

**Analyses de sensibilité et Recalage de  
modèles thermiques spatiaux à l'aide  
d'algorithmes génétiques.**

***Approches stochastiques et Industrie***  
***2&3/02/2006***

***F.JOUFFROY/A.CAPITAINE***

# Plan de la présentation

---

- Contexte
- Modélisation thermique engin spatial
- Problèmes usuels en phase de design
- Essais thermiques et recalage du modèle post-essai
- Algorithmes génétiques pour le recalage de modèles thermiques (étude cofinancée par le CNES)
- Conclusions

# Contexte (1/3)

## LA PROBLEMATIQUE DU SPATIAL

- Coûts de lancement sur orbites très élevés(10 à 20 Keuros le kilo)
- Impossibilité d'interventions hardware après le tir
- Pièces uniques ou très petites séries
- ⇒ **La fiabilité est une exigence majeure: PAS LE DROIT A L'ERREUR**
- Technologies éprouvées
- Qualification de l'ensemble du système
  - Composants durcis et analyses de fiabilité système
  - Tests exhaustifs à chaque niveau équipement, sous-système et système
- ⇒ **Couts élevés des systèmes >100 Meuros**

## Contexte (2/3)

### **THERMIQUE SPATIALE: Design, analyses et tests thermiques de systèmes et sous -systèmes spatiaux:**

➤ Satellites, instruments, équipements (ex: batteries, antennes...)

#### ● **Objectif du contrôle thermique**

➤ Maintenir les niveaux et gradients de température dans les limites spécifiées, en toutes conditions.

#### ● **Comment ?**

➤ En maîtrisant les transferts de chaleur au sein de l'ensemble et entre l'ensemble et son environnement.

#### ● **Le problème du design thermique satellite en pratique:**

➤ Evacuer la puissance dissipée par les équipements électroniques vers l'espace

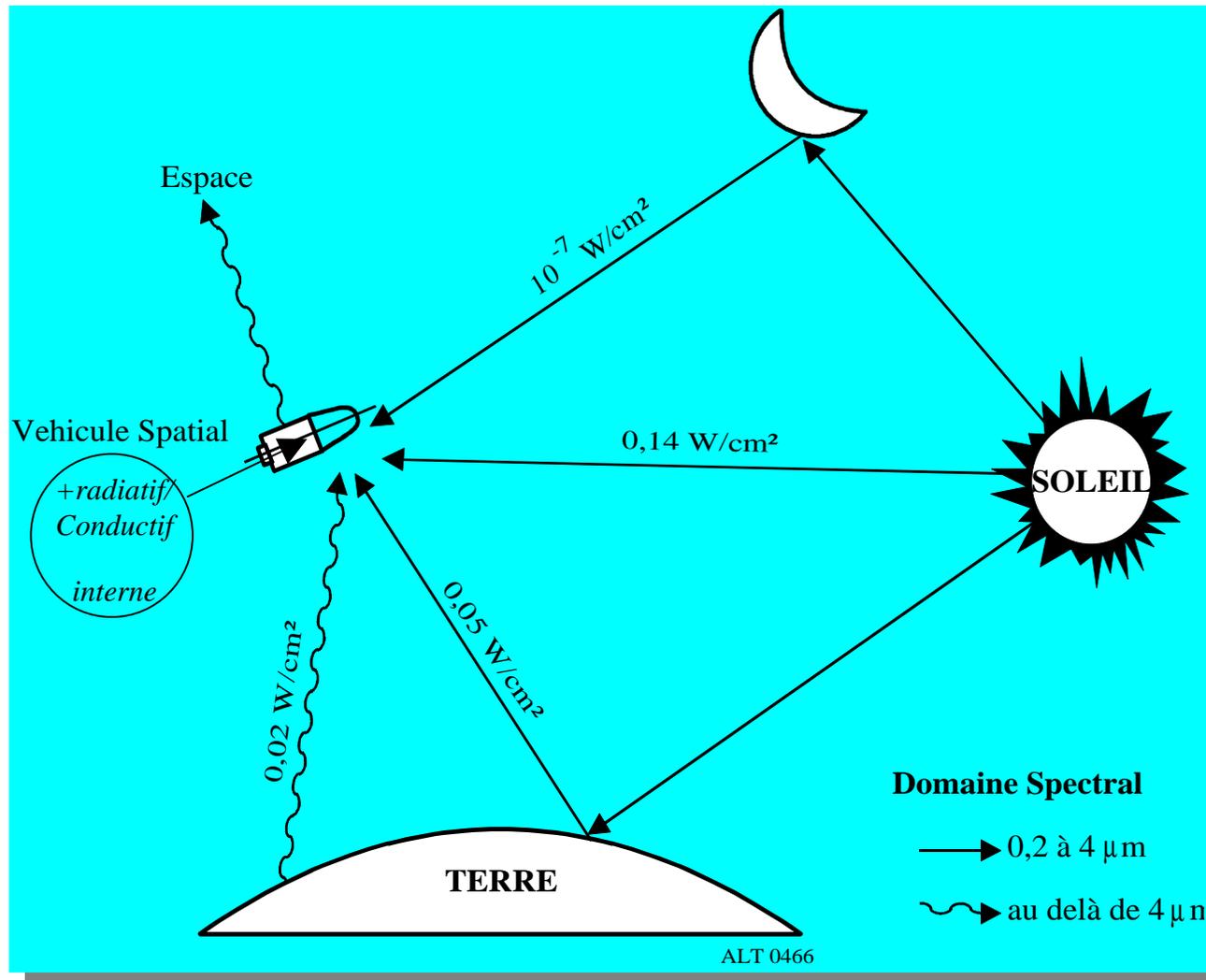
➤ S'isoler au mieux des conditions externes (soleil-terre-espace) pouvant être variables (éclipses), pour limiter le besoin en réchauffage.

## Contexte (3/3)

### LE CYCLE DE VIE DU CONTRÔLE THERMIQUE

- Design et analyses préliminaires (prédictions de vol)
- Design et analyse détaillées (prédictions de vol)
- ⇒ *configuration figée* => Lancement des approvisionnements Hardware
- ( Intégration satellite)
- Prédictions d'essai thermique
- Essai thermique: Qualification du contrôle thermique
- Recalage du modèle thermique après essai
- Prédictions de vol finales et modifications hardware thermique si nécessaire
- (Après tir, exploitation mesures en vol pour retour d 'expérience).

# Modélisation thermique engin spatial (1/4)



# Modélisation thermique engin spatial (2/4)

*En pratique, phénomènes radiatifs et conductifs uniquement (pas de forces de gravité).*

## ENTITES MISES EN OEUVRE

- **Nœuds thermiques** : Equipements à contrôler, structure, isolation...
- **Puissances injectées  $Q_i$** :
  - **Internes**: dissipation et réchauffage
  - **Externes**: Flux solaire et albedo:  $f(\text{géom, orbite, pointage, } \alpha \text{ absorptivité UV surface})$   
Flux IR planète:  $f(\text{géom, orbite, pointage, } \varepsilon \text{ émissivité IR surface})$
- **GL(i,j): couplages conductifs**
  - **Couplages intra-éléments**:  $f(\text{géométrie, } \lambda \text{ conductivité thermique matériau})$
  - **Couplages d'interface** entre éléments:  $f(\text{matériau, configuration, montage})$
- **GR(i,j): Couplages radiatifs**:  $f(\text{géométrie, } \varepsilon \text{ émissivité})$ 
  - **Couplage entre surfaces** nœuds thermiques en visibilité directe/indirecte
  - **Couplages vers l'espace**: puits froid à 4°K.

# Modélisation thermique engin spatial (3/4)

## SYSTEME A RESOUDRE

$$\Phi_i = Q_i + \sum_{j \neq i} GL(i, j) \cdot (T_j - T_i) + \sigma \sum_{j \neq i} GR(i, j) \cdot (T_j^4 - T_i^4) \text{ en W}$$
$$\Phi_i = C_i \frac{dT_i}{dt} \text{ en transitoire} \quad \Phi_i = 0 \text{ en stationnaire}$$

Avec:

$T_i$  température du nœud i en °K,

$Q_i$  Puissance injectée sur le nœud i

$GL(i, j)$  couplage conductif entre nœuds i et j, en W/K (*inverse résist.ther*)

$GR(i, j)$  couplage radiatif entre nœuds i et j, en m<sup>2</sup>

$C_i$  capacitance thermique du nœud i en J/K

**T=f(geom, pointage, orbite, prop mat  $\alpha, \varepsilon, \lambda, C_p, GL_{IF}, Q_{INT}$ )**

# Modélisation thermique engin spatial (4/4)

## CAS DE CALCULS

- **Taille des modèles**
  - En pratique, nombre de noeuds:  $1000 < n < 5000$ .
  - Plusieurs centaines de paramètres locaux (géométrie, configuration) et globaux (propriétés matériaux)
- **Ensemble de cas définissant une enveloppe des conditions rencontrées chaudes et froides:**
  - de 2 à n ( $n > 20$ ) cas de calculs
  - Couvrent les différentes phases...
    - sous coiffe lanceur, appendices stockés, appendices déployés, etc
  - ... et modes opérationnel de la vie du système:
    - nominal, veille, survie

# Problèmes usuels en phase de design (1/3)

## 1) Identification des cas dimensionnants:

### Paramètres soumis à variation:

- Age (↑des absorptivités surfaces matériaux).
- Environnement: période de l'année (intensité du flux solaire), orbite (si défilante: position variable/ soleil et terre)
- Mode satellite: pointage, dissipations internes.

**L'impact de la combinaison des paramètres d'orbite/pointage n'est pas toujours trivial à évaluer.**

**=> *Etudes paramétriques pour identification des cas pires de flux externes, effectuées pour des modèles GMM très simplifiés***

**Outil d'aide à la définition de l'étude paramétrique**

# Problèmes usuels en phase de design (2/3)

## 2) Evaluation incertitude de calcul pour fourniture températures garanties.

⇒ *Problème de propagation d'incertitude*

### Incertitudes sur les paramètres

$T=f(\text{geom, pointage, orbite, prop mat } \alpha, \varepsilon, \lambda, C_p, GL_{IF}, Q_{INT})$

- **Géométrie, pointage, orbite** : *non considérées.*
- **Propriété matériaux  $\alpha, \varepsilon, \lambda, C_p$**  : *utilisation de BD internes propriétés matériaux. Incertitudes liées au moyen de mesure.*
- **$GL_{IF}$**  : *Règles métier basées sur l'expérience.*
- **$Q_{INT}$**  : *couvert par les valeurs différentes margées cas chaud/froid fournies par le projet satellite.*

# Problèmes usuels en phase de design (3/3)

## Calcul de l'incertitude de calcul: UNE DEFINITION « NORMALISEE »

- Chaque paramètre est varié de manière équivalente sur son domaine de variation physique possible, par rapport à sa valeur initiale/nominale ( $2\sigma$ )
- La variation de chaque paramètre est faite dans les 2 directions +/- autour de sa valeur initiale/nominale.
- L'incertitude globale en chaque noeud du modèle est définie par un calcul de RSS pour tous les paramètres incertains

$$m_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{nbparam} \text{Max}[abs(T_i^{j+} - T_i^{ref}), abs(T_i^{j-} - T_i^{ref})]^2}$$

Où:

$m_i$ : incertitude de calcul associée au nœud i

$T_i^{ref}$  Température prédite au nœud i, cas de référence

$T_i^{j+}$  Température prédite au nœud i pour la variation spécifiée positive du param. j

$T_i^{j-}$  Température prédite au nœud i pour la variation spécifiée négative du param. j

**En pratique, on considère un nombre de paramètres du modèle limité ( $\approx 20$ ).**

# Essais thermiques et recalage du modèle (1/2)

## Design thermique qualifié par test représentatif sur spécimen physique, pour réduire l'incertitude

### ➤ Simulation de l'environnement spatial

- Chambre à vide
- Écrans azote liquide
- Soleil artificiel
- Simulateur d'attitude

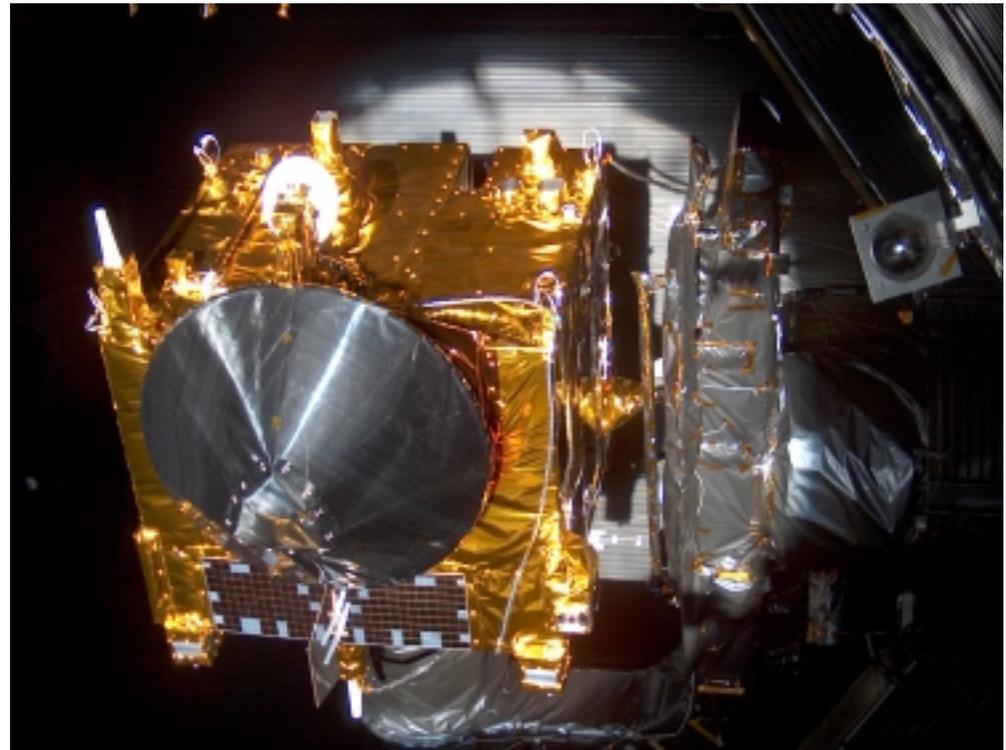
Exemple: Chambre SIMLES  
à Toulouse. Soleil  $\varnothing$  3.8m

### ➤ Cas de tests représentatifs du vol

- chaud, froid
- conf. particulières

### ➤ Instrumentation nombreuse:

- 1 satellite: 600 points de mesures.



# Essais thermiques et recalage du modèle (2/2)

## Recalage modèle / mesures essais

***Nécessaire car conditions d'essais ne couvrent pas le vol => Entrée pour prédictions de vol finales.***

- Tous les paramètres du modèle sont potentiellement utilisables,
- Il faut recalibrer plusieurs cas de tests.

⇒ ***Beaucoup d'informations à gérer***

***Méthodes manuelles non satisfaisantes car problème trop complexe***

- Couteux en temps, qualité médiocre des résultats obtenus
- L'ensemble des jeux de paramètres incertains ne peut pas être exploré.

### Remarques:

- Critères de recalage usuel:  $\Delta T$  80% mesures  $< [2-5]^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta Q$  rechauffage  $< 10\%$  ⇒ On se contente en pratique d'une solution approchée
- On obtient une incertitude modèle réduite pour les prédictions de vol finales.

# Algorithmes génétiques pour le recalage de modèles thermiques(1/11)

## **DEFINITION DU PROBLEME:**

***Estimation des valeurs des paramètres: Il s'agit d'un problème d'optimisation typique: minimiser l'écart entre prédiction et mesure.***

- Le modèle n'a pas forcément les 'bonnes' propriétés mathématiques
- L'utilisateur physicien n'est pas spécialiste en analyse numérique (pour vérif. propriétés modèles / choix algorithmes)

***Méthodes d'optimisation classiques de type gradient/recuit non applicables en pratique.***

⇒ ***Utilisation de méthodes 'stochastiques' lourdes envisageables aujourd'hui car***

- Augmentation continue puissance calcul+ parallélisation possible.
- Stabilisation taille modèles (précision suffisante, conserver la maîtrise globale)

# Algorithmes génétiques pour le recalage de modèles thermiques(2/11)

## QUELLE METHODE ?

1ère utilisation des approches stochastiques en interne EADS-Astrium pour le recalage des modèles mécaniques: Développement d'un outil pour:

- Analyse stochastique ' monte-carlo ' sur le domaine de variation autorisé des paramètres
- Algorithmes génétiques

L'expérience montre que le génétique va 10 fois plus vite que le stochastique 'monte-carlo'

⇒ **Utilisation pressentie des algorithmes génétiques pour le recalage de modèles thermiques.**

## Validation de la méthode:

- Introduction de défauts représentatifs pour un modèle 'cas d'école' de 100 noeuds, avec choix possible de 27 paramètres.
- Vérification que la méthode arrive à retrouver la solution du modèle initial.
- Traitement simultané de plusieurs cas de tests (chaud-froid), en stationnaire

# Algorithmes génétiques pour le recalage de modèles thermiques (3/11)

## DOMAINE VARIATION PARAMETRES:

Celui déjà utilisé pour le calcul d'incertitude du modèle

## DEFINITION DE LA FONCTION OBJECTIVE

- Ecart (Mesure- Prédiction) pondérable pour chaque point de mesure
- Différents cas de tests à recaler.
- Ecart mesurable en température **mais aussi en flux.**

Forme générale de la fonctionnelle

$$F = \beta \cdot \text{écart temp} + (1 - \beta) \cdot \text{écart flux}, \text{ avec } 0 \leq \beta \leq 1$$

$$ECART = \text{Opérateur}(\{\Delta_k(\text{mesure}, \text{prédiction})\}_{k \text{ point mesure} \in \text{modèle}})$$

**Avec operateur: Max, Moyenne, ...**

# Algorithmes génétiques pour le recalage de modèles thermiques (4/11)

## DEFINITION DE LA CONDITION D'ARRET:

### Plusieurs critères possibles

- On a atteint le critère de recalage souhaité ( $\Delta T < x^{\circ}\text{C}$ )

*ou*

- On ne progresse plus sur la valeur de la fonctionnelle.

*ou*

- Nombre d'itérations spécifié dépassé.

# Algorithmes génétiques pour le recalage de modèles thermiques (5/11)

## COMPORTEMENT OBSERVE

*(lors des premières simulations)*

1)  $\exists$  hiérarchie des paramètres pour le recalage:

- Les paramètres de forte influence sur la fonction objective sont recalés d'abord.
- Le recalage des paramètres de second ordre n'est effectuée qu'après recalage des paramètres 'forts'.

$\Rightarrow$  ***Une méthode de recalage incrémentale semble adaptée (introduction progressive des paramètres de magnitude décroissante).***

# Algorithmes génétiques pour le recalage de modèles thermiques (6/11)

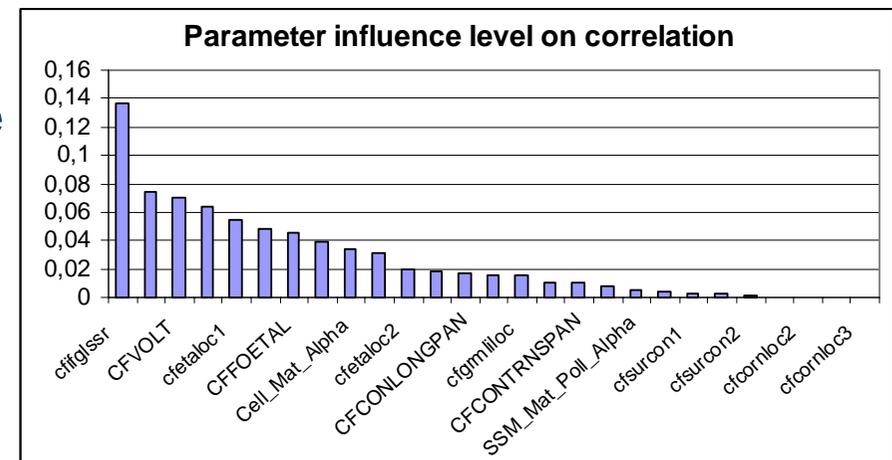
## DETERMINATION MAGNITUDE PARAMETRES

⇒ **Par analyse de sensibilité mono-paramètre.**

Evaluer l'impact sur la valeur de la fonction objective de la variation de chaque paramètre, au point de départ  $x_0$

$$\Delta FF_i = f(\Delta P_i) \text{ avec } \Delta FF_i = (F_{X_0refpt} - F_{X_0refpt \& x_i = x_{i0} + c \cdot (b.sup_{x_i} - b.inf_{x_i})})$$

Variation de la fonction objective obtenue pour une variation du paramètre  $i$  de  $c$  dans son intervalle de variation possible ( $c \approx 1-5\%$ , valeur constante pour tous les paramètres).



# Algorithmes génétiques pour le recalage de modèles thermiques (7/11)

## COMPORTEMENT OBSERVE (suite)

2) Le recalage obtenu n'est pas satisfaisant à la convergence de l'AG, malgré :

- Augmentation du nombre d'individu (très lourd à calculer)
- Probabilité de mutation par paramètre relativement élevée (0.02)

**Stabilisation sur un niveau d'écart  $\Delta T(\text{Mesure, Prediction}) > 2^\circ\text{C}$   
*L'algorithme n'arrive pas à trouver une bonne solution.***

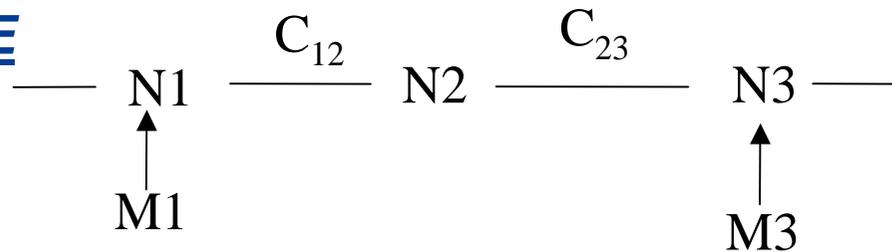
⇒ ***Investigations***

Les enfants obtenus sont souvent 'pires' que leurs parents, même quand il ne s'est pas produit de phénomène de mutation: (croisement arithmétique seul). Que se passe t'il ?

***IL EXISTE DANS CE CAS DES PARAMETRES REDONDANTS.***

# Algorithmes génétiques pour le recalage de modèles thermiques (8/11)

## EXEMPLE



$$C_{13} = \left( \frac{1}{C_{12}} + \frac{1}{C_{23}} \right)^{-1}$$

$$\Phi_{13} = C_{13} \Delta T_{N1, N3}$$

- Conditions d'interface de ce modèle fixées  $\Rightarrow$  qualité recalage  $= f(C_{13})$

Mais  $\exists$   $\infty$ té de solutions  $(C_{12}, C_{23}) / C_{13} = C_{ok}$

**Si 2 parents bien recalés  $(C_{12\_p1}, C_{23\_p1})$  et  $(C_{12\_p2}, C_{23\_p2})$  sont croisés.**

-> Valeurs 'aléatoires' obtenues par croisement arithmétique de façon indépendante pour l'enfant  $C_{12\_e}$  &  $C_{23\_e}$

-> Très probablement, le jeu de valeurs obtenues ne vérifiera pas la condition de recalage:

$$C_{13e} = \left( \frac{1}{C_{12e}} + \frac{1}{C_{23e}} \right)^{-1}$$

$\Rightarrow$  **Les enfants sont pires que les parents, pas d'amélioration possible par l'AG**

# Algorithmes génétiques pour le recalage de modèles thermiques (9/11)

## AMELIORATION DE LA CONVERGENCE

SOLUTION: Figer  $C_{12}$  ou  $C_{23}$

Comment évaluer/détecter la redondance des paramètres ?

⇒ 1) Par analyse de sensibilité mono-paramètre.

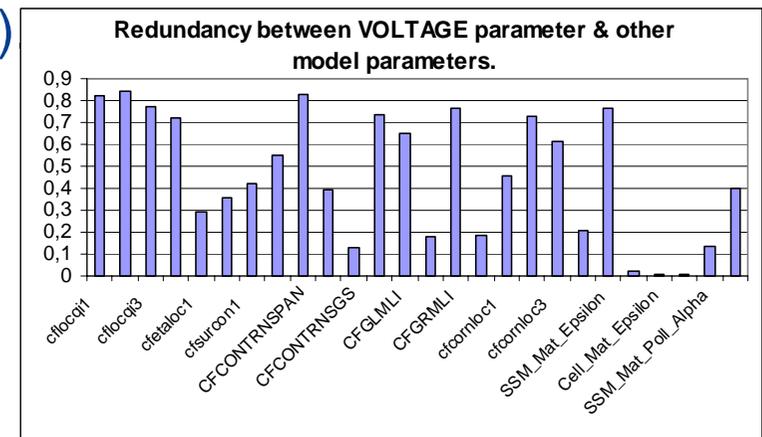
Evaluer l'impact sur la temp. de chaque noeud point de mesure de la variation de chaque paramètre, au point de départ  $x_0$

$$\Delta \vec{T}i = g(\Delta Pi) \quad \text{avec} \quad \Delta \vec{T}i = (\vec{T}_{X_0refpt} - \vec{T}_{X_0refpt \& x_i = x_{i0} + c.(b.sup_{x_i} - b.inf_{x_i})})$$

Vecteur des variations de températures aux noeuds points de mesure obtenu pour une variation du paramètre  $i$  de  $c$  dans son intervalle de variation possible ( $c \approx 1-5\%$ , valeur constante pour tous les paramètres)

⇒ Comparaison de la redondance des Paramètres 2 à 2 par calcul du Cosinus entre 2 vecteurs  $\Delta \vec{T}i$  et  $\Delta \vec{T}j$  associés

$$Param\_redund_{i,k} = Cos(\Delta \vec{T}i, \Delta \vec{T}k) = \frac{\Delta \vec{T}i \cdot \Delta \vec{T}k}{\|\Delta \vec{T}i\| \cdot \|\Delta \vec{T}k\|}$$



# Algorithmes génétiques pour le recalage de modèles thermiques (10/11)

Comment évaluer/détecter la redondance des paramètres (suite) ?

⇒ 2) Par identification de redondance de paramètres spécifiques et génériques.

Exemple:

Puissance des réchauffeurs:  $P = \frac{U^2}{R}$

U: tension paramètre **générique** à tous les réchauffeurs montés en // .

R: Résistance paramètre **spécifique** à chaque réchauffeur

***Suivant la fonctionnelle utilisée, l'analyse de sensibilité ne détecte pas forcément la redondance entre paramètres car peu de points de mesures concernés.***

***Vérification effectuée manuellement, mais non réalisable pour modèle plus importants.***

# Algorithmes génétiques pour le recalage de modèles thermiques (11/11)

## Perspectives d'amélioration

- $\exists$  1 Solution limitée pour trouver les dependances entre paramètres 2 à 2  
Mais..
- Il faut maintenant l'étendre ...
  - Redondances entre 3 paramètres et +
  - Redondances paramètres génériques/spécifiques

**L'enjeu majeur reste l'identification du bon jeu de paramètre pour le recalage: En pratique, le nombre de paramètres manipulables par l'AG restera limité.**

# Conclusion

- **Les analyses de sensibilité** sont utilisées pour le **design thermique satellite**:
  - De manière importante, pour l'identification des cas d'orbite/pointage dimensionnants.
  - De manière plus réduite, pour le calcul de l'incertitude de calcul du modèle thermique (fourniture de températures garanties).
- **Le recalage de modèles thermiques** après essai est un problème d'optimisation pour lequel l'approche "**Algorithme Génétique**" est jugée plus efficace.
  - Les analyses de sensibilité **permettent de** contrôler **la cohérence et la hiérarchie du** jeu de paramètres de recalage présélectionné.