
Analyse de sensibilité globale en simulation numérique du soudage

Matthieu PETELET

bénéficiaire d'un contrat de thèse
CEA - Région Bourgogne - Université (CTCR)

encadrant CEA : Olivier ASSERIN (DM2S/SEMT/LTA – Saclay)
directeur de thèse : Alexandre LOREDO (univ. Bourgogne)

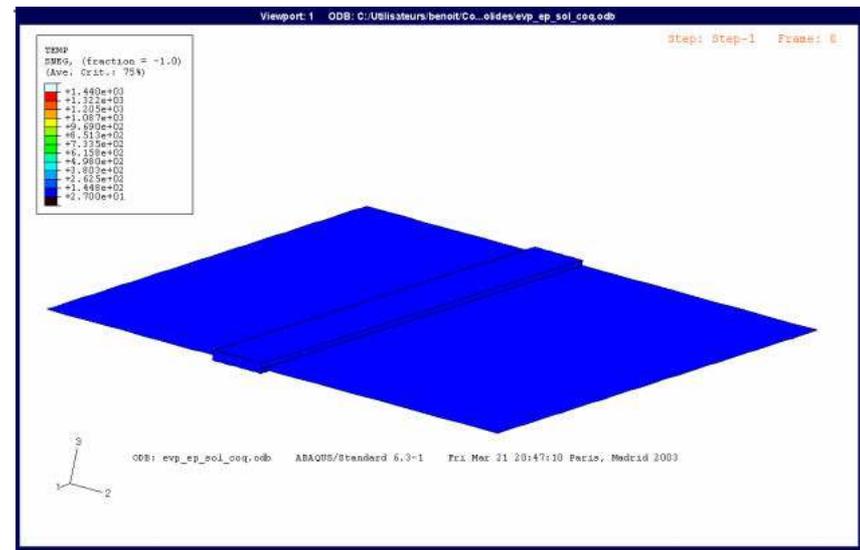
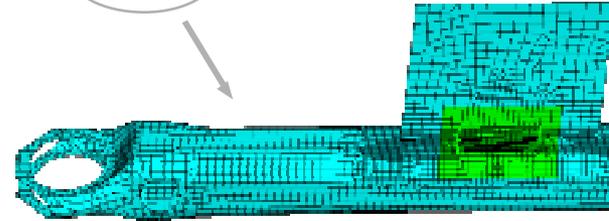
Contexte : simulation numérique du soudage (SNS)



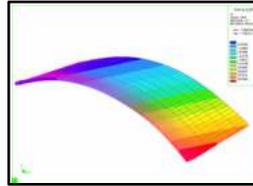
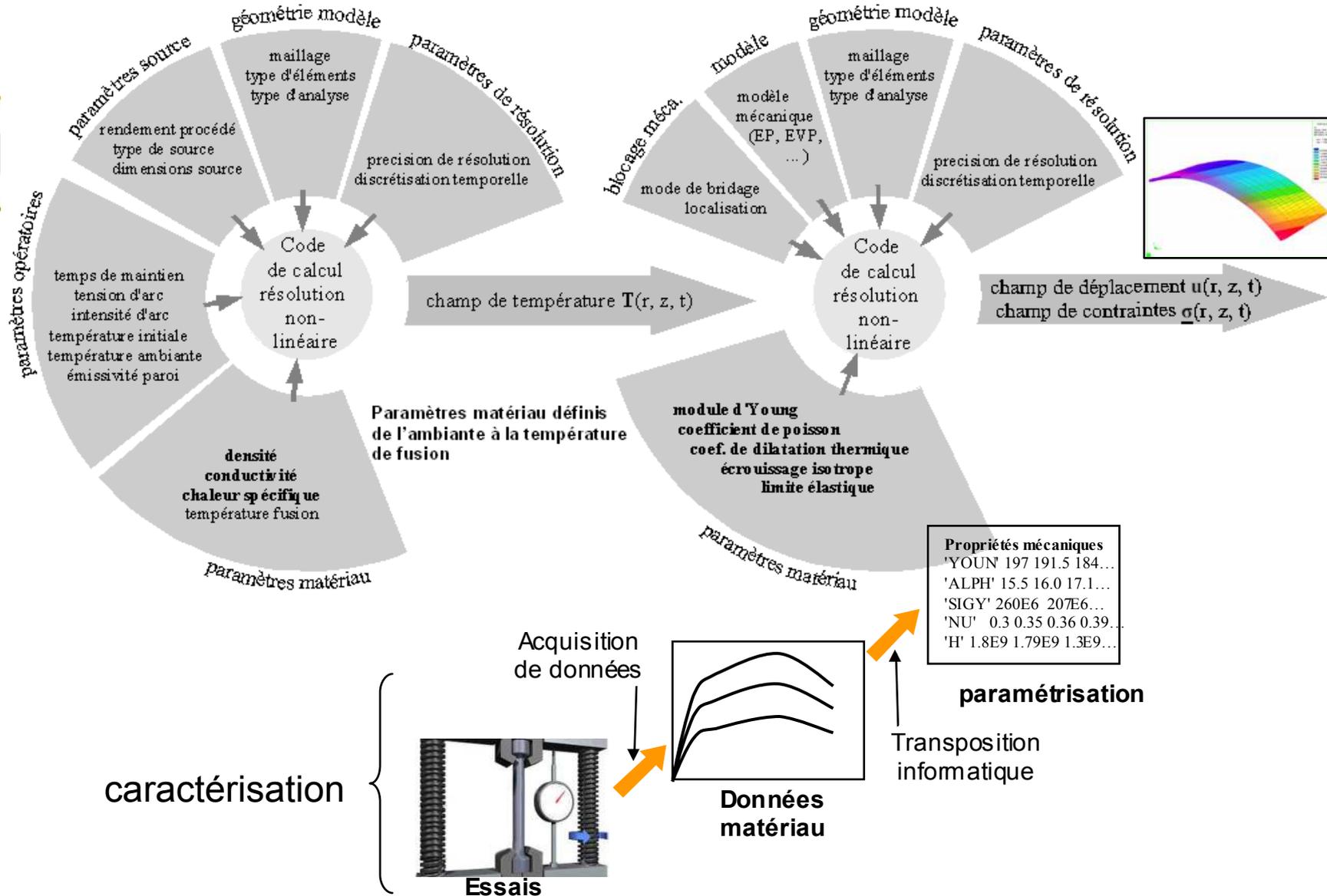
PRISMECA
INGENIERIE CONSEIL

RENAULT

CENTRALE
PARIS mssmat



Simulation Numérique du Soudage



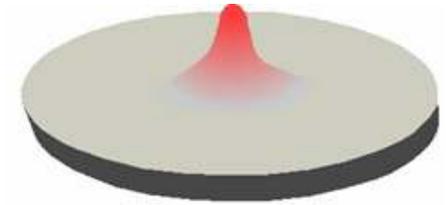
Simulation Numérique du Soudage

- But SNS : évaluer niveau des **distorsions** et **contraintes résiduelles**
- 1 calcul : plusieurs centaines de données d'entrée
- Parmi entrées : propriétés matériau du modèle mécanique
 - partiellement connues
 - identification : longues, coûteuses
 - Conditions d'essai \neq du soudage

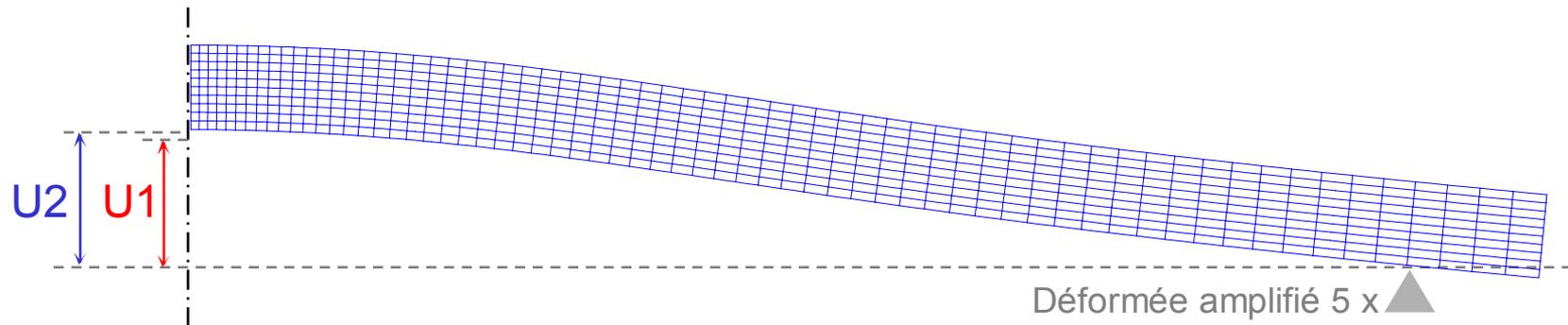
Quel paramètre matériau est-il pertinent de caractériser pour la SNS et dans quel domaine de température ?

Un exemple très surprenant

- Pour un chargement thermique identique,



- Réalisons 2 calculs :
 1. Mise en donnée de référence : comportant 35 paramètres matériau
 2. Mise en donnée modifiée : variation de 20 % pour 32 des 35 paramètres



- $(U2 - U1) / U1 = 0,4 \%$ (9%Cr)
→ de nombreux param. peu utiles pour simuler les distorsions

Analyse de sensibilité de propriétés matériau

- **Entrée** : propriétés matériau
- **Sortie, réponse** : distorsions, contraintes résiduelles



Trois méthodes :

- **Propagation d'incertitudes** : connaître l'intervalle de confiance et/ou la densité de probabilité de la réponse correspondant à l'incertitude des propriétés matériau
- **Analyse de sensibilité locale** : étudier l'impact de petites variations des propriétés matériau, autour d'un matériau donné, sur la valeur de la réponse du code
- **Analyses de sensibilité globale** : identifier les propriétés matériau les plus influentes sur la variabilité des réponses

Analyse de sensibilité Globale

- **SNS : Modèle déterministe, $Y = f(X)$**

X : vecteur des données d'entrée pilotant les propriétés matériau

Y : vecteur de la sortie (distorsion)

- **Analyse de sensibilité entre la réponse et les entrées :**

- **Si relation linéaire**

Coefficient de régression standard, SRC

- **Si relation non-linéaire mais monotone**

Coefficient de régression basés sur les rangs, SRRC

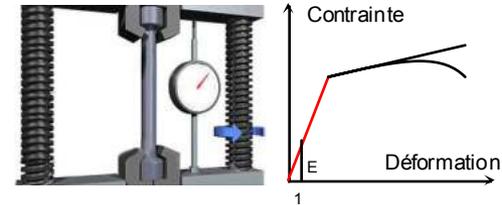
- **Si relation non-linéaire mais monotone**

Indices de Sobol (en utilisant une SR)

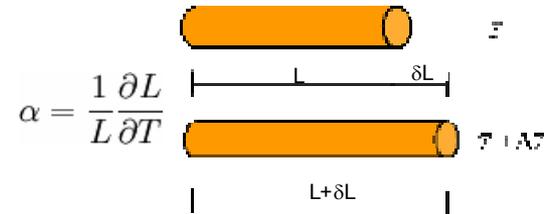
Echantillonnage des propriétés matériau du modèle mécanique

Les entrées du calcul mécanique – modèle EP

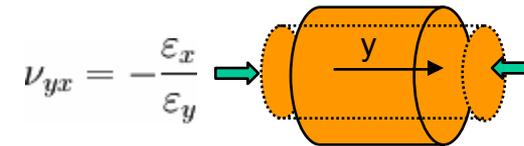
1. Module de Young



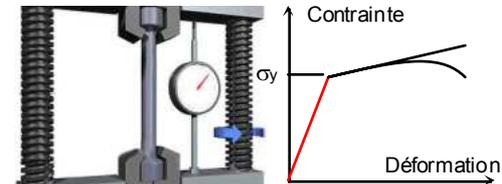
2. Coefficient de dilatation thermique



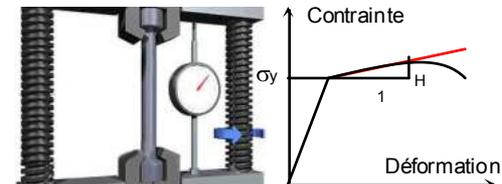
3. Coefficient de poisson



4. Limite d'élasticité



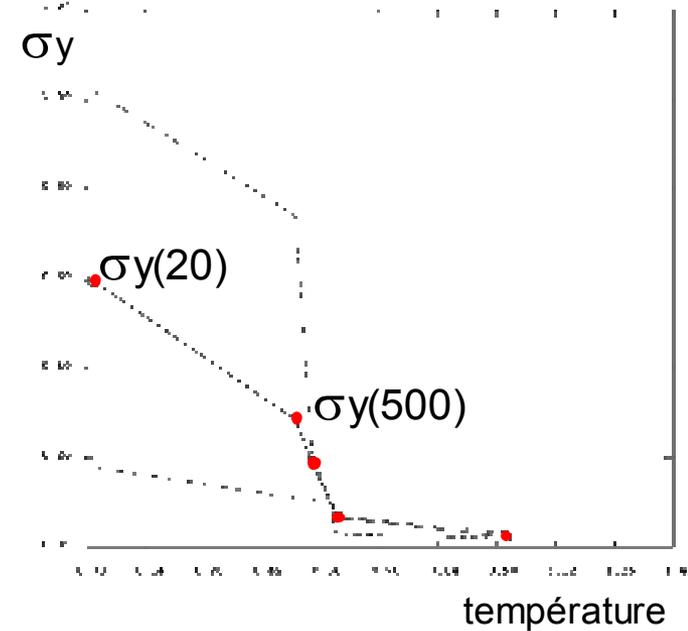
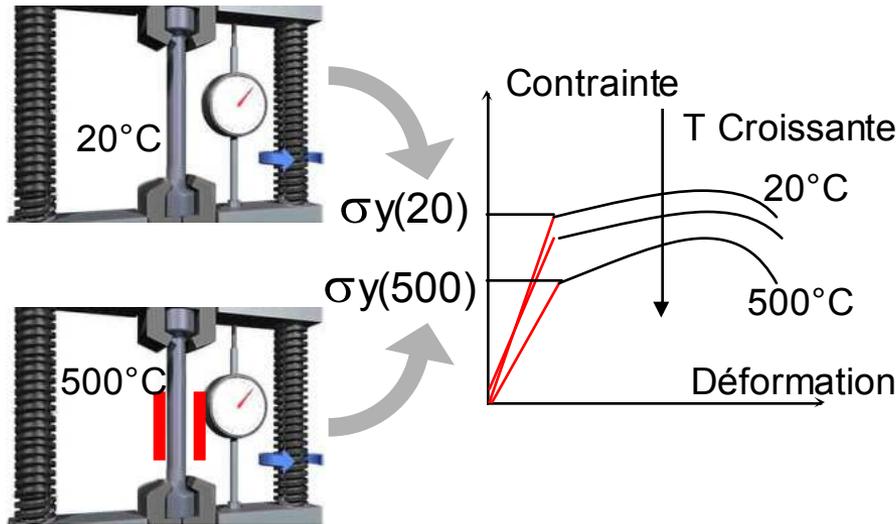
5. Coefficient d'écrouissage



Les propriétés matériau dépendent de la température



Exemple de la limite élastique



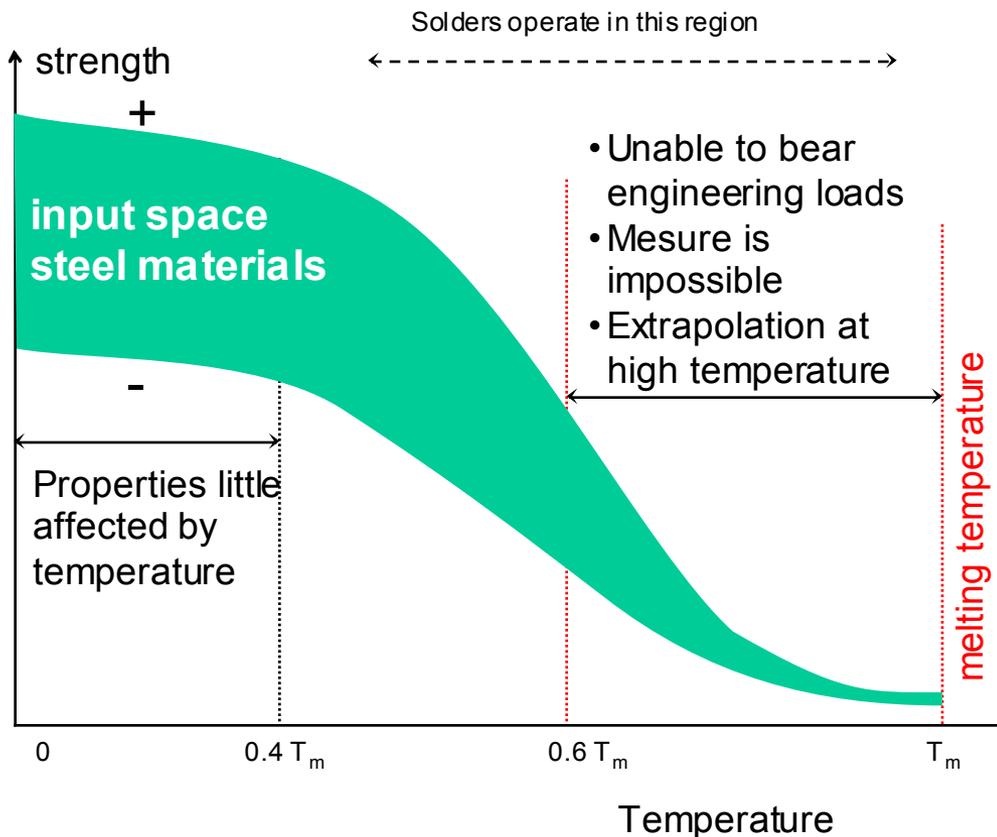
Identification pour différentes températures

Evolution paramétrée en fonction de la température

➤ Chaque propriétés matériau définie selon la température

Définition du domaine matériau

- Identification pour chaque propriétés matériau d'un niveau haut et d'un niveau bas caractéristiques du domaine matériau des aciers
- Sources : bases de données matériau, bibliographie



Alternatives pour générer les propriétés matériau

- Paramétrisation de chaque propriété matériau, ex :

$$\text{SIGY} = f (a, b, c, T)$$

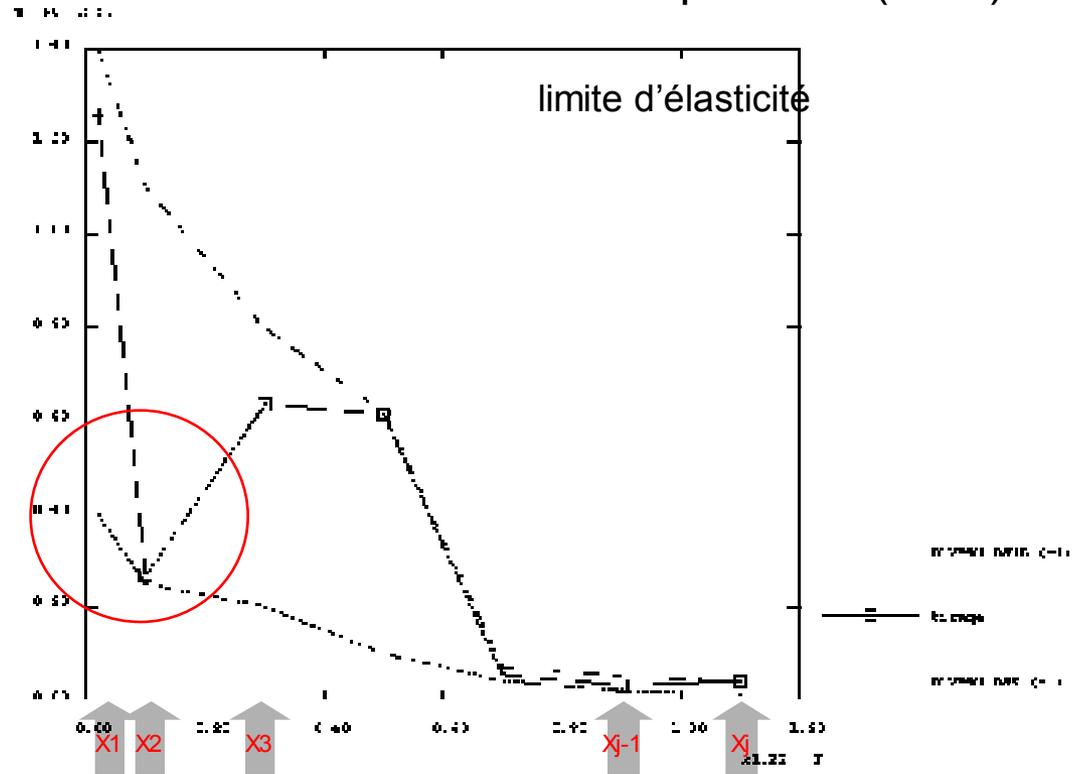
- + Formulation compacte, permet de prédéterminer la forme des evol°
- Impossibilité de donner « du sens » à chaque paramètres pour répondre à la q° : quelles données d'entrée faut-il caract. ?

- Discrétisation des prop. mat. en plusieurs températures

- + Permet de répondre directement à la q° posée
- Gd nb de variables d'entrée, chaque variable est échantillonnée indépendamment : non-physique

Nécessité d'un échantillonnage « physique »

- éviter de telles évolutions en fonction de la température (SRS) :

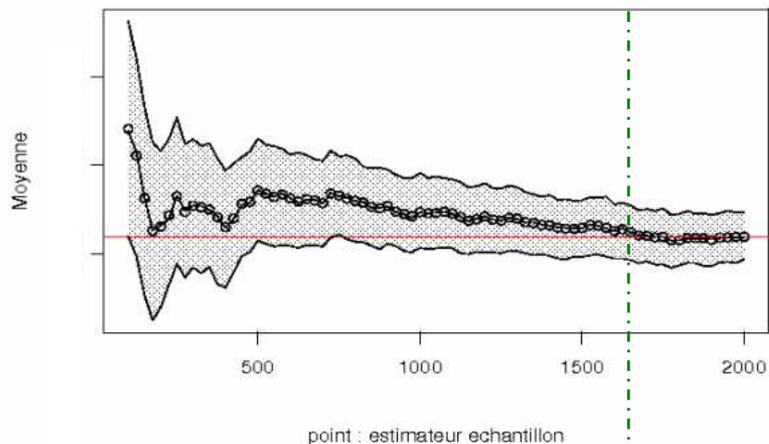


- Échantillonnage SRS : si la monotonie est vérifiée, loi de distribution de proba ne l'est pas
- Solution : échantillonnage LHS respectant la monotonie

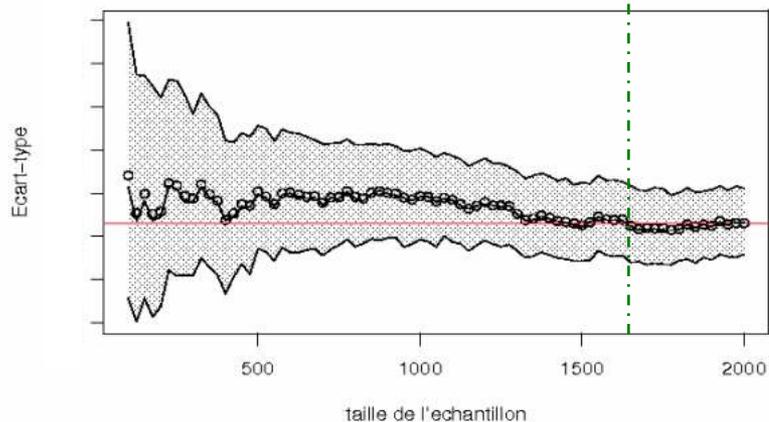
Intérêt de l'échantillonnage LHS



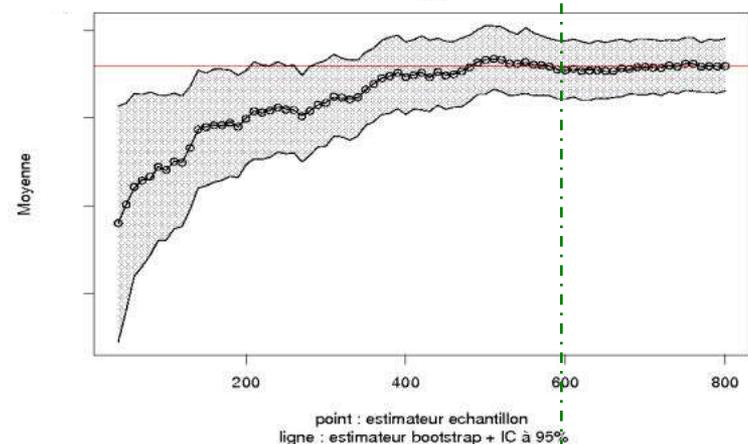
SRS



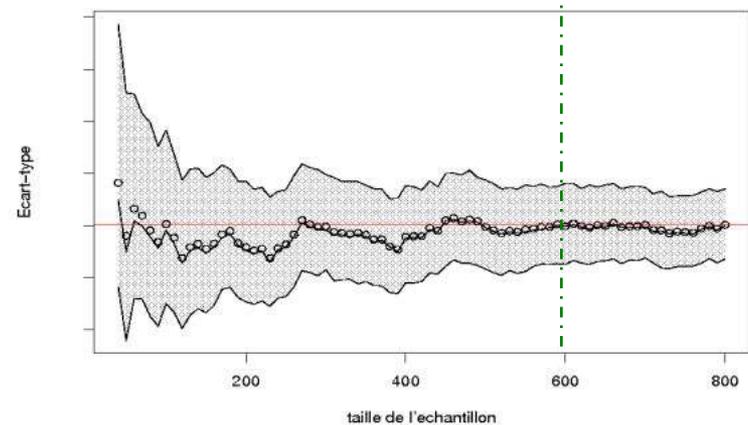
1600 expces



LHS



600 expces



→ à qualité équiv. : – expces que SRS

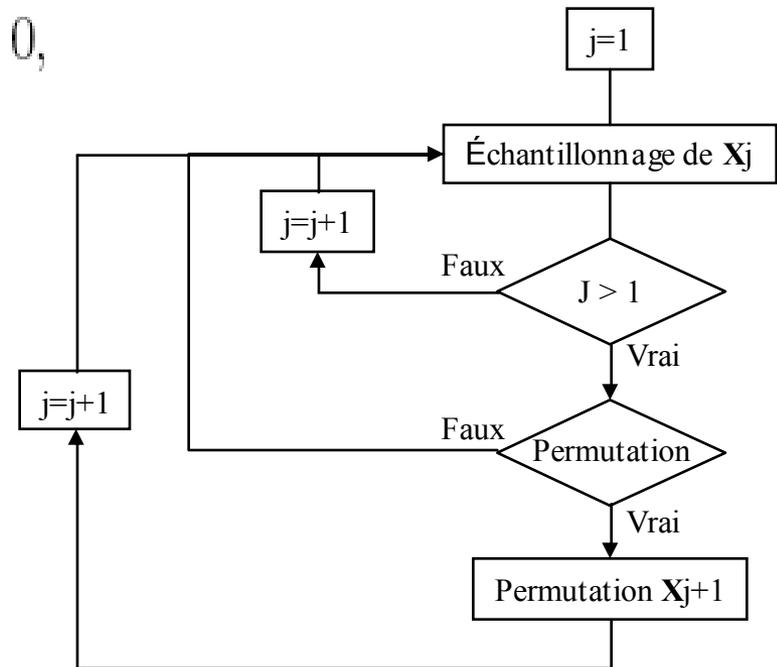
- But : échantillonner les données d'entrée $x_{i,j+1}$ sous condition de $x_{i,j}$
- Définition d'une matrice de compatibilité :

$$\begin{cases} \mathbf{C}^{j+1} = \langle X_{j+1} \cdot (X_j^{-1})^T - 1 \rangle, & x_{i,j+1} > x_{i,j} \\ \mathbf{C}^{j+1} = 1 - \langle X_{j+1} \cdot (X_j^{-1})^T - 1 \rangle, & x_{i,j+1} < x_{i,j} \end{cases} \quad \forall i = 1, 2, \dots, N,$$

- Il existe au moins une permutation du vecteur d'entrée X_{j+1} si :

$$\min \{ \text{tri}((\mathbf{C} \cdot \mathbf{C}^T)_{i,i}) - (1 \dots N) \} \geq 0,$$

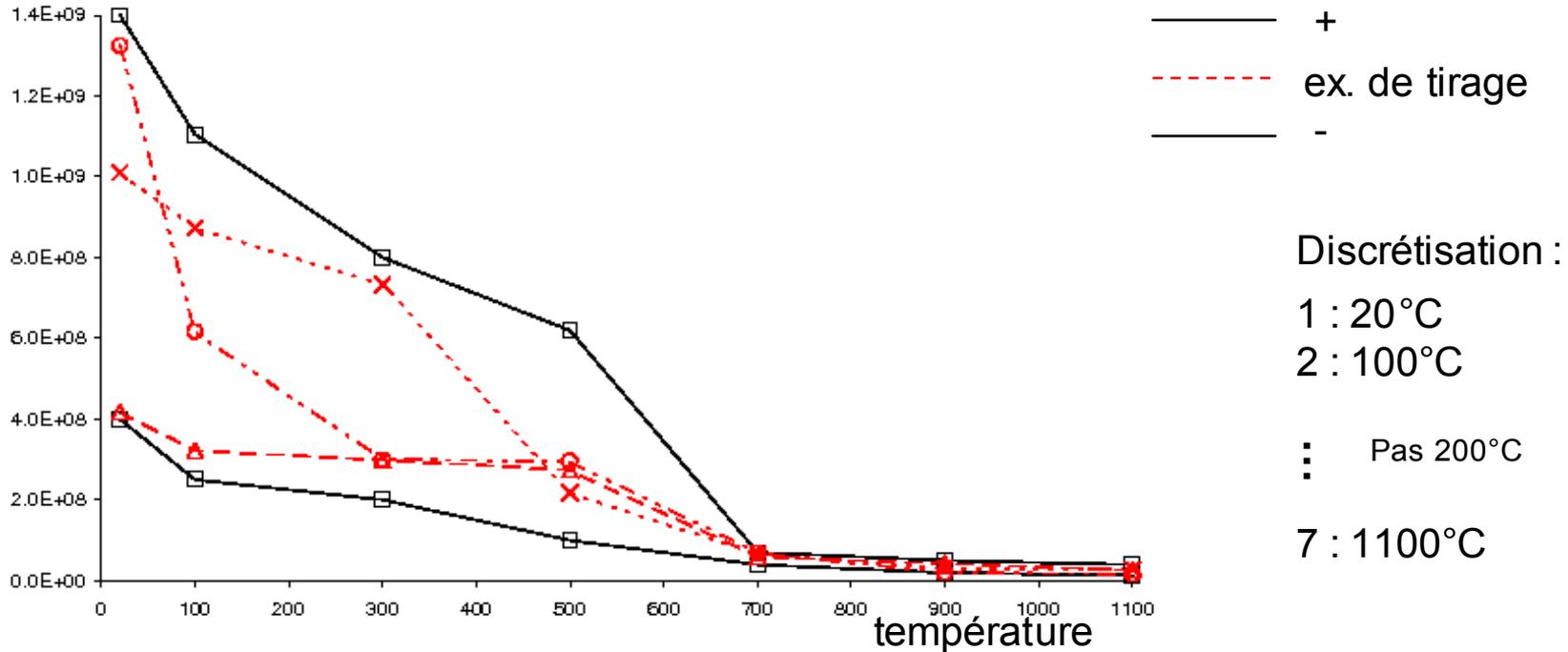
- Algo :



➔ Fonction : *samplingLHSconstraint.R*

Echantillonnage des propriétés matériau

- On parcourt l'ensemble du domaine des aciers en créant **800** matériaux
- Échantillonnage de la limite d'élasticité : 3 exemples de tirages

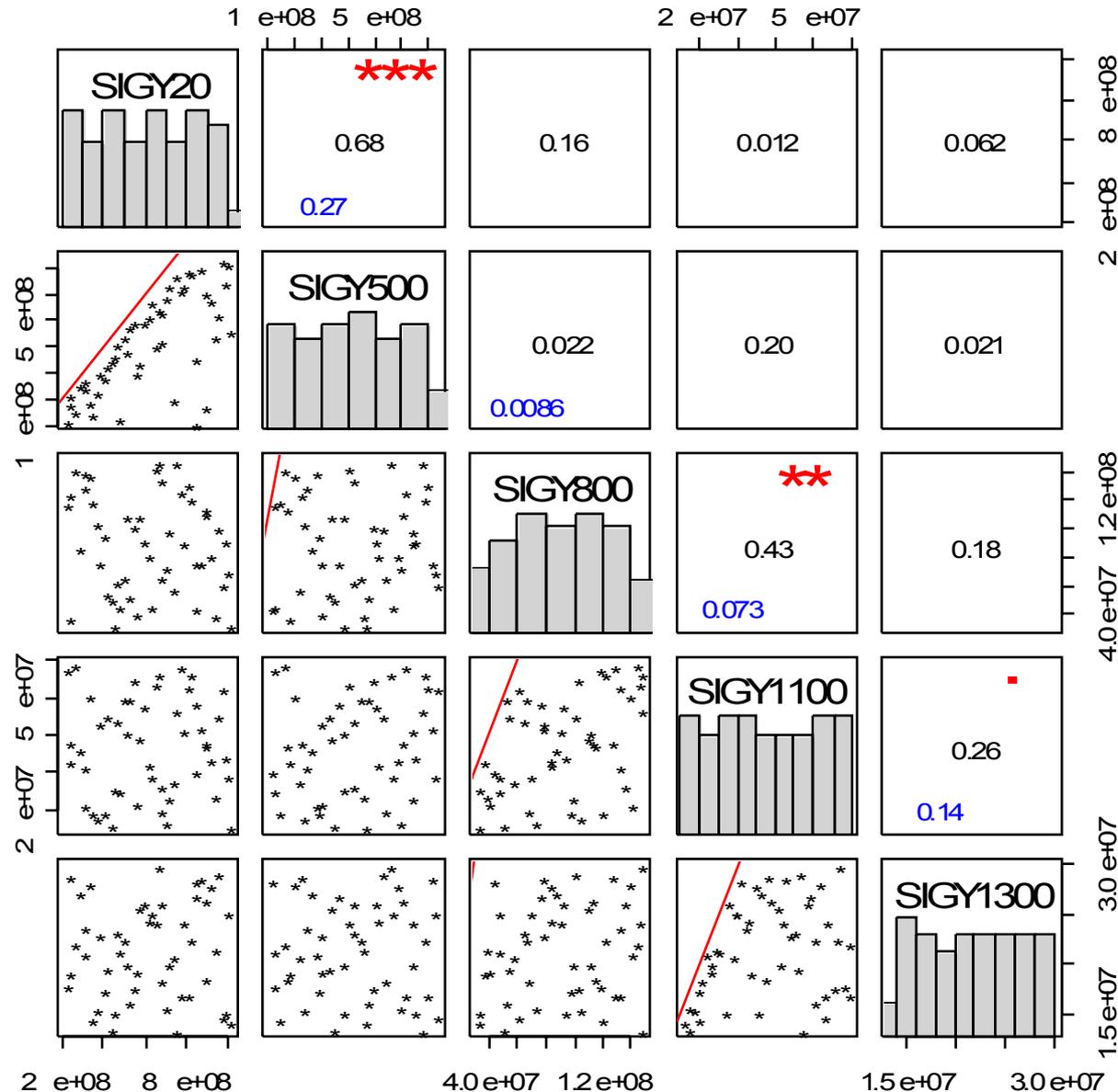


Idem pour :

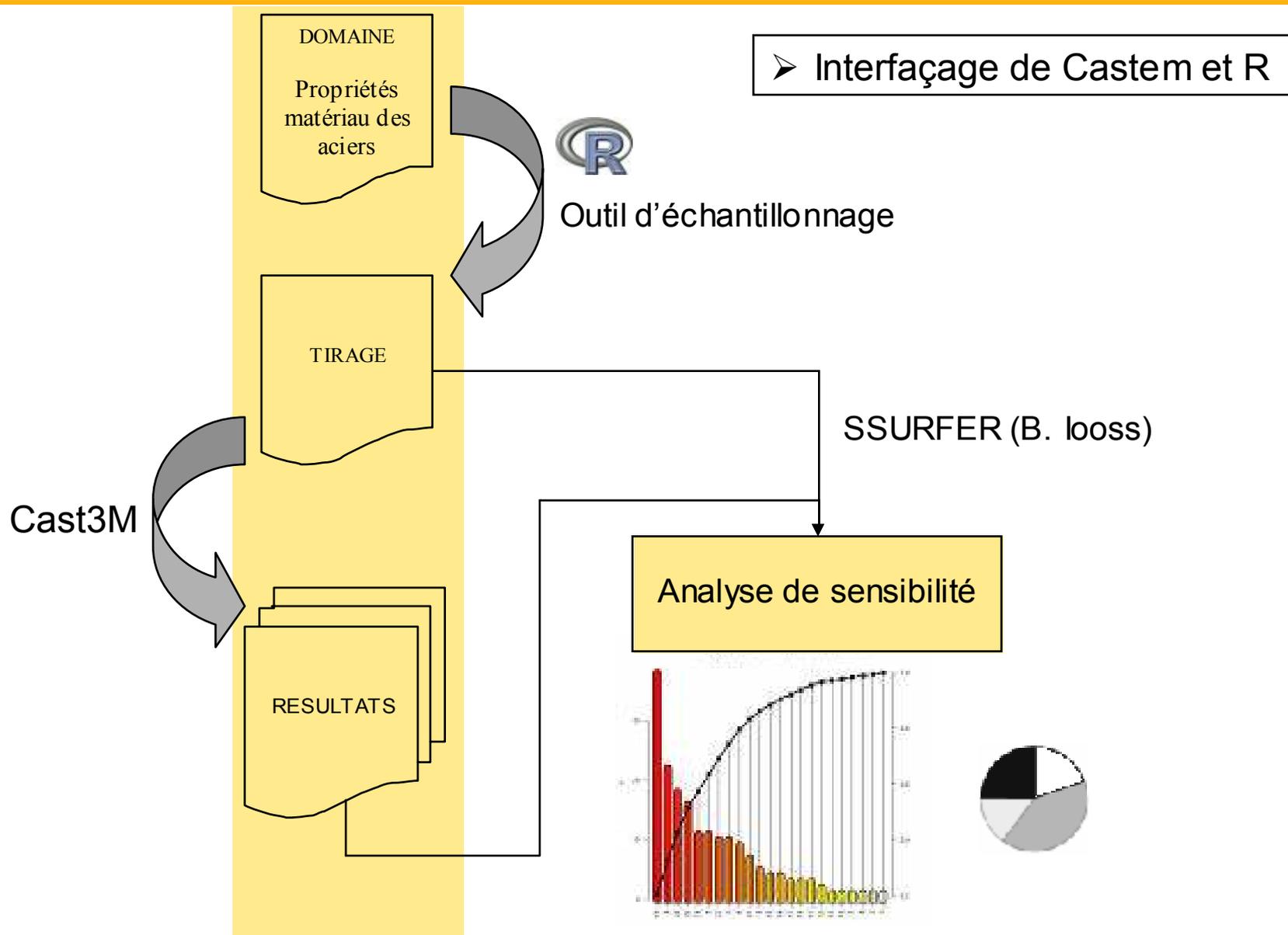
- module de Young
- coefficient de dilatation thermique
- coefficient de poisson
- coefficient d'écroutissage

Application : échantillonnage de la limite élastique (SIGY)

- Exemple avec N=50
- Échantillonnée selon 5 niveaux de temp.
- Corrélation maîtrisée
- Idem avec les autres prop. mat.

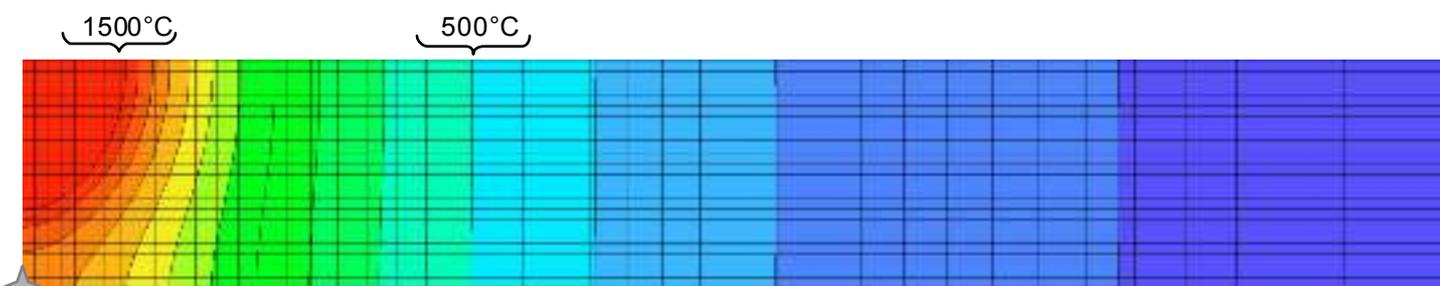


Architecture logicielle



Application en SNS

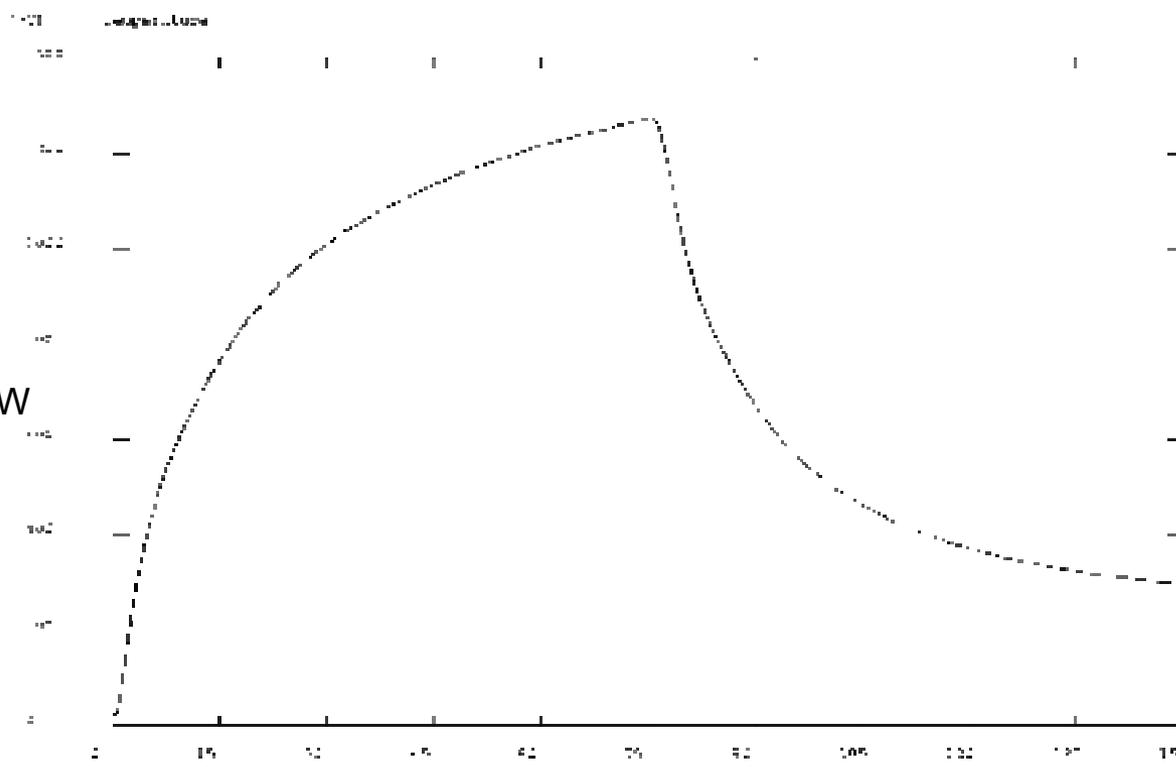
Simulation d'un dépôt d'énergie sur disque



Champ de température à t=75s



Flux imposé : 1000 W
maintien : 75 s

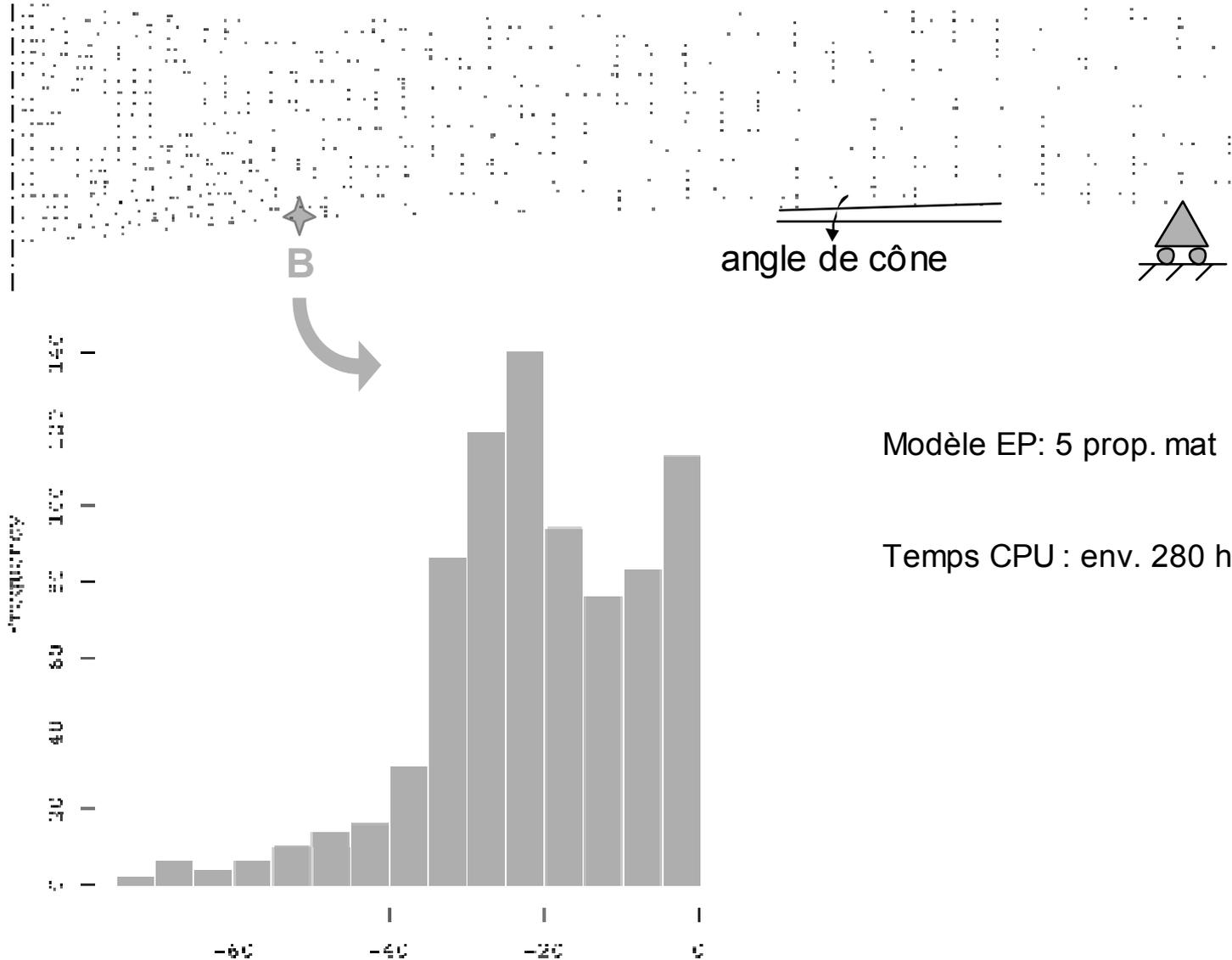


Température en fonction du temps au point A

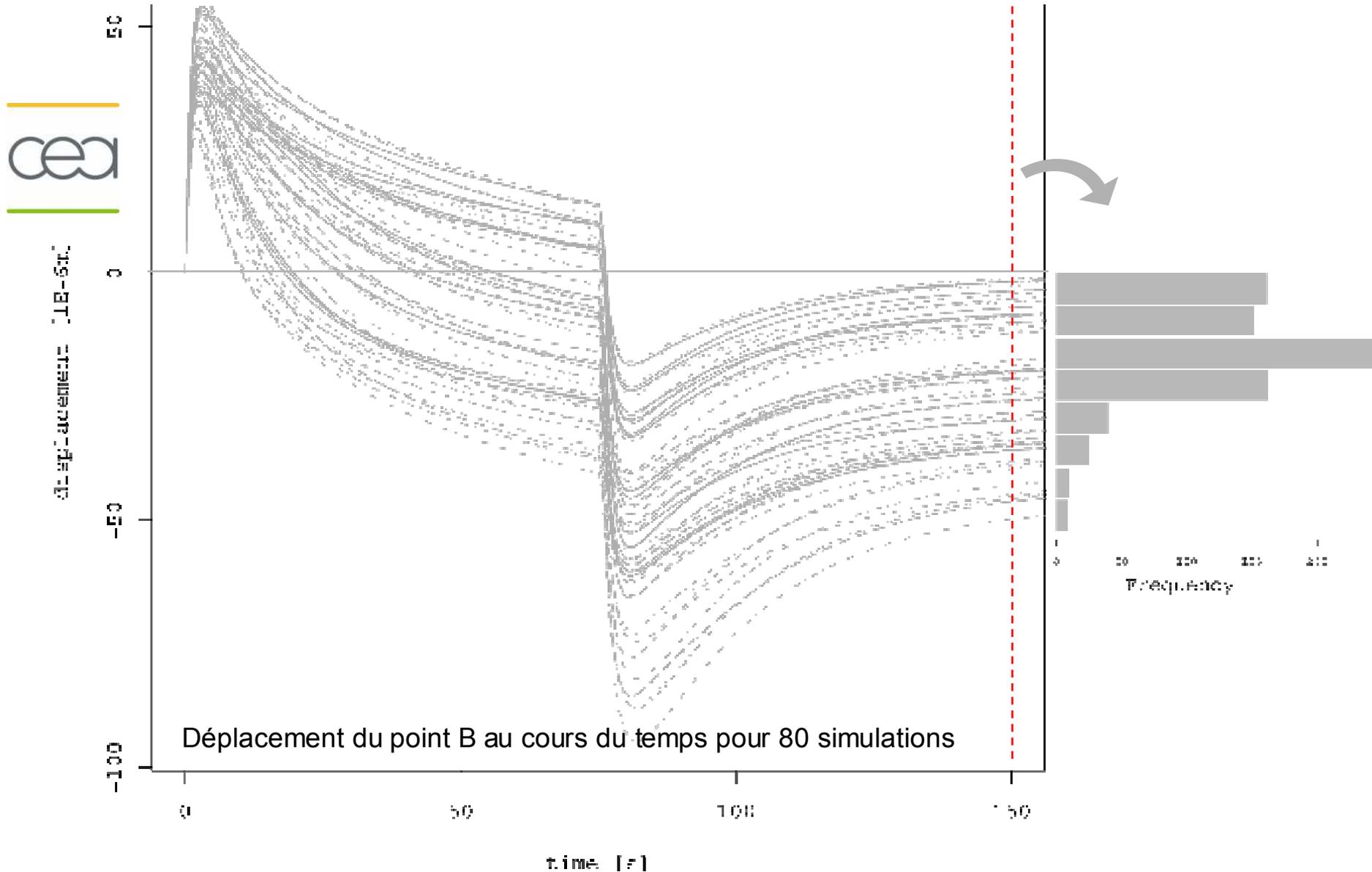
Résultats d'une campagne de 800 calculs



Distorsion du disque après refroidissement



Résultats d'une campagne de 800 calculs



Analyse de sensibilité globale linéaire

- Sortie étudiée : déplacement au point B
- $R^2 = 0.94 \rightarrow 94\%$ de la variance de la réponse expliquée par le modèle de régression
 - **SIGY20** : Limite d'élasticité à 20°C
 - **ALPH20** : Coef. dilatation th. à 20°C
 - **YOUN20** : Module de Young à 20°C

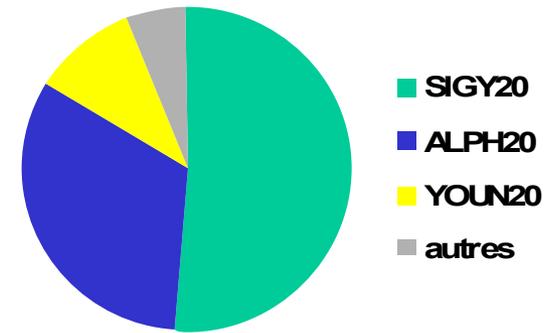


- 3 propriétés matériau / 5
- Uniq^t température ambiante

Part de la variance de la réponse expliquée par chaque facteur

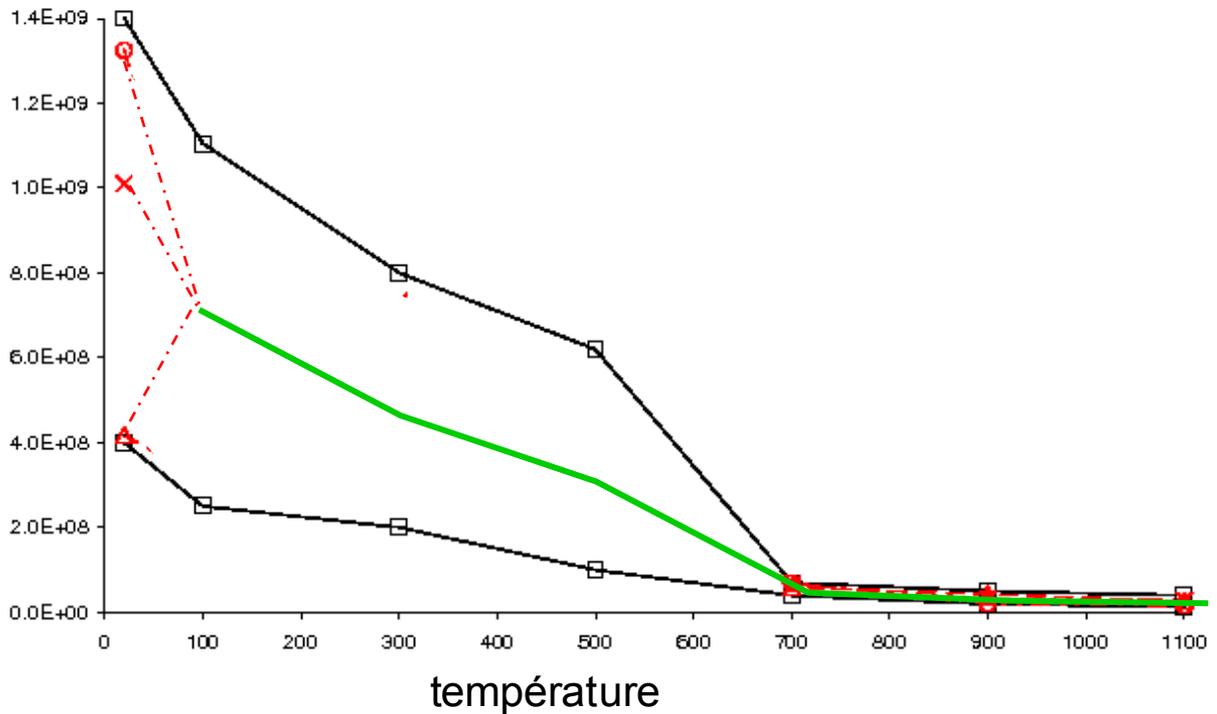
(a) Distorsion - R2 0.9402

	■ SIGY20	■ ALPH20	■ YOUN20
SRC ²	0.51	0.33	0.099
PEARSON ²	0.53	0.31	0.084



Réduction de paramétrage

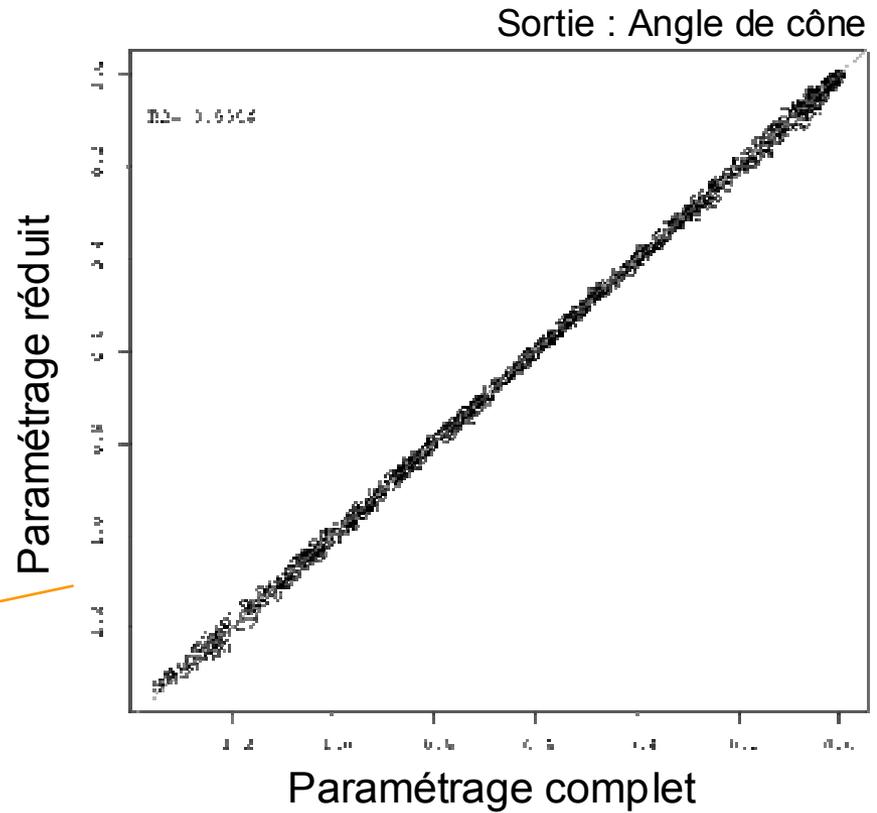
- sont influentes les valeurs à 20°C du :
 - module de Young
 - limite d'élasticité
 - coefficient de dilatation
- Réalisons une réduction de paramètres :
- Fixons les autres à la valeur médiane du domaine matériau (—)
- Exemple avec la limite d'élasticité : on ne garde que le 1^{er} point de discrétisation



800 calculs...

Confrontation paramétrage complet / réduit

- On observe la réponse du code au paramétrage complet et réduit
- Adéquation excellente : $R^2 > 0.9$



3 variables
les autres
étant fixées à
la moyenne

35 variables

Conclusions de cette étude



1. Sensibilité :

- 3 propriétés matériau /5 sont influentes
- Domaine de température influent : température ambiante
→ sur 35 paramètres du modèle, il en reste 3.

2. Réduction de dimension des entrées du code :

- Si on se contentait d'identifier ces 3 variables à 20°C le résultat serait équivalent à celui obtenu avec une identification sur tout le domaine de température

Conclusion

- Analyse de sensibilité utilisée pour **qualification des modèles** mécaniques utilisés en SNS



- Méthodologie :
 1. Définition du domaine matériau
 2. Échantillonnage des matériaux fictifs
 3. Exécution des exp^{ces} num. par éléments finis (Castem)
 4. Analyse de sensibilité (lin., non-lin. mais monotone, non-lin.)
 5. Réduction du paramétrage