

La société Charmilles Technologies SA, spécialisée dans la construction de machines-outils à électroérosion, a confié au Groupe de compétences en mécanique des fluides et procédés énergétiques de l'Ecole d'ingénieurs de Genève (CMEFE), l'étude du comportement aérothermique d'une armoire électrique de machine-outil. Un modèle a été établi, réalisé et validé par une campagne de mesures expérimentales. Il s'avère extrêmement fiable, malgré la complexité de l'ensemble modélisé.

Comportement aérothermique de systèmes électriques complexes

Patrick Haas* et Michel Perraudin**

L'étude du comportement aérothermique d'un ensemble électrique doit permettre de garantir son bon fonctionnement dans différentes situations d'utilisation. Le refroidissement des cartes et des composants doit être évalué, de manière à s'assurer que les températures rencontrées se situeront dans des plages acceptables et permettront d'assurer la durée de vie souhaitée.

Une armoire de machine-outil a été modélisée à l'aide d'un modèle de calcul en volumes finis. Les écoulements générés par les ventilateurs de refroidissement ont été simulés et les flux de chaleur calculés. Le modèle utilisé, d'origine commerciale, résout les équations de la dynamique des fluides dans les espaces libres, puis les échanges thermiques sont évalués. Dans le cas qui nous occupe, ces échanges proviennent:

- de la convection naturelle ou forcée sur les surfaces des solides
- de la conduction dans les solides
- du rayonnement entre solides

Le modèle en soi n'est pas nouveau, mais sa validation dans un cas complexe de grande dimension est peu fréquente. Le CMEFE a réalisé, à l'aide de campagnes de mesures en mode d'usinage, une validation approfondie du modèle utilisé. L'exactitude du modèle, de même que la sensibilité

aux conditions limites du domaine de calcul ont pu être évaluées.

Modèle de simulation

L'analyse a été réalisée avec le logiciel Flotherm®. Il s'agit d'un code de calcul commercial très utilisé dans l'industrie de l'électronique. Il se base sur un schéma en volumes finis proposé par le Prof. D. Spalding il y a environ 15 ans. Sa programmation est décrite avec précision par S. Patankar [1].

Le modèle résout les équations de la mécanique des fluides. Ces équations sont les équations de continuité, de mouvement, d'énergie et d'état. Sous forme vectorielle, elles s'expriment comme suit:

Notation

c	Chaleur spécifique (J/kg K)
E, N, O, S	Positions des points voisins au point considéré
e, n, o, s	Positions des limites du volume de contrôle
ht	Enthalpie totale (J/kg)
P	Pression (Pa)
t	Temps (s)
T	Température (K)
x, y, z	Coordonnées dans le repère orthogonal (m)
Wx, Wy, Wz	Composantes de la vitesse du fluide (m/s)
ρ	Masse volumique (kg/m³)

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{F}}{\partial x} + \frac{\partial \vec{G}}{\partial y} + \frac{\partial \vec{H}}{\partial z} = \vec{S}$$

avec :

$$\vec{U} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho \cdot W_x \\ \rho \cdot W_y \\ \rho \cdot W_z \\ \rho \cdot h_t \end{bmatrix} \quad \vec{F} = \begin{bmatrix} \rho \cdot W_x \\ \rho \cdot W_x^2 + P \\ \rho \cdot W_y \cdot W_x \\ \rho \cdot W_z \cdot W_x \\ \rho \cdot h_t \cdot W_x \end{bmatrix} \quad \vec{G} = \begin{bmatrix} \rho \cdot W_y \\ \rho \cdot W_x \cdot W_y \\ \rho \cdot W_y^2 + P \\ \rho \cdot W_z \cdot W_y \\ \rho \cdot h_t \cdot W_y \end{bmatrix} \quad \vec{H} = \begin{bmatrix} \rho \cdot W_z \\ \rho \cdot W_x \cdot W_z \\ \rho \cdot W_y \cdot W_z \\ \rho \cdot W_z^2 + P \\ \rho \cdot h_t \cdot W_z \end{bmatrix}$$

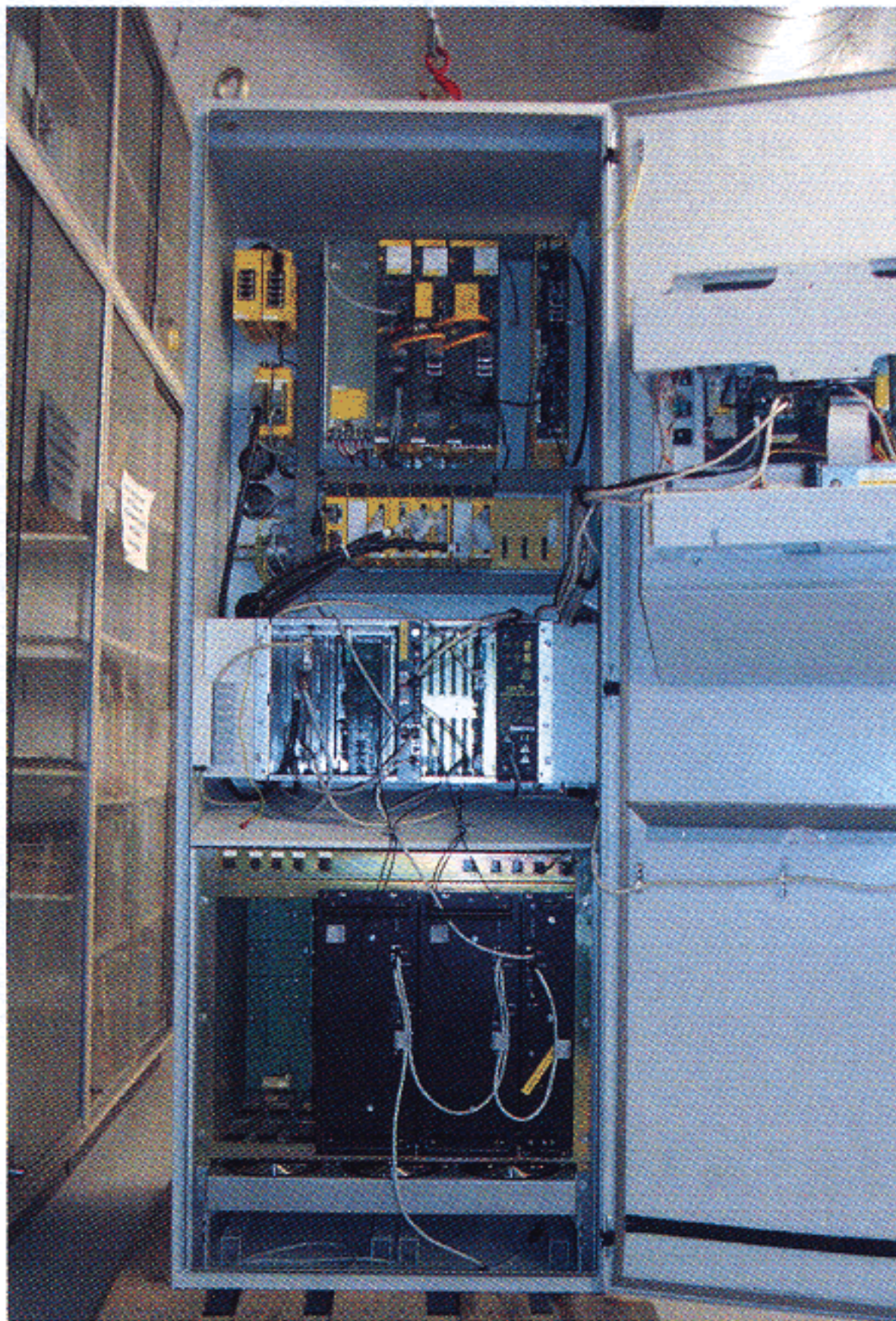
A l'intérieur des solides, ce ne sont pas les équations de la dynamique des fluides qui sont utilisées, mais celles qui régissent la conduction:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S$$

Ces équations sont complétées par des relations régissant les transferts de chaleur et de quantité de mouvement aux interfaces solide-gaz. Elles gouvernent les conditions aux limites sur les surfaces des solides.

* Adjoint scientifique, CMEFE

** Professeur HES, CMEFE



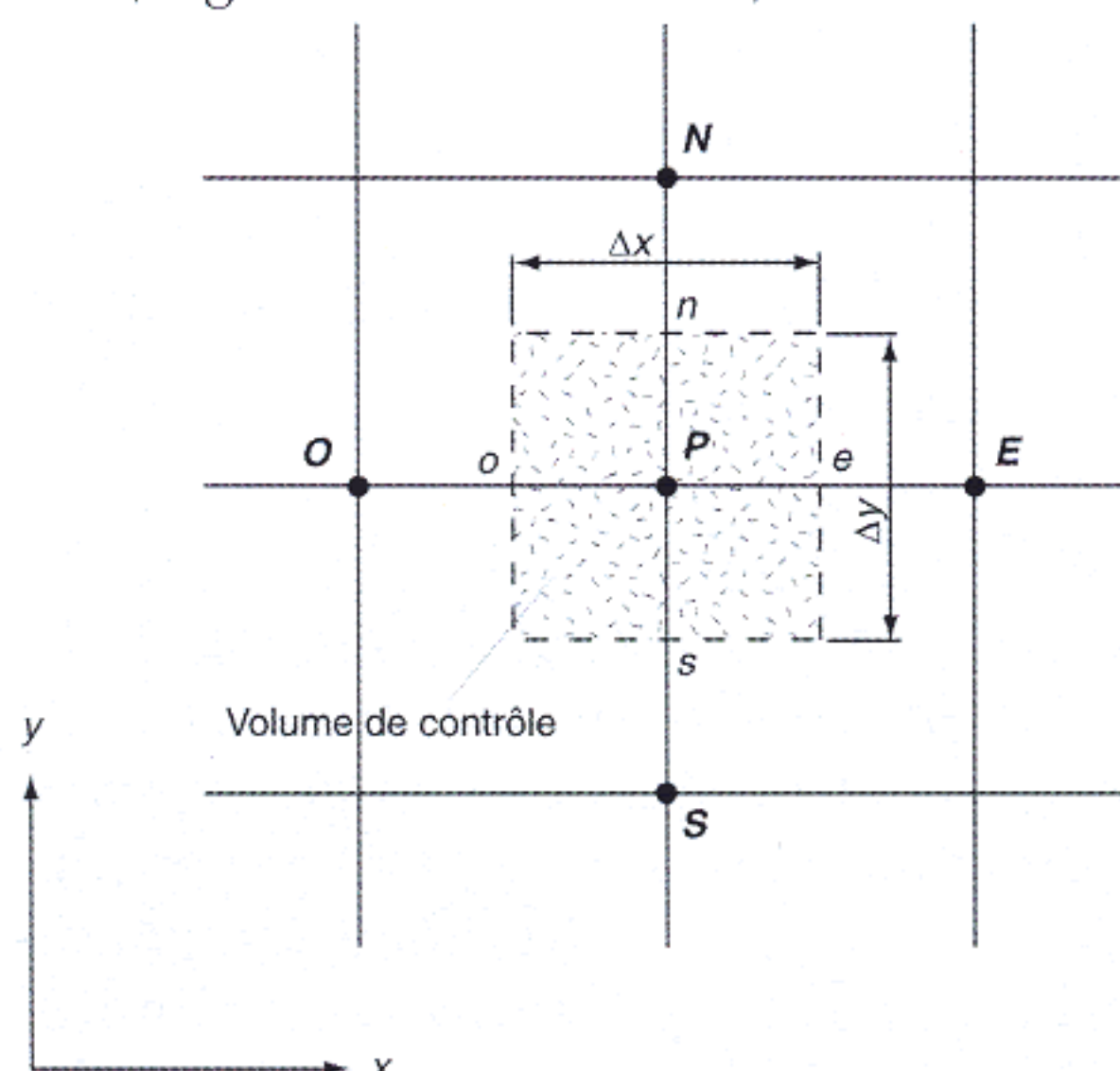
Objet modélisé

Les équations sont discrétisées et intégrées sur des volumes appelés volumes de contrôle (fig. 3). La marche dans le temps s'effectue selon une progression implicite, explicite ou une situation comprise entre ces deux limites.

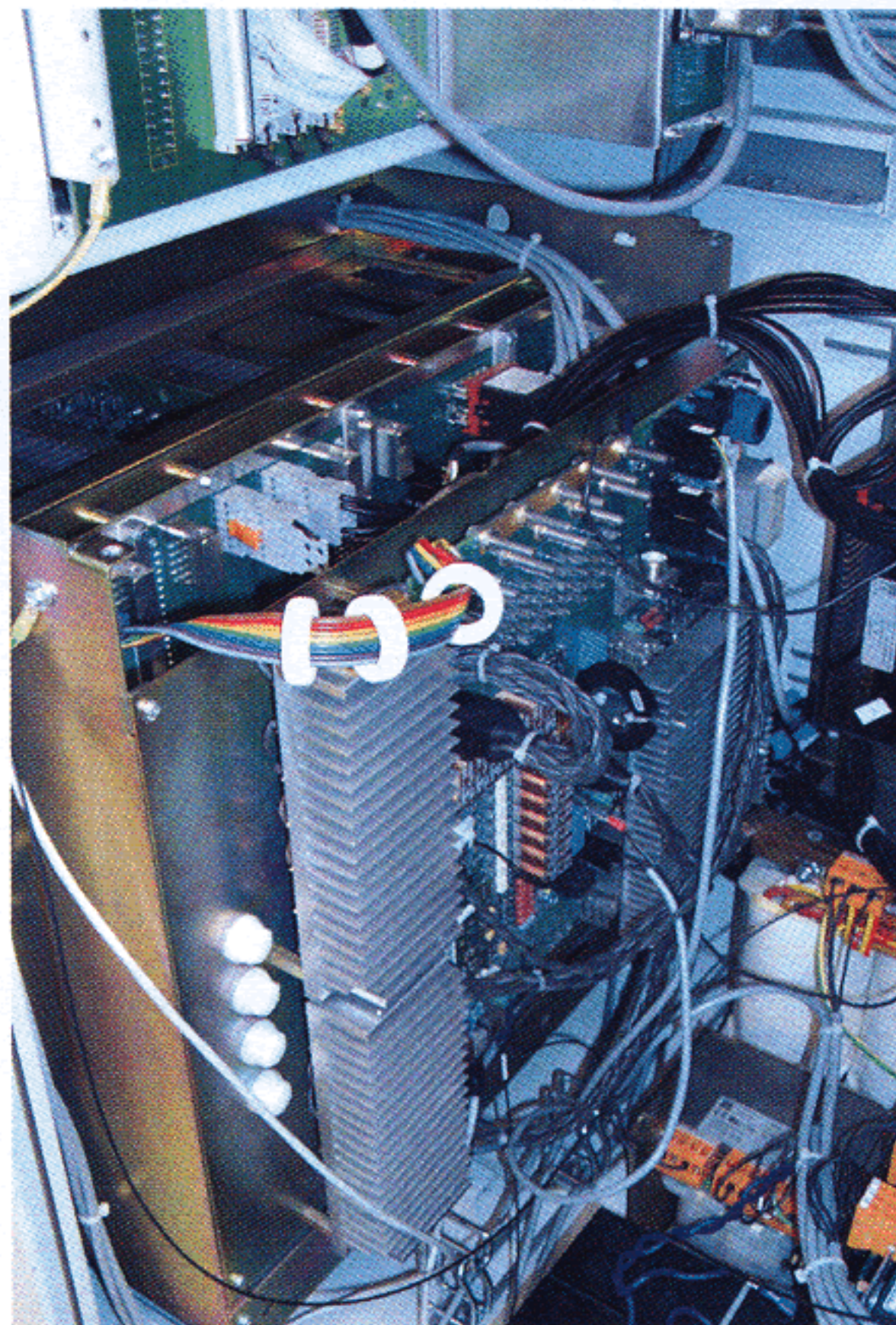
Ce type de modèle est devenu très populaire ces dix dernières années. Le fait de conserver avec exactitude les bilans dans les volumes de contrôle permet de modéliser des phénomènes physiques avec une bonne exactitude, même si la discrétisation est grossière. Ce qui n'est pas forcément le cas avec d'autres modèles de calcul, par exemple du type différences finies. Pour ce dernier, la sensibilité du pas dimensionnel sur les résultats est grande.

Simulation

L'armoire a été décomposée en éléments qui peuvent être regroupés en sous-groupes: éléments de distribution, générateur d'arcs, contrôleur



Modélisation à l'aide des volumes finis

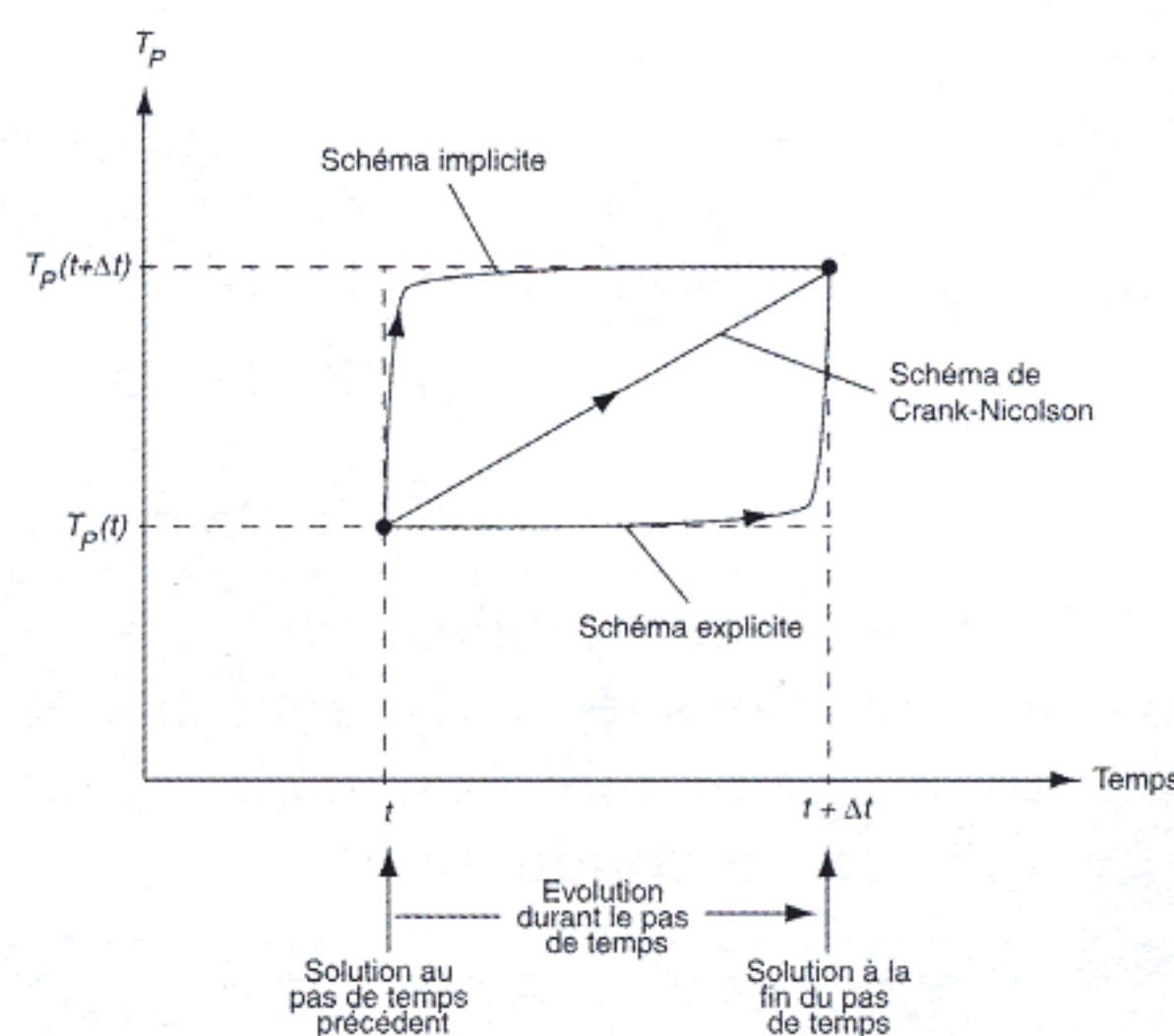


Un des nombreux sous-ensembles modélisés

d'axes, automate, modules I/O, etc. Les caractéristiques thermiques des matériaux et des surfaces ont été décrites et chaque élément a été modélisé. Une liste des sources thermiques a été établie pour les différents modes d'usage étudiés.

La puissance thermique maximale dissipée dans l'armoire est de 3800 W (mode ébauche 400 mm²/min). Trois modes d'usage ont été distingués: stand-by, finition et ébauche. Ces modes correspondent à des situations d'usage particulières, au cours desquelles les composants électriques sont sollicités de manières différentes. A priori, le mode d'usage pour lequel la dissipation est la plus grande, n'est pas forcément le mode le plus critique du point de vue thermique, les composants actifs n'étant pas forcément les mêmes.

Le modèle est assez complexe, car les composants sont nombreux. Dans notre modèle, les cartes sont représen-



Progression dans le temps

tées comme des solides complexes non homogènes formés par des couches de résine et des couches de cuivre. Le niveau de détail varié selon le type de cartes.

MODE	DEFINITION	DISSIPATION THERMIQUE TOTALE
Stand-by	Usinage suspendu	886 (W)
Finition	E7 H60 LT25	1660 (W)
Ebauche	Avec charges de simulation d'usinage	3787 (W)

Définition des modes d'usage étudiés

Les conditions frontières du domaine sont des conditions «libres». Des conditions identiques aux essais ont donc été imposées. Ainsi, la température ambiante a varié de 25,5 à 32,5°C, selon les valeurs mesurées lors des essais.

Une extension du volume de calcul de 200 mm à l'extérieur de l'armoire a été imposée sur chaque paroi. De cette manière, les coefficients de convection à l'extérieur de l'armoire sont calculés par le modèle et non pas imposé sur la base de valeurs semi-empiriques.

Cette manière de faire a permis de prendre en compte les échanges de chaleur entre la «peau» de l'armoire et l'air ambiant. Elle a permis, entre autre, de mettre en évidence le flux de chaleur, relativement important, ainsi évacué.

Validation du modèle

Le modèle a été validé à l'aide de campagnes de mesures expérimentales. Des points de contrôle ont été ajoutés dans le volume de calcul du

Quelques grandeurs du projet

- Conditions frontières: libres, solide (sol)
- Conditions initiales: 25,5 - 32,5°C, 105 kPa
- Volume de l'armoire: 648 x 1800 x 993 mm
- Volume de calcul: 1048 x 2200 x 1393 mm
- Modèle de turbulence: k-ε
- 14 sous-ensembles
- 3'690'000 mailles
- 15 ventilateurs représentés par des courbes $P = f(V)$ et un taux de rotation
- Capacité mémoire vive utilisée pendant les calculs: 1200 Mo
- Temps de calcul pour une solution: 14 h (PC 2 processeurs Xeon 2,8 GHz)

Modèles développés ou acquis par le CMEFE

CMEFE_ACL:	analyse de couches limites
CMEFE_PAN:	écoulements non visqueux
CMEFE_Pint:	circulation en tunnels
CMEFE_Ray:	chauffage IR et absorption
CMEFE_Pseudo:	calcul d'écoulements transsoniques par une méthode pseudo-stationnaire
CMEFE_Super:	calcul d'écoulements supersoniques par une méthode aux différences finies
Flotherm:	aérothermique des systèmes électroniques
Modèles d'écoulements visqueux en volumes finis	
Mailleurs et post-processeurs	

modèle pour valider les résultats à l'aide des valeurs expérimentales: dix-sept points pour les températures et quatorze pour les vitesses. Le programme a fourni en chacun de ces points, les valeurs des paramètres de l'écoulement. La figure 8 présente la comparaison entre les valeurs mesurées et celles issues des calculs.

On constate que le modèle conduit à des valeurs très proches de celles qui ont été mesurées. Il s'avère extrêmement fiable et ce, malgré la complexité de l'ensemble modélisé. Nous avons quantifié la plus forte différence entre le modèle et l'expérience à 5°C, dans une région à fort gradient. Pour la température de l'air dans les espaces libres de l'armoire, cette différence est inférieure à 4°C.

Conclusion

La simulation numérique du comportement aérothermique de composants électriques et électroniques constitue un moyen efficace pour obtenir des ensembles électriques compacts et bien refroidis. Des bibliothèques peuvent être établies par les différents intervenants: responsables des circuits imprimés, ingénieurs électriciens, développeurs des ensembles, etc. De cette manière, les aspects thermiques peuvent être pris en compte dès les premières heures de développement d'un ensemble. Cette procédure permet d'optimiser la géométrie de l'ensemble, au stade de sa conception déjà.

La validation d'un outil, préalablement à son utilisation, est fondamentale. Dans le cas qui nous concerne, la présente étude a montré que l'exactitude attendue est très bonne, tant sur le plan aérodynamique que sur le plan thermique. Elle a montré aussi que l'analyse correcte des conditions limites du domaine de calcul doit être faite avec beaucoup d'attention.

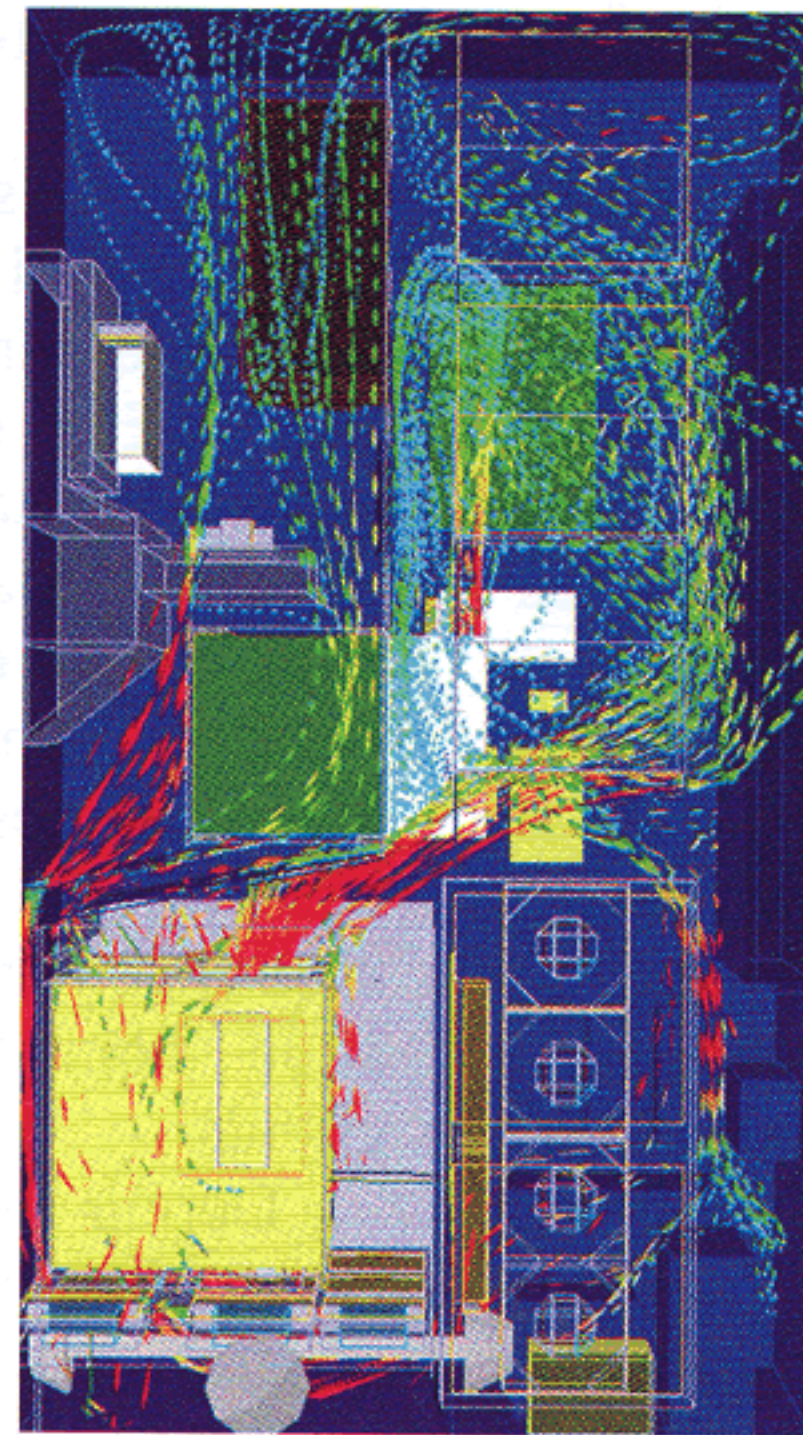
Bibliographie

- [1] Patankar, S. V., *Numerical heat transfer and fluid flow*, New York, Hemisphere Publishing Corp., 1980.
- [2] Anderson, D. A., Tannehill, J. C., Pletcher, R. H., *Computational*

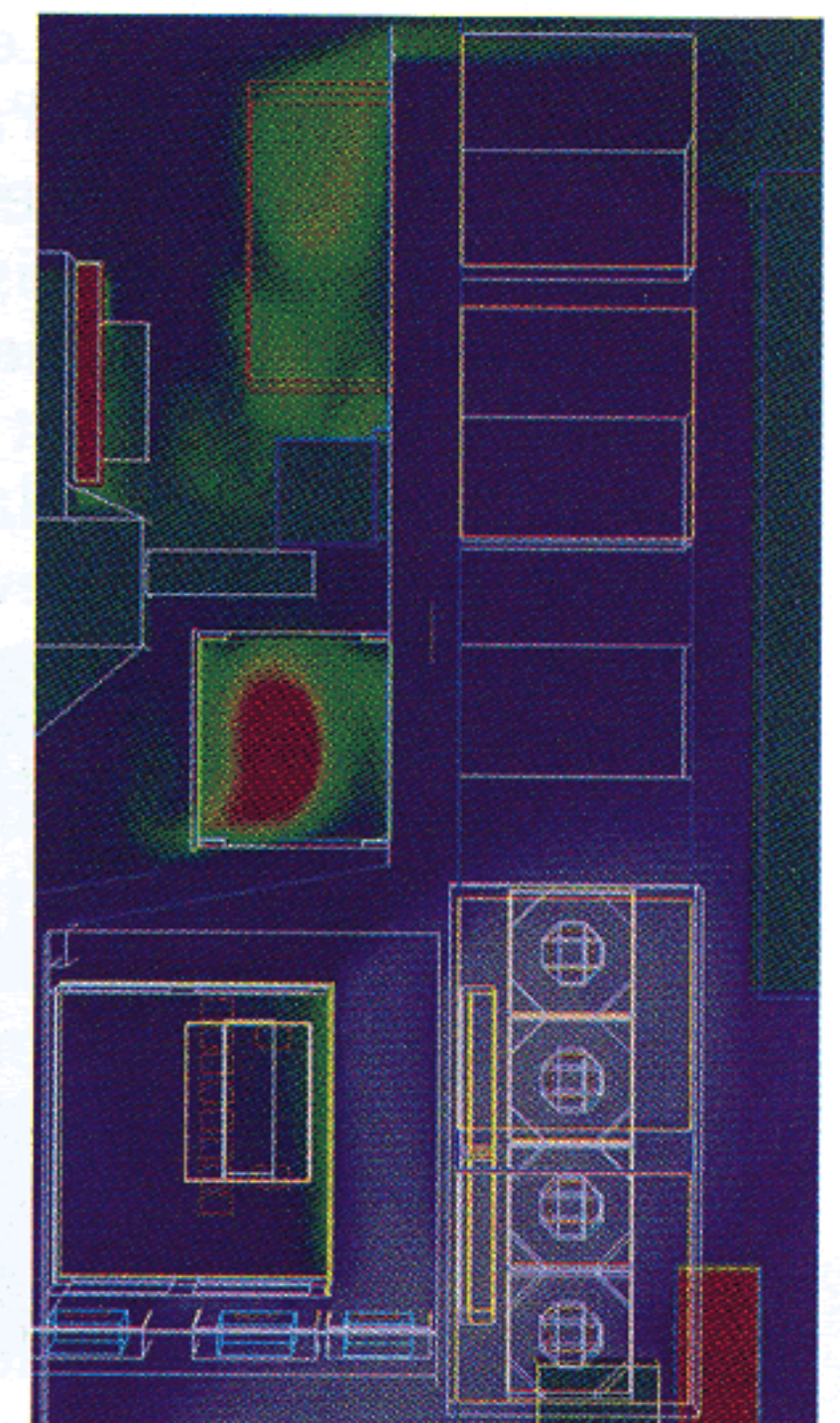
fluid mechanics and heat transfer, New York, Hemisphere Publishing Corp., 1984.

- [3] Perraudin, M., Haas, P., *Modélisation aérothermique d'une armoire de machines-outils. Résultats et validation du modèle*, Rapport CMEFE, CTSA-RT-01B, 27.11.2003.
- [4] Haas, P., *Aérodynamique des navettes ferroviaires du tunnel sous la Manche: un cas concret d'application des méthodes numériques*, Industrie Technique - Revue Technique Suisse, 19.05.1992.

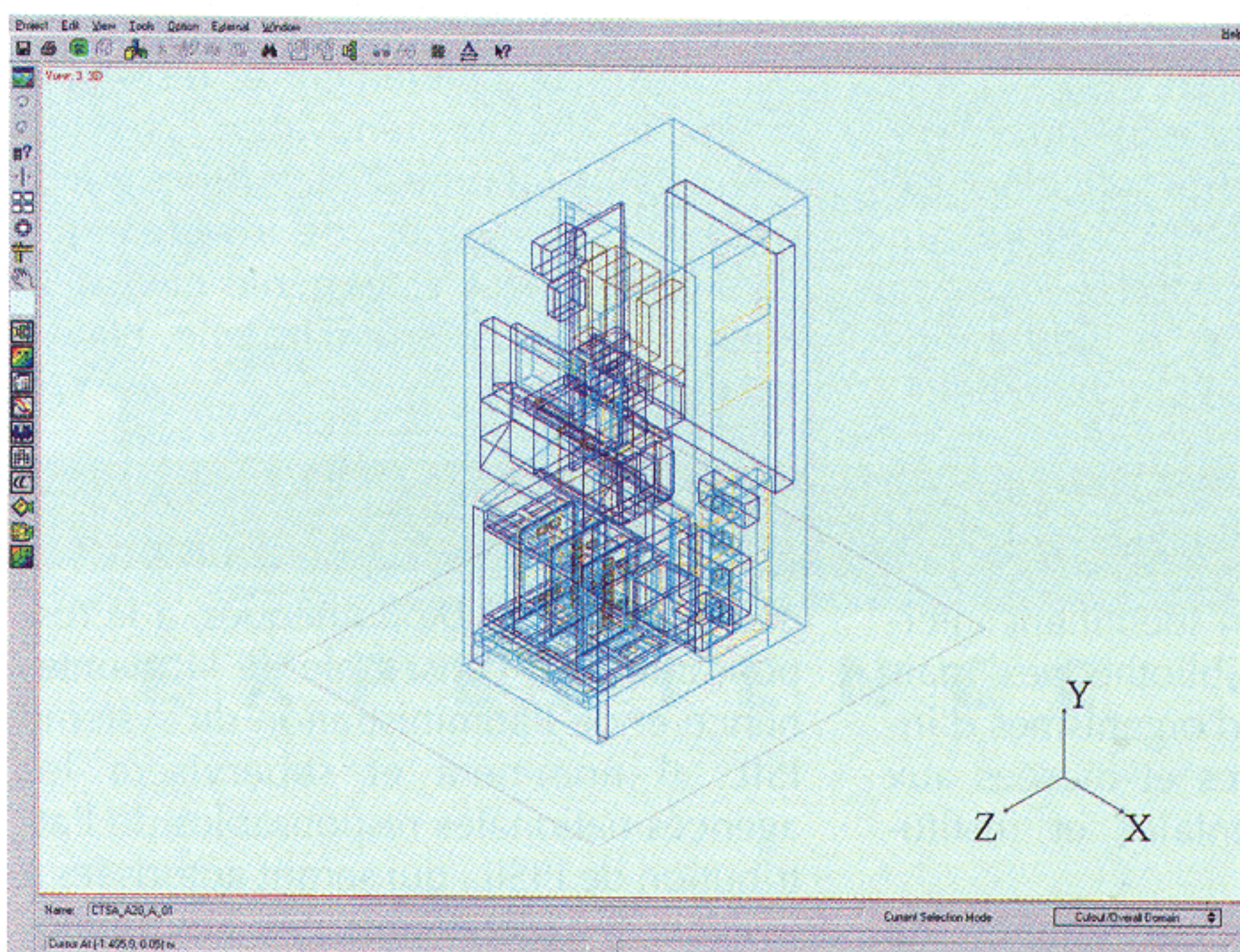
CMEFE - Groupe de compétences en mécanique des fluides et procédés énergétiques
Ecole d'ingénieurs
1213 Petit-Lancy
Tél. 022 793 21 25
cmefe@eig.unige.ch
<http://eig.unige.ch/cmefe>



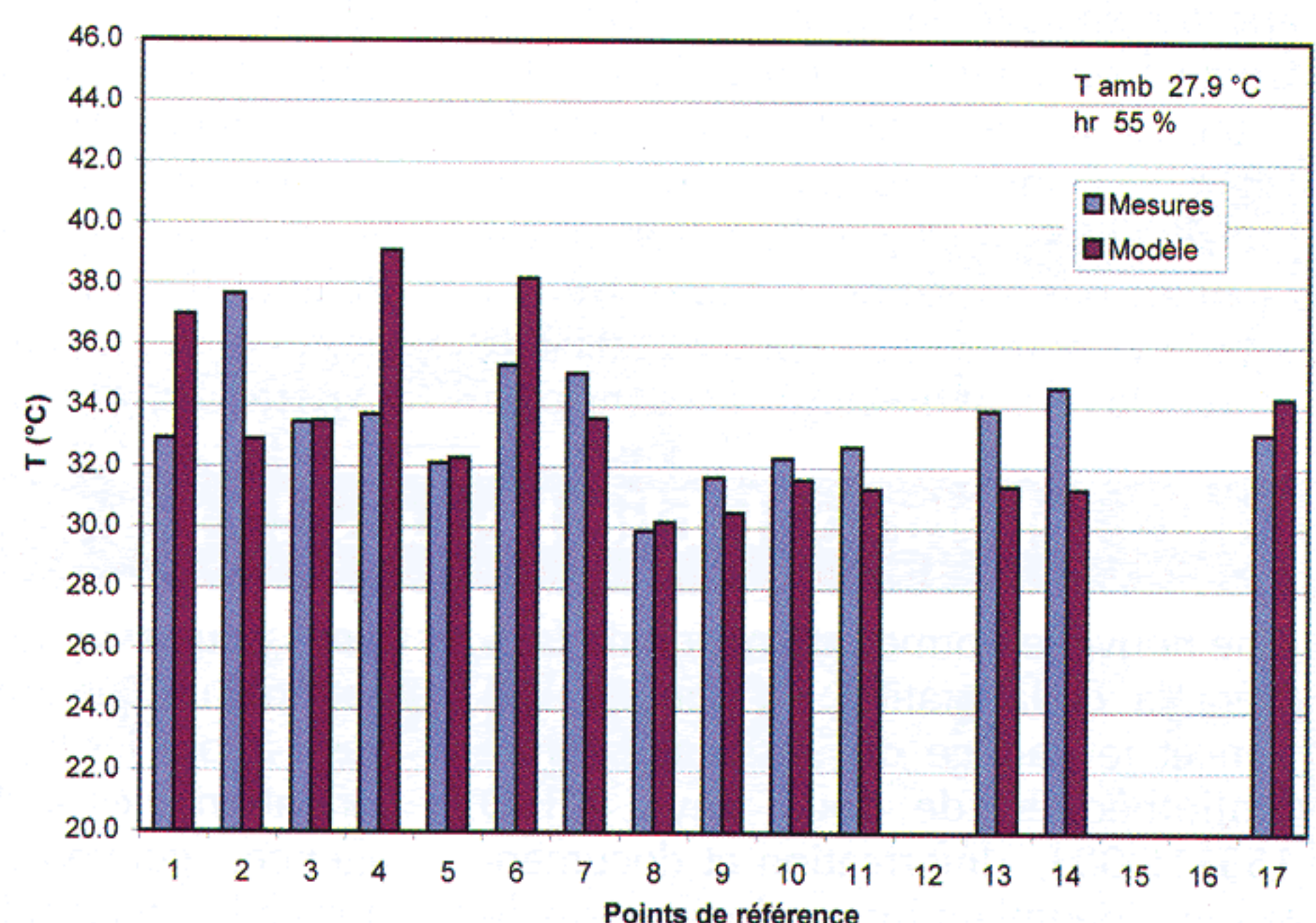
Lignes de courant



Champ de températures



Vue des sous-ensembles du modèle



Comparaison des valeurs mesurées et calculées