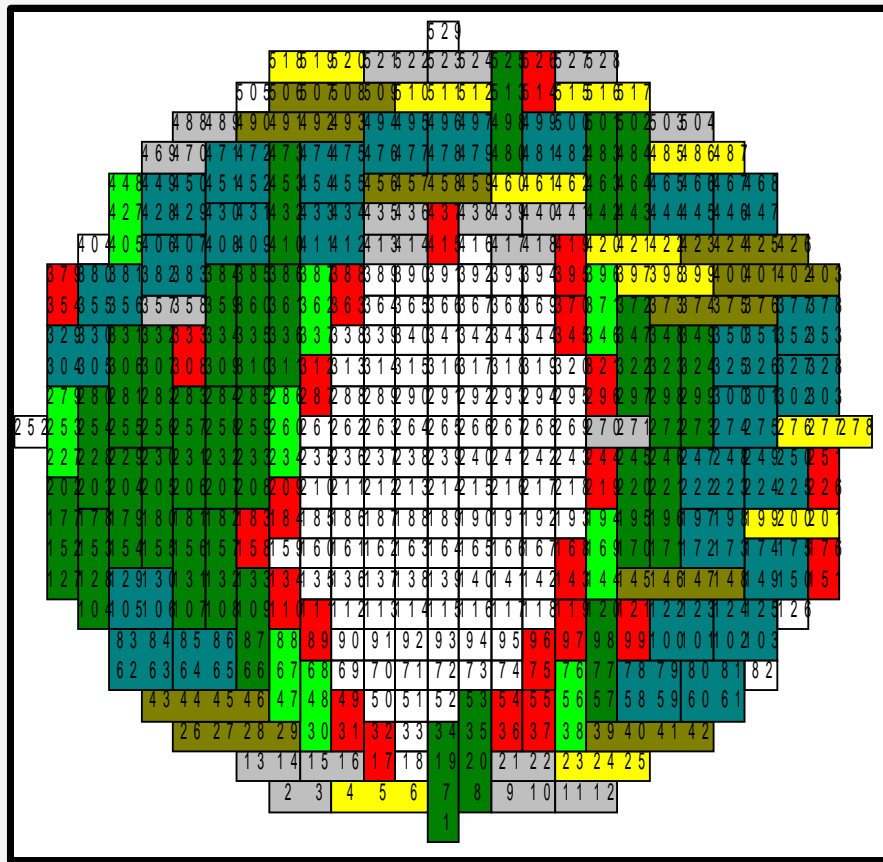
CAS TEST THALES

► Algorithme topologique testé sur une couverture linguistique ➡ Spots irréguliers

Couverture



Antenne optimale 248 ER



⊕ Performances validées

	Ant ₀	Ant _{opt}
Nombre d'ER	529	248

- 53%

► Code OTOP intégré au sein de la bibliothèque de calcul du département Antennes de Thalès



Merci
pour votre attention