

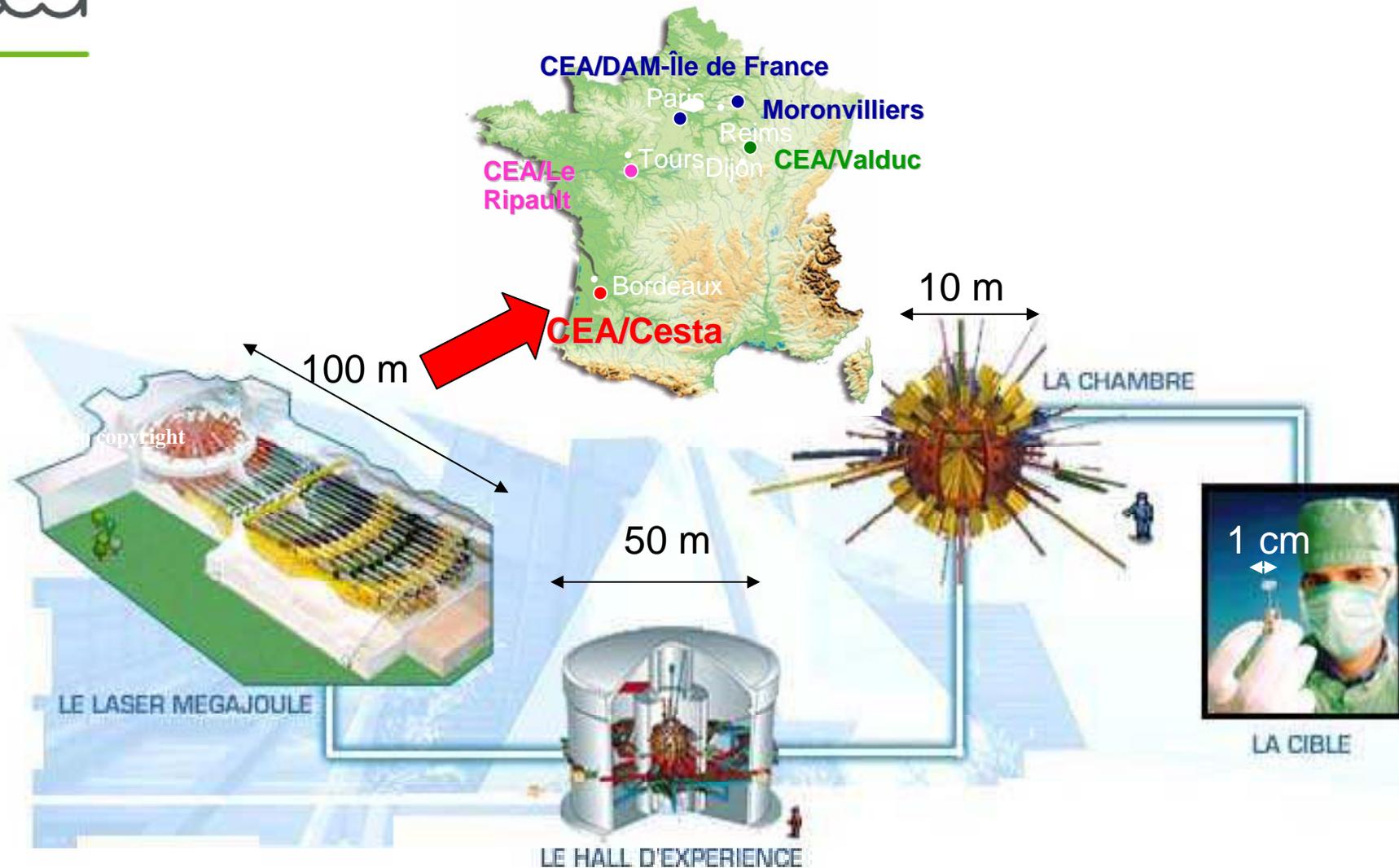


Apport des méthodes de plan d'expériences pour l'évaluation de la robustesse de la cible LMJ

F. Poggi, R. Quach et J. Giorla

CEA/ DAM - Ile de France

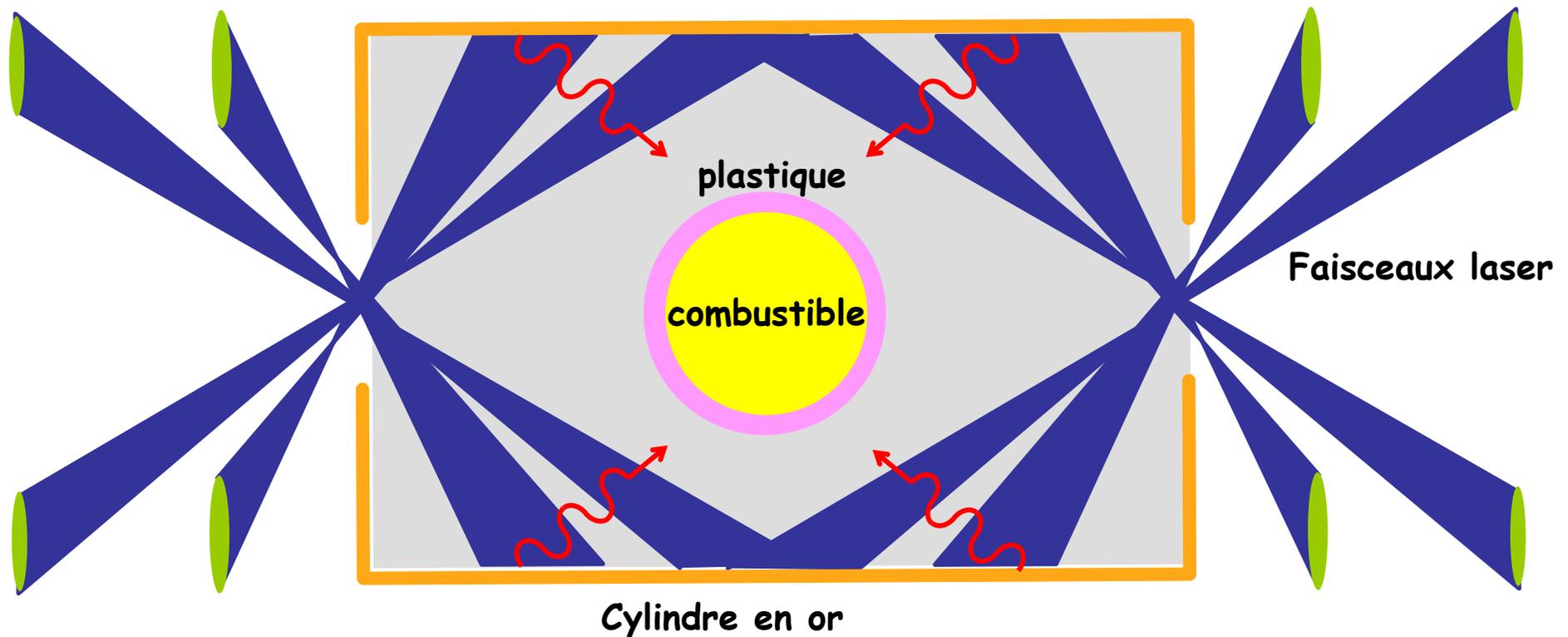
La DAM dimensionne des expériences qui seront réalisées sur le laser Mégajoule pour reproduire, dans des microquantités de matière fusible, le processus physique de la fusion et les conditions similaires à celles rencontrées dans le fonctionnement d'une arme nucléaire.



Ces expériences, simulées numériquement, sont basées sur le principe de la fusion par confinement inertiel en attaque indirecte.



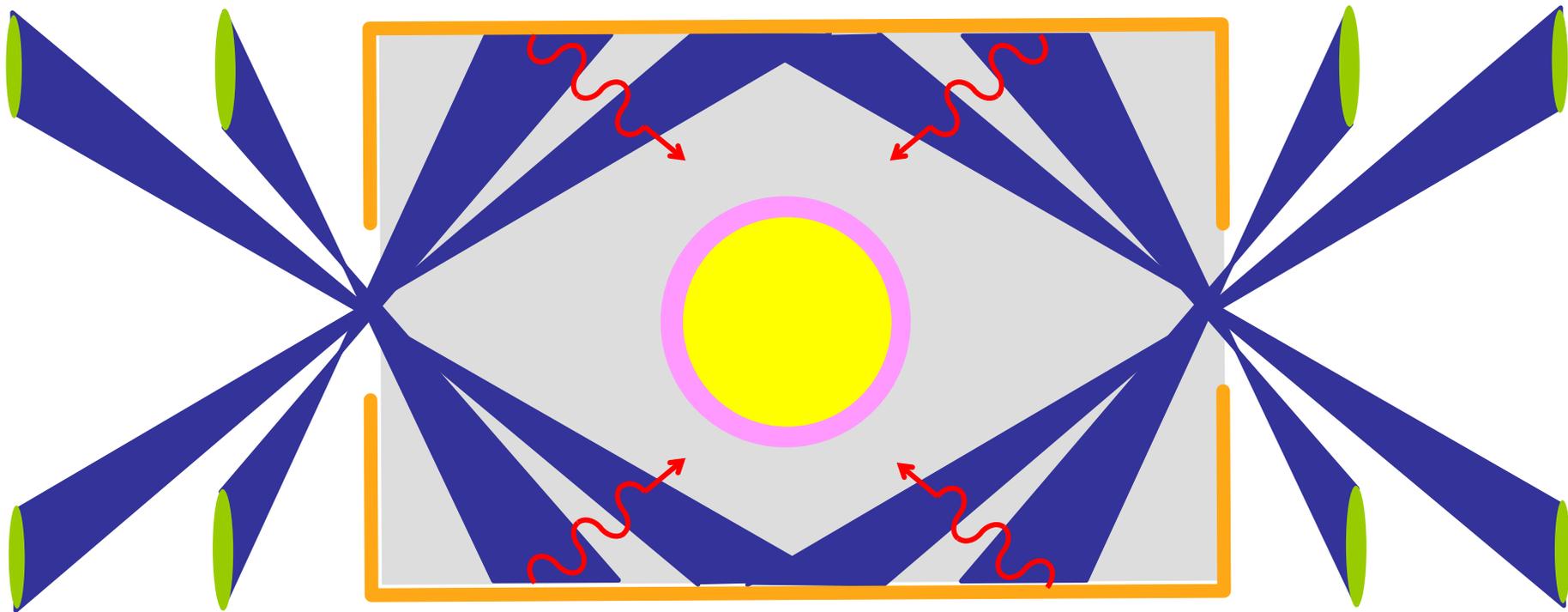
Chauffage par rayonnement X



Ces expériences, simulées numériquement, sont basées sur le principe de la fusion par confinement inertiel en attaque indirecte.



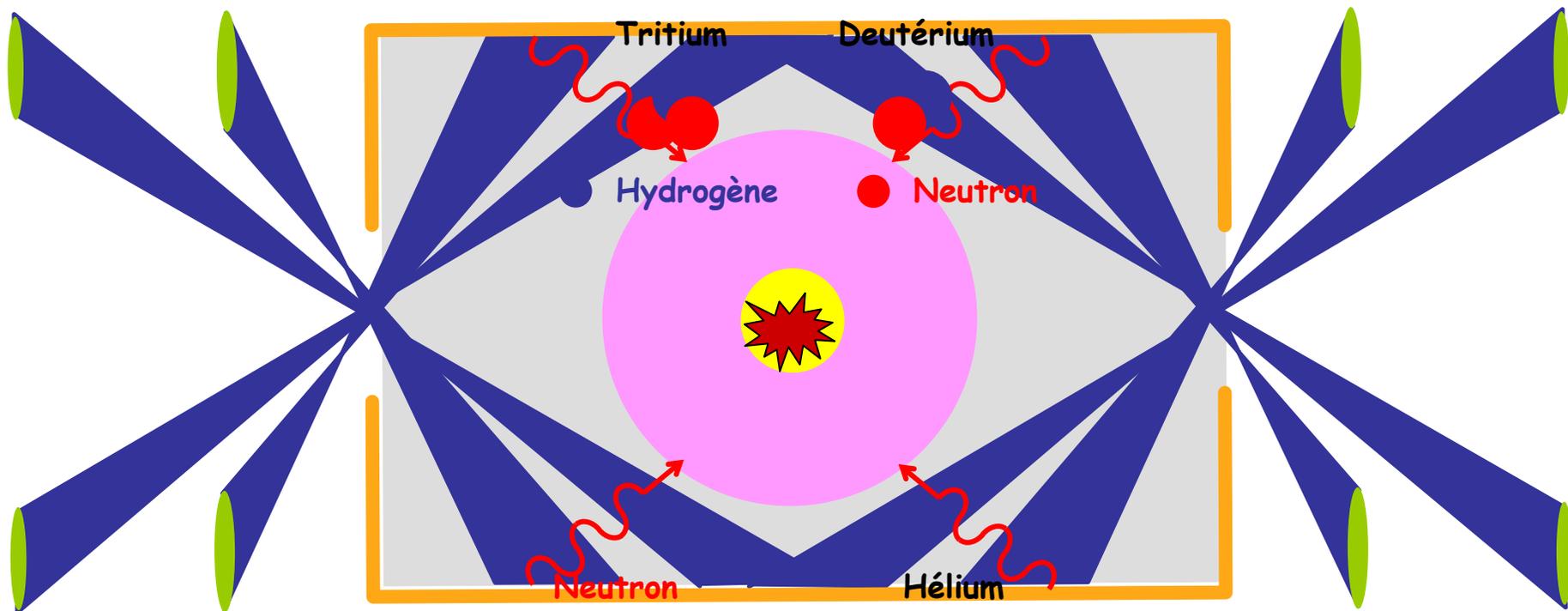
Compression par effet fusée



Ces expériences, simulées numériquement, sont basées sur le principe de la fusion par confinement inertiel en attaque indirecte.



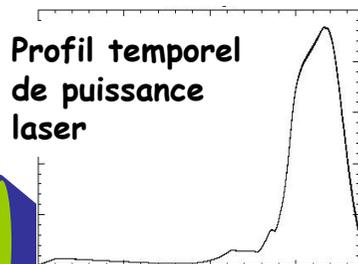
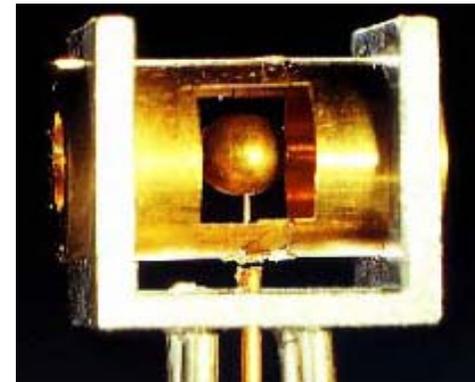
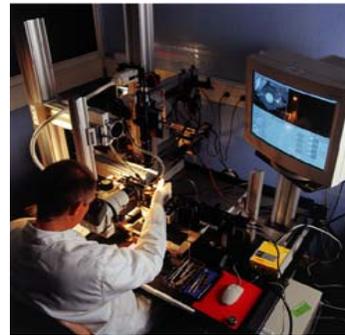
Ignition et gain en énergie



Les cibles à gain sont dimensionnées pour fonctionner malgré une certaine dégradation des conditions optimales d'implosion due aux imperfections de fabrication des cibles et de réglage du laser.

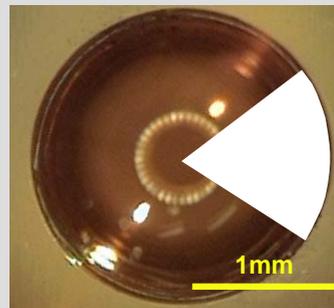
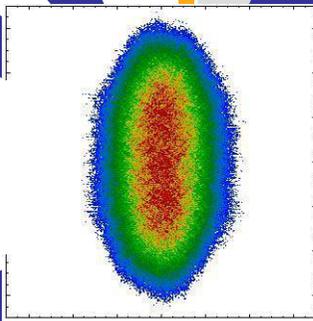


240 faisceaux laser
Energie par faisceau : 7,5 kJ
Durée d'impulsion : 20 ns
Précision de pointage : 50 μ m



10 mm

Coupe du point focal d'un quadruplet laser



DT gaz
0,001 mg

Ablateur

DT
cryogénique
0,308 mg

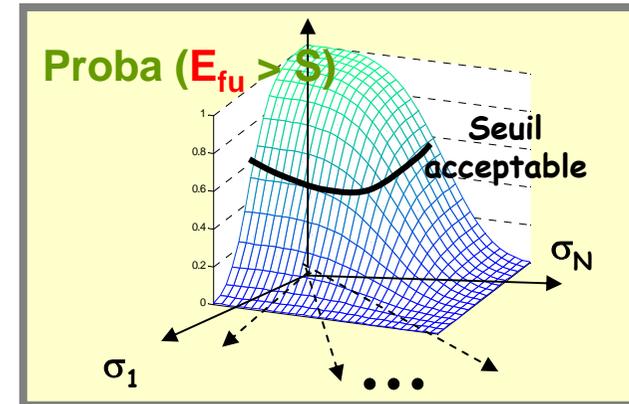
6 mm

L'étude de robustesse doit spécifier les tolérances technologiques propres à garantir le fonctionnement des cibles.



Question **A** :

Quels écarts-types sur les paramètres technologiques conduisent à une probabilité acceptable que l'énergie de fusion dépasse un seuil donné?

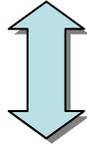


L'étude de robustesse doit spécifier les tolérances technologiques propres à garantir le fonctionnement des cibles.



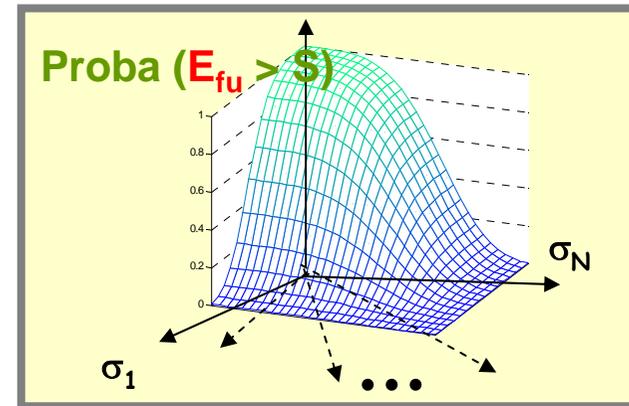
Question A :

Quels écarts-types sur les paramètres technologiques conduisent à une probabilité acceptable que l'énergie de fusion dépasse un seuil donné?



Question B :

Comment varie cette probabilité en fonction du jeu d'écart-types?



L'étude de robustesse doit spécifier les tolérances technologiques propres à garantir le fonctionnement des cibles.



Question A :

Quels écarts-types sur les paramètres technologiques conduisent à une probabilité acceptable que l'énergie de fusion dépasse un seuil donné?



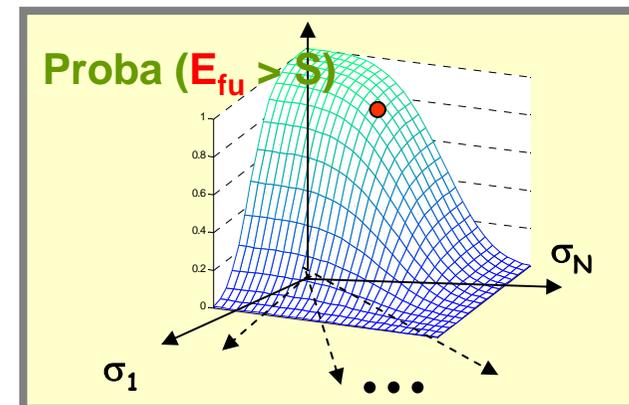
Question B :

Comment varie cette probabilité en fonction du jeu d'écart-types?



Question C :

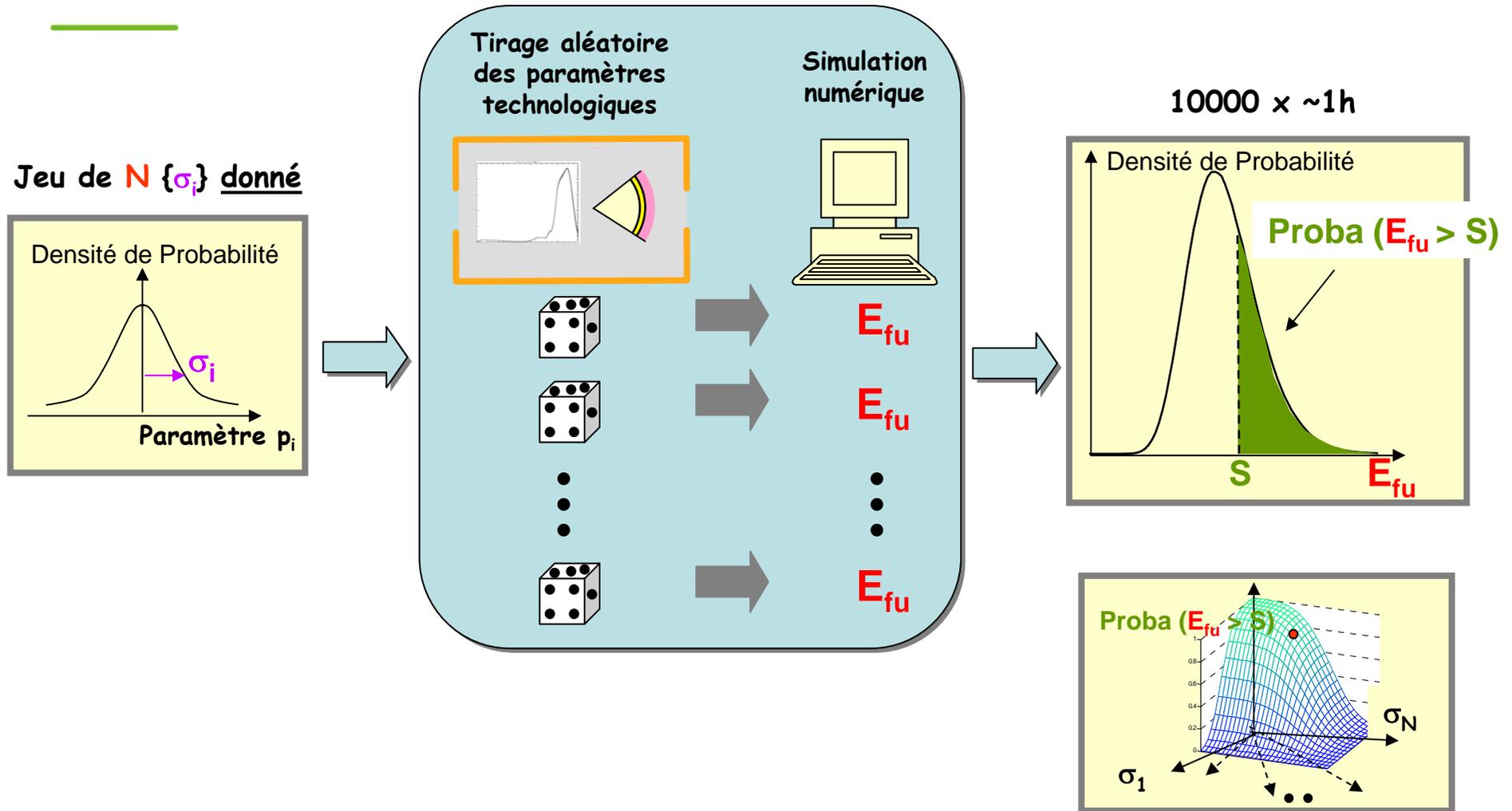
Combien vaut cette probabilité pour un jeu donné d'écart-types?





Question C :

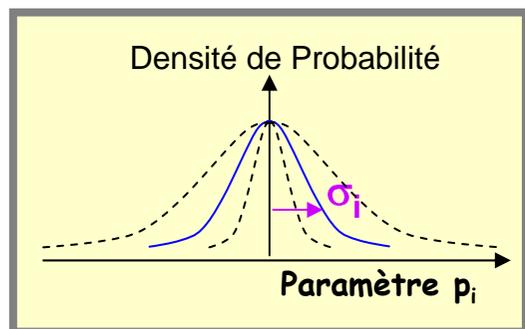
Quelle est la probabilité que l'énergie de fusion dépasse un seuil donné pour un jeu fixé d'écart-types associés aux paramètres technologiques?



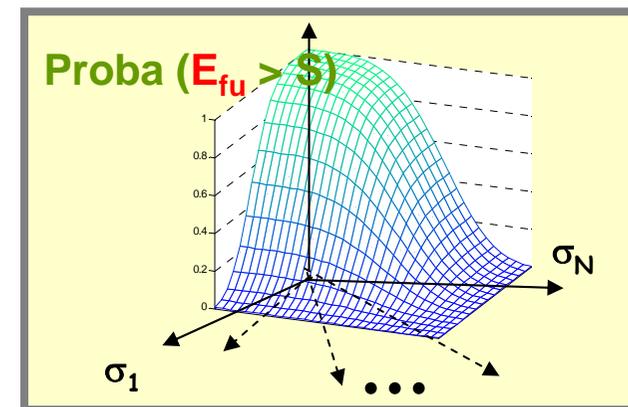


Question B :

Comment varie la probabilité que l'énergie de fusion dépasse un seuil donné en fonction des écarts-types associés aux paramètres technologiques?

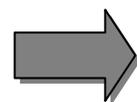


Jeux de N { σ_i }

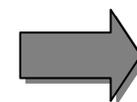


Espace de dimension N !

En 1D, N > 20



Nombre prohibitif de simulations numériques



Réponses aux questions B et A inaccessibles...

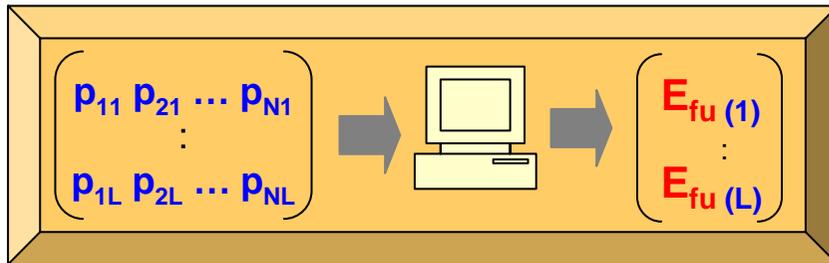
~1000 x 10000 x ~1h



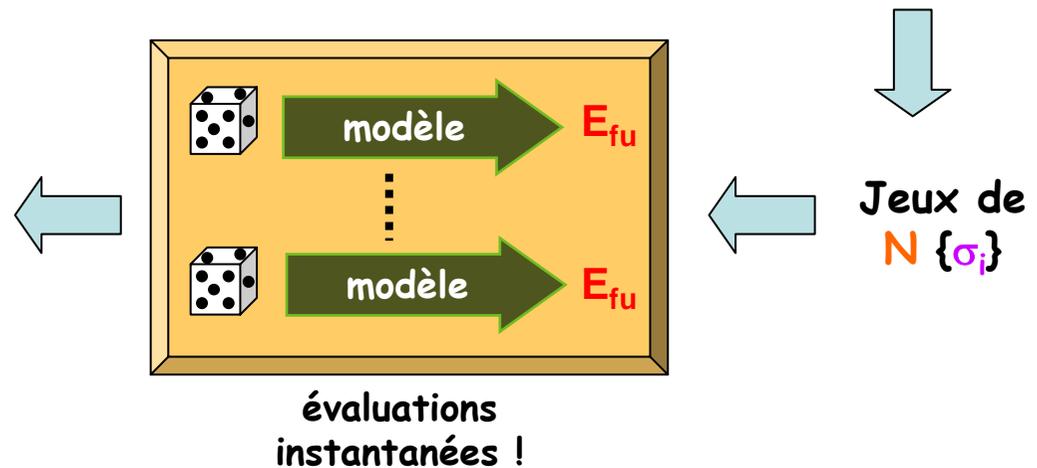
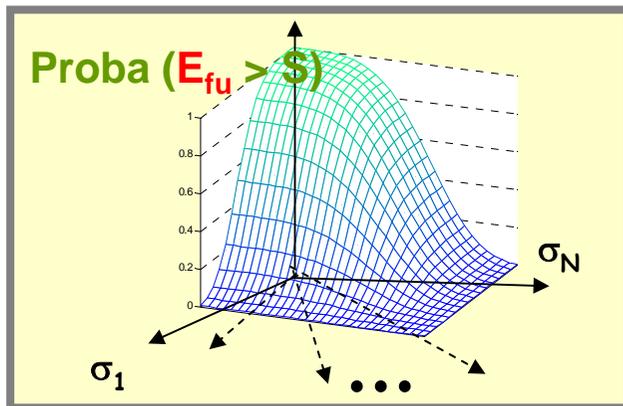
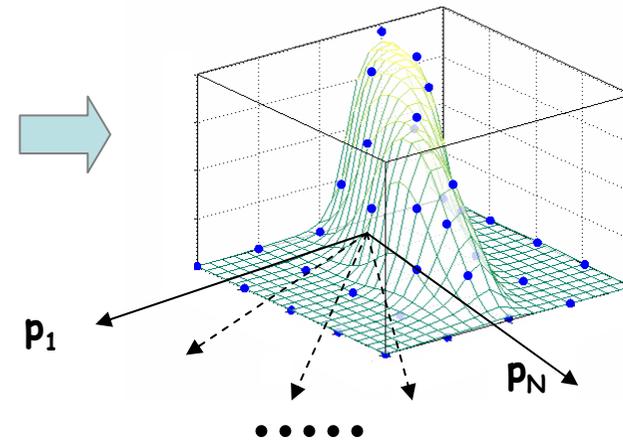
En modélisant la réponse du code de calcul 1D sur un domaine de variation réaliste des paramètres, on a accès, avec relativement peu de simulations, aux probabilités que $E_{fu} > \text{Seuil}$ pour un large panel d'écart-types.

Méthode des Plans d'expériences

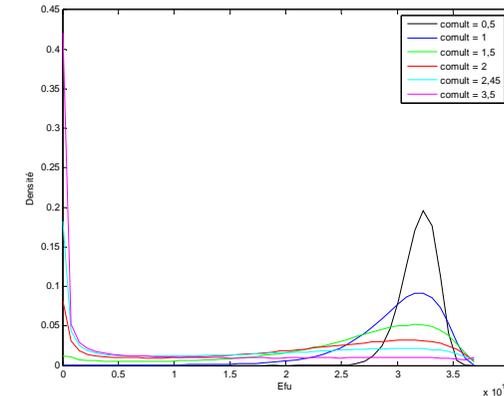
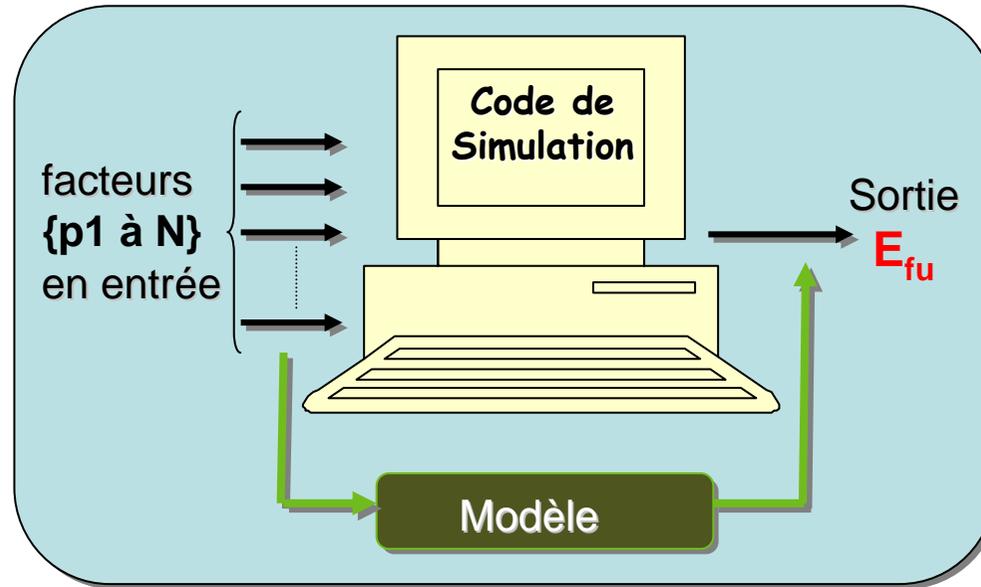
$$E_{fu} = \text{modèle } \{p_1 \text{ à } N\}$$



2000 x ~1h



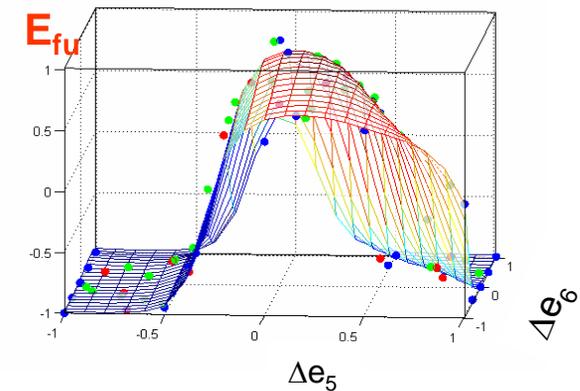
La modélisation empirique de l'énergie de fusion donnée par le code de calcul en fonction de nombreux paramètres 1D est un problème particulièrement difficile.



1- Problème dans un espace à **haute dimension**: *22 paramètres*

2- Phénomène à **événements rares**: *non-uniformité de la distribution des réponses*

3- Surface de **réponse complexe** : *à seuil, fortement non-linéaire, plateaux à faibles valeurs*



La complexité du système étudié nous a conduit à adapter et à tester une méthode spécifique pour l'élaboration d'un modèle empirique de la réponse.

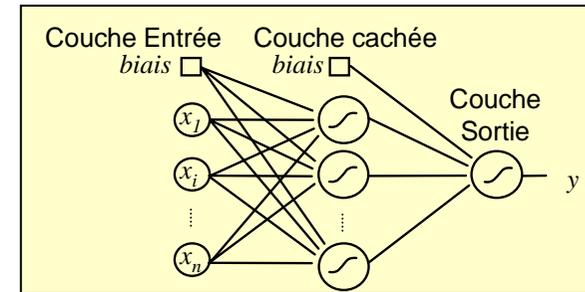


Modèle Réseaux de Neurones :

- ❑ *Perceptron à une couche cachée*
- ❑ *Adapté à la forte non linéarité de E_{fu}*
- ❑ *Gestion des plateaux à faibles valeurs*

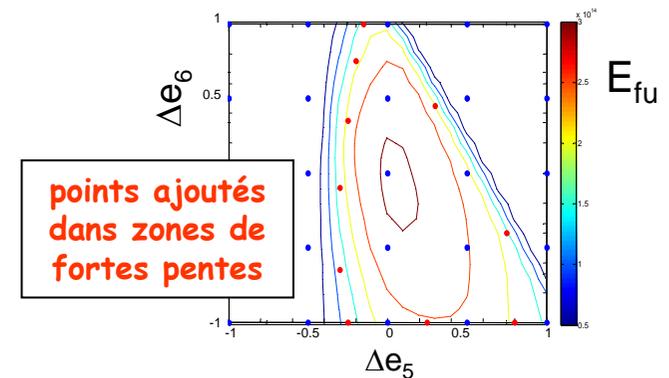
Perceptron à une couche cachée = approximateur universel

$$y(x, B) = \tanh(b_1 + b_2 \tanh(b_3 + b_4 x_1 + b_5 x_2 + \dots + b_{k-1} x_n) + \dots + b_k \tanh(b_{k+1} + b_{k+2} x_1 + \dots) + \dots)$$



Méthode itérative de construction du Plan d'Expériences :

les points nouveaux sont ajoutés à chaque itération au moyen d'un critère pour combler efficacement les « manques ».

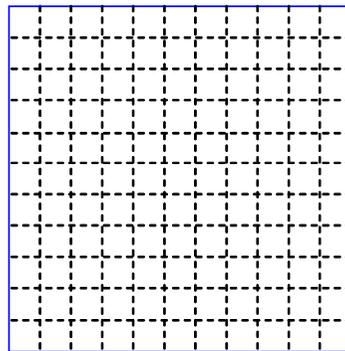


Etapes de la modélisation de l'énergie de fusion :
1. Exploration du domaine d'étude

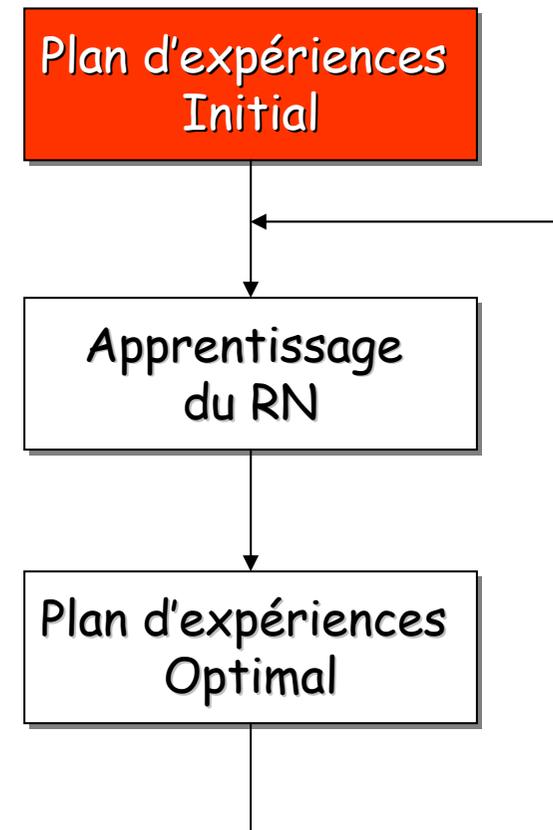


400 calculs utilisés pour des études préliminaires

Latin Hyper Cube



*Stratifier en
plusieurs
niveaux*



Etapes de la modélisation de l'énergie de fusion :

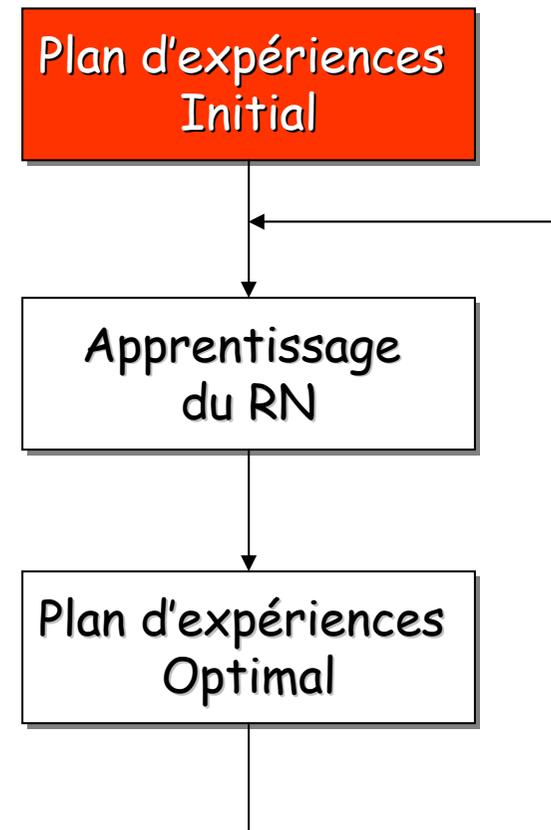
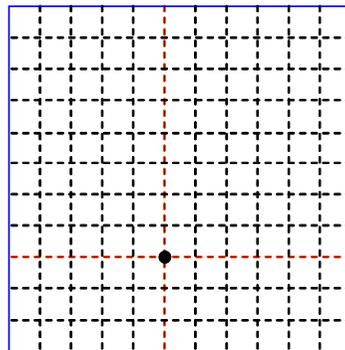
1. Exploration du domaine d'étude



400 calculs utilisés pour des études préliminaires

Latin Hyper Cube

Ajouter un 1^{er} point et éliminer la ligne et la colonne correspondante



Etapes de la modélisation de l'énergie de fusion :

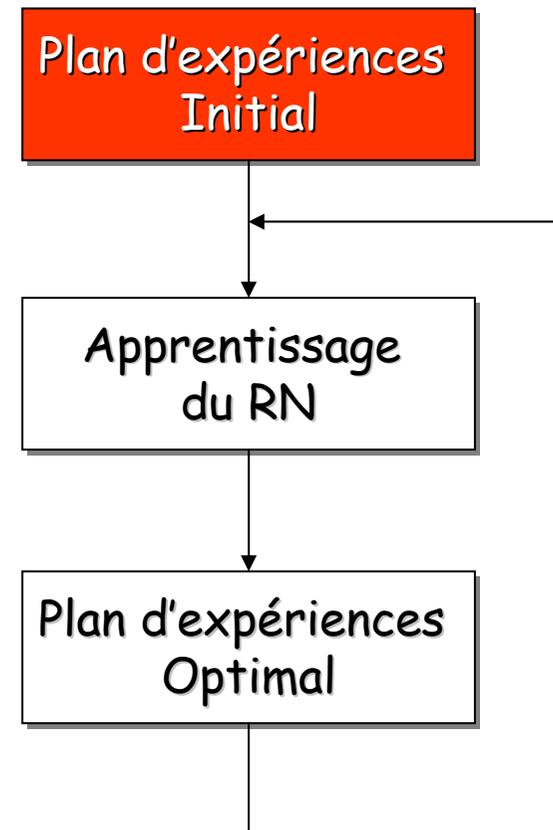
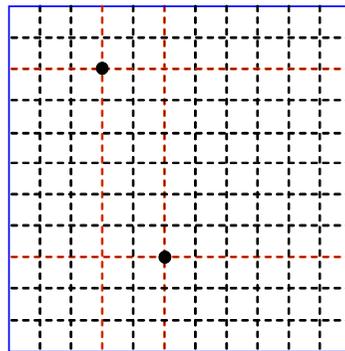
1. Exploration du domaine d'étude



400 calculs utilisés pour des études préliminaires

Latin Hyper Cube

Ajouter un 2nd point et éliminer la ligne et la colonne correspondante
...



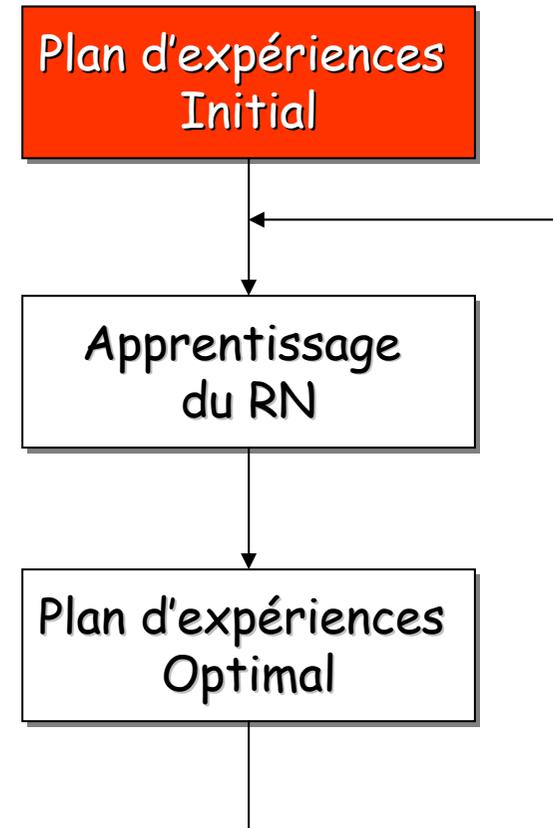
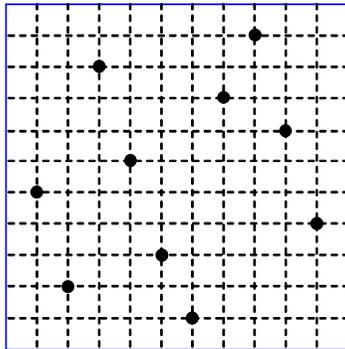
Etapes de la modélisation de l'énergie de fusion :
1. Exploration du domaine d'étude



400 calculs utilisés pour des études préliminaires

Latin Hyper Cube

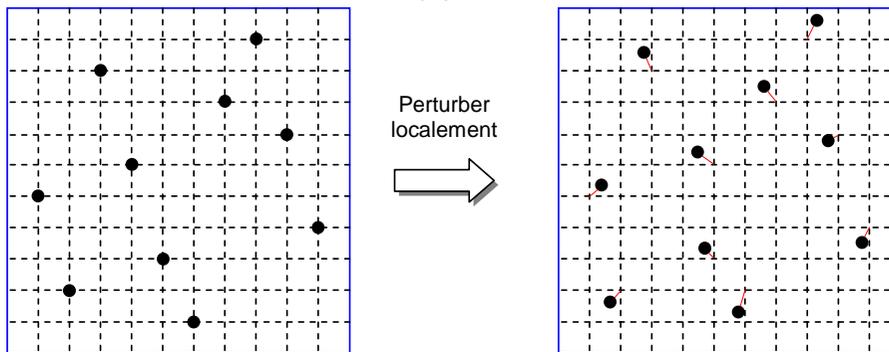
*Ainsi de suite...
Améliorer
l'uniformité en
maximisant la
distance
minimale*



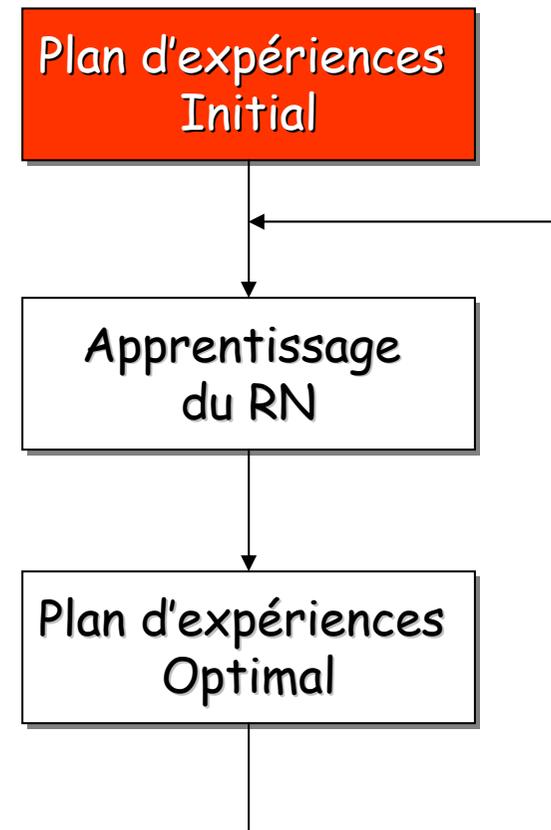
Etapes de la modélisation de l'énergie de fusion :
1. Exploration du domaine d'étude



400 calculs utilisés pour des études préliminaires
Latin Hyper Cube



Pour ajouter le caractère aléatoire de l'exploration



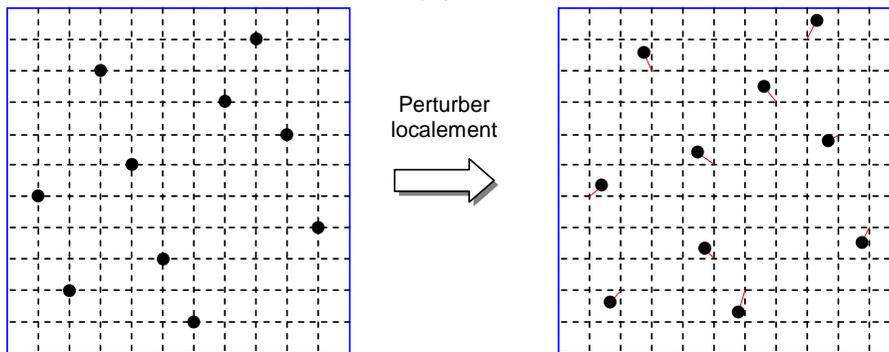
Etapes de la modélisation de l'énergie de fusion :

1. Exploration du domaine d'étude

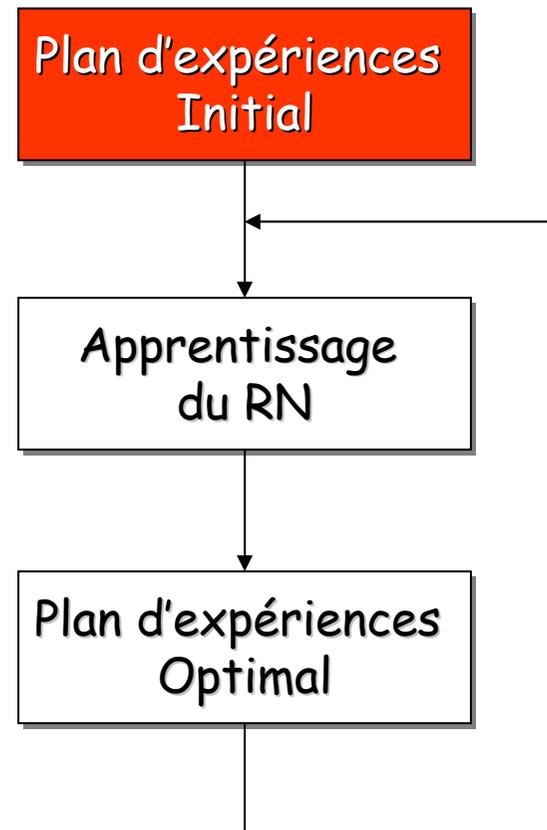
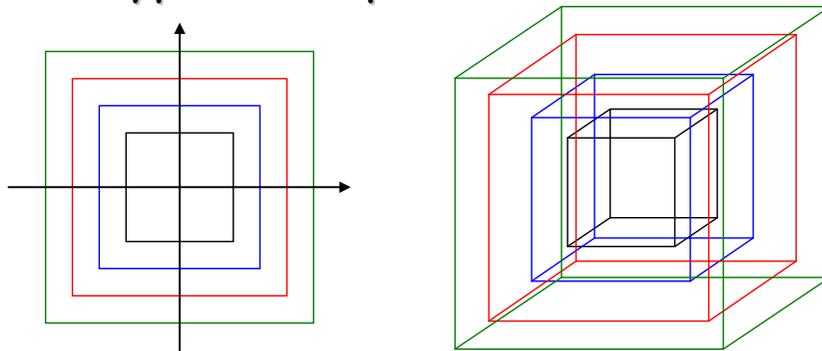


400 calculs utilisés pour des études préliminaires

Latin Hyper Cube



Latins Hyper Cube par couche 500 calculs

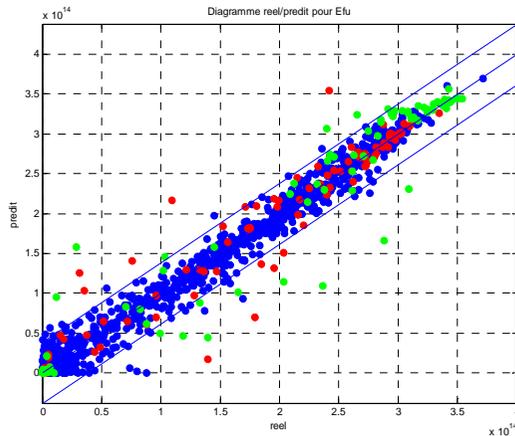


Etapes de la modélisation de l'énergie de fusion :

2. Apprentissage et généralisation

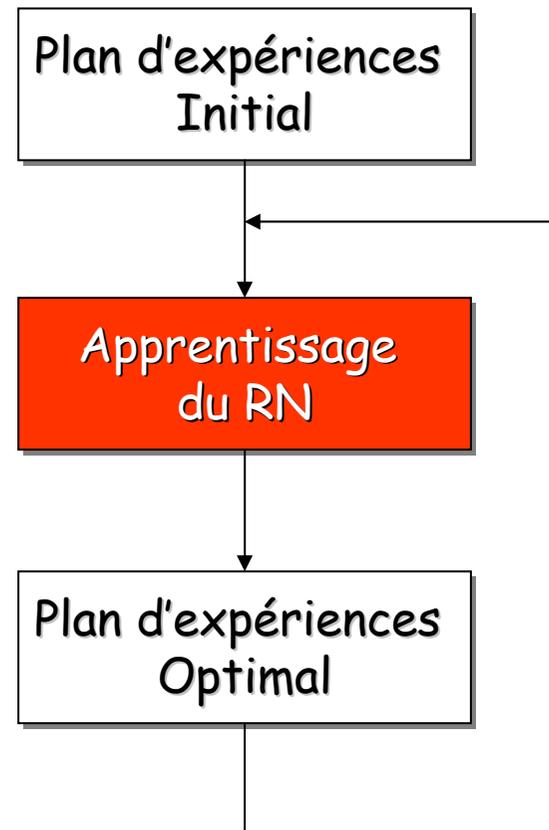


150 calculs de validation



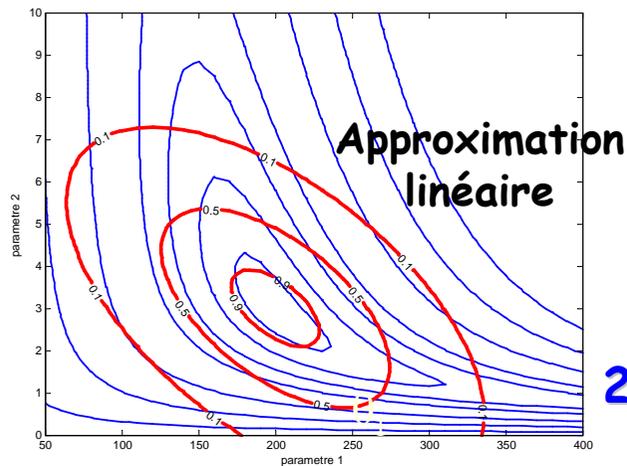
150 calculs de test

Réglage des poids
du Perceptron

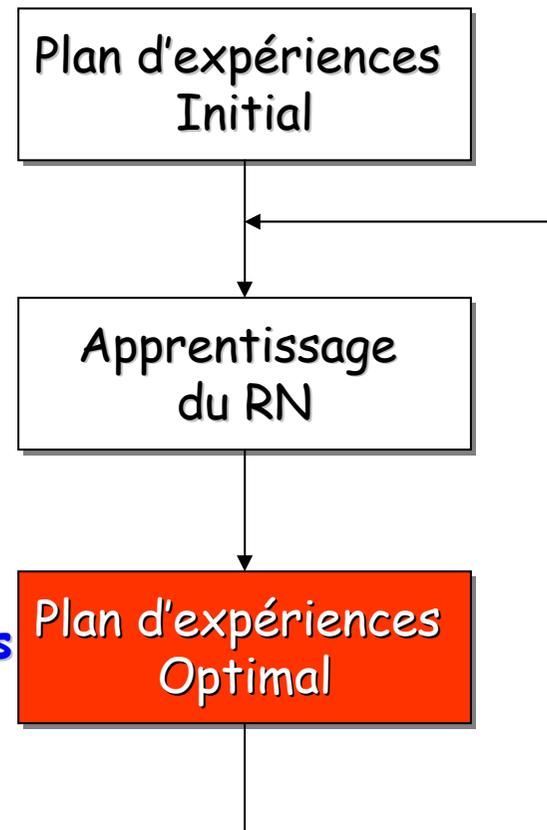


Etapes de la modélisation de l'énergie de fusion :

3. Critère de D-optimalité



2 x 400 calculs



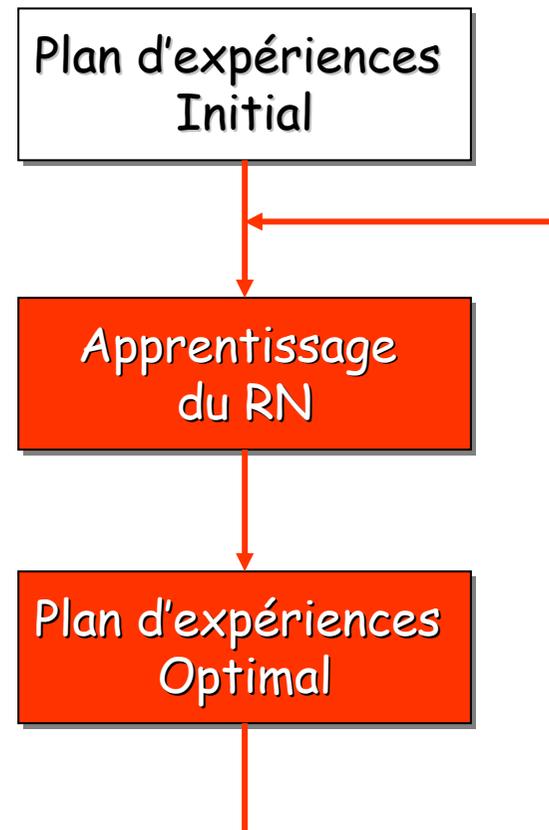
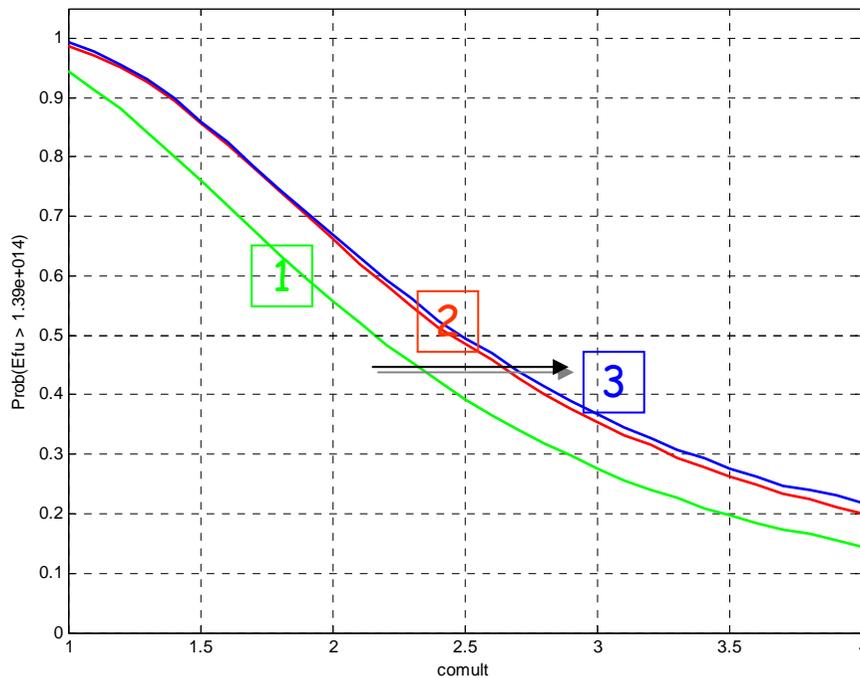
Minimiser la région de confiance des paramètres

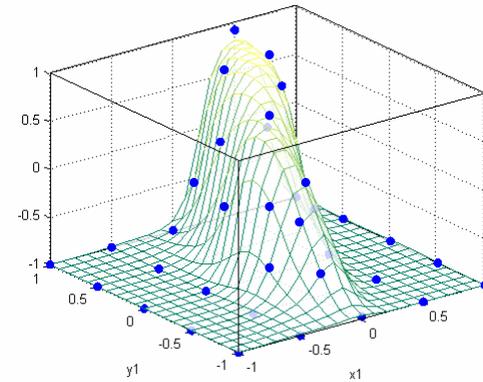
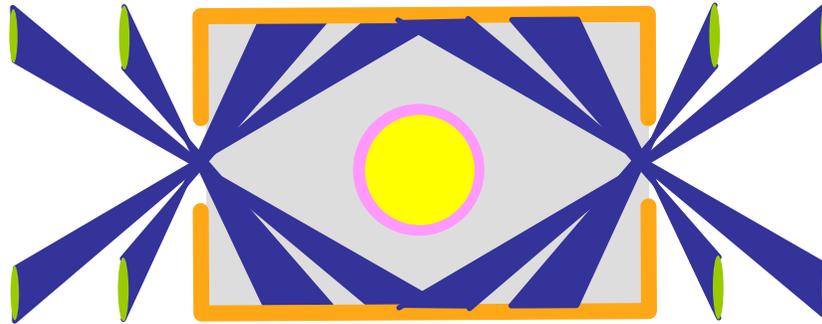
La précision du modèle est jugée sur le critère de convergence de la probabilité d'atteinte de l'ignition



Au total ~ 2000 calculs

Convergence de Prob($E_{fu} > S$)





Modélisation empirique du fonctionnement 1D des cibles à gain – intérêt du recours aux plans d'expériences :

- **utile** si l'on cherche à évaluer la robustesse 1D **d'une cible nominale** pour **un jeu donné** de tolérances technologiques;
- **indispensable** si l'on veut **spécifier** ces tolérances (dans la limite de la faisabilité expérimentale) **pour optimiser** le niveau de robustesse 1D de la cible dimensionnée.

Etape suivante (en cours) :

- **optimisation** des **valeurs nominales** de dimensionnement 1D des cibles pour garantir la meilleure robustesse avec **un jeu donné** de tolérances technologiques...
- prise en compte des **incertitudes** sur les paramètres **physico-numériques...**