

# Optimisation du Procédé par Modélisation

Marc Dupuis

Les modèles thermiques

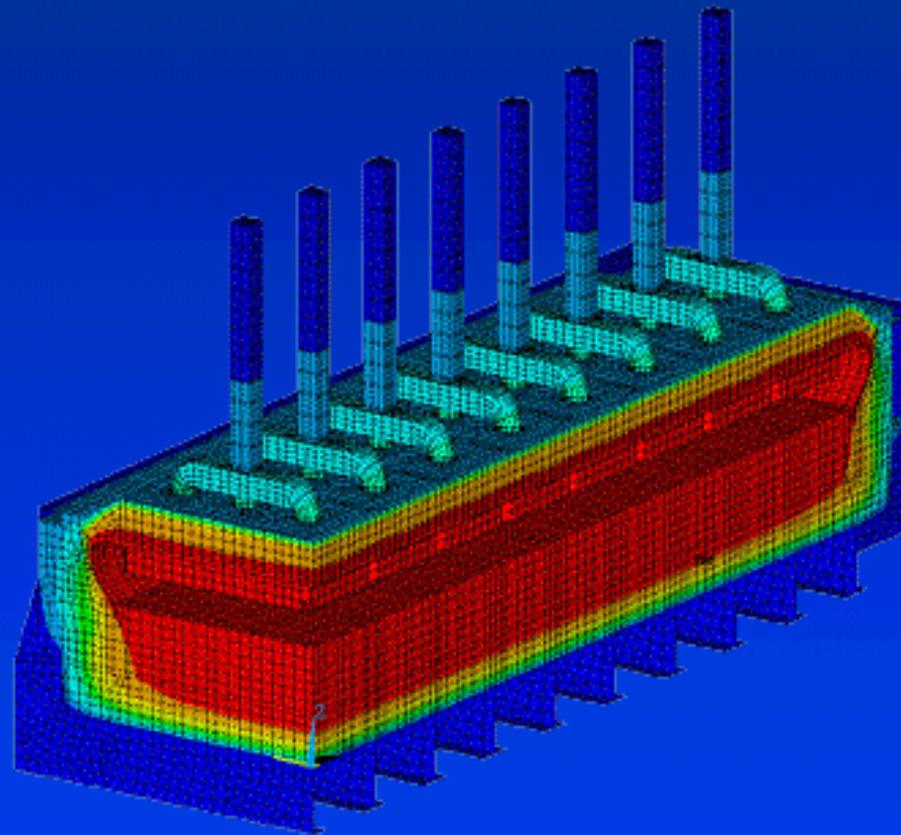
**GENISIM**

---

**GENISIM**

# Les modèles thermo-électriques 2D et 3D stationnaires

- caractérisés par une discrétisation détaillée de la géométrie de la cuve

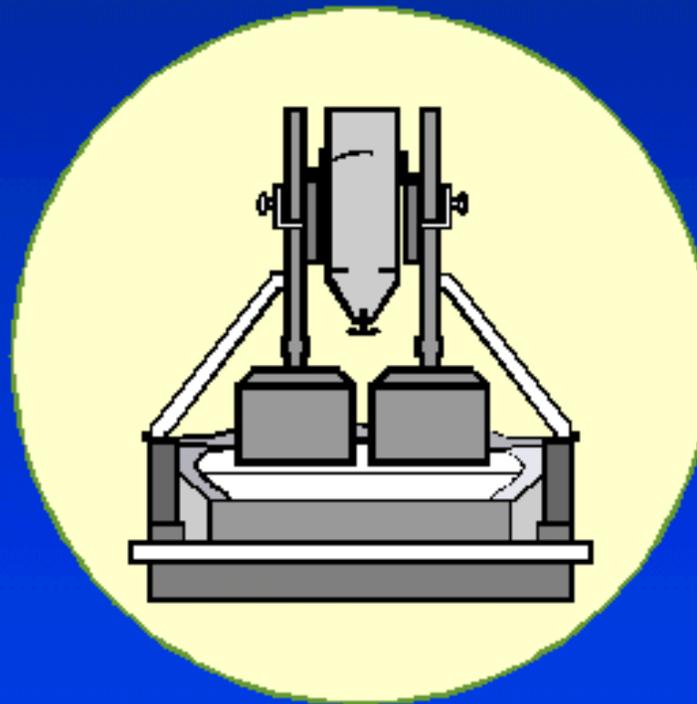


# Les modèles 0D et 1D dynamiques

- caractérisés par une représentation géométrique du revêtement très grossière

## Modèle du procédé:

- bilan de chaleur
- bilans de masse



## Stratégie de contrôle:

- contrôle de résistance
- suivi des événements

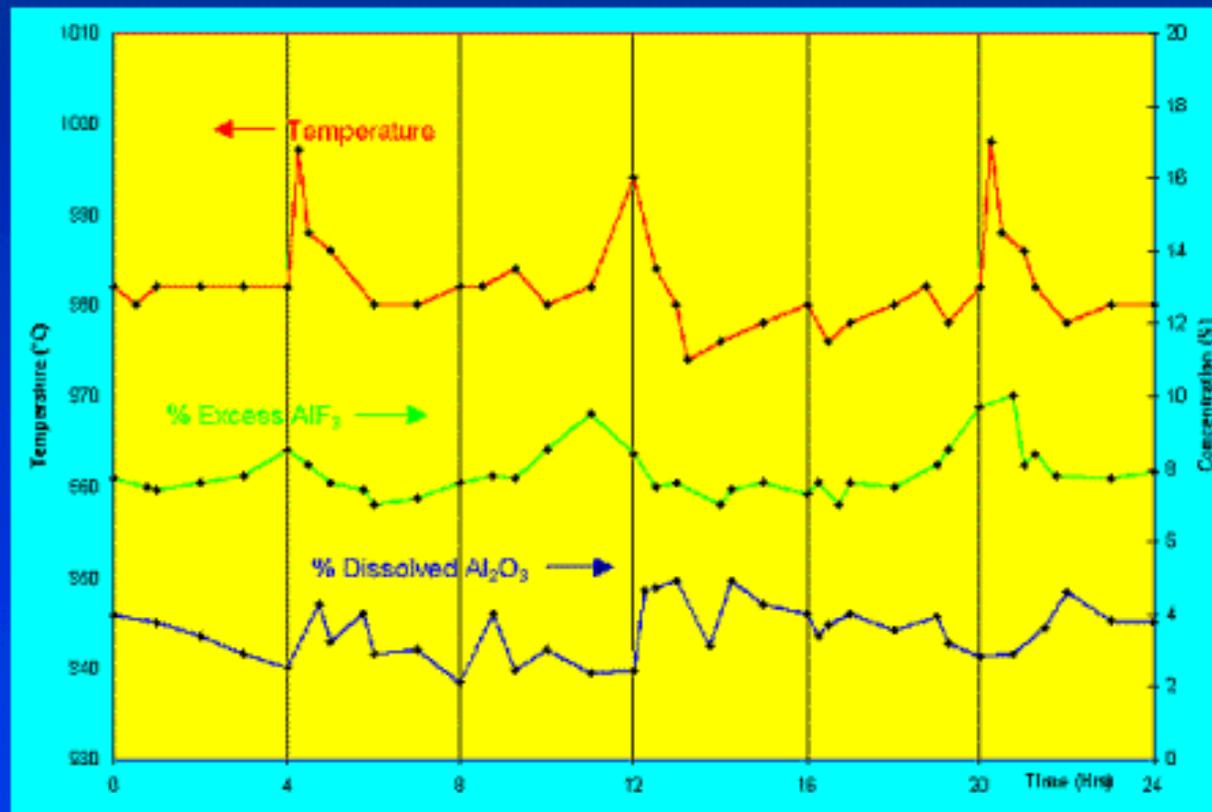
# Partie 1:

## Travaux pratiques sur la notion de surchauffe de la cuve

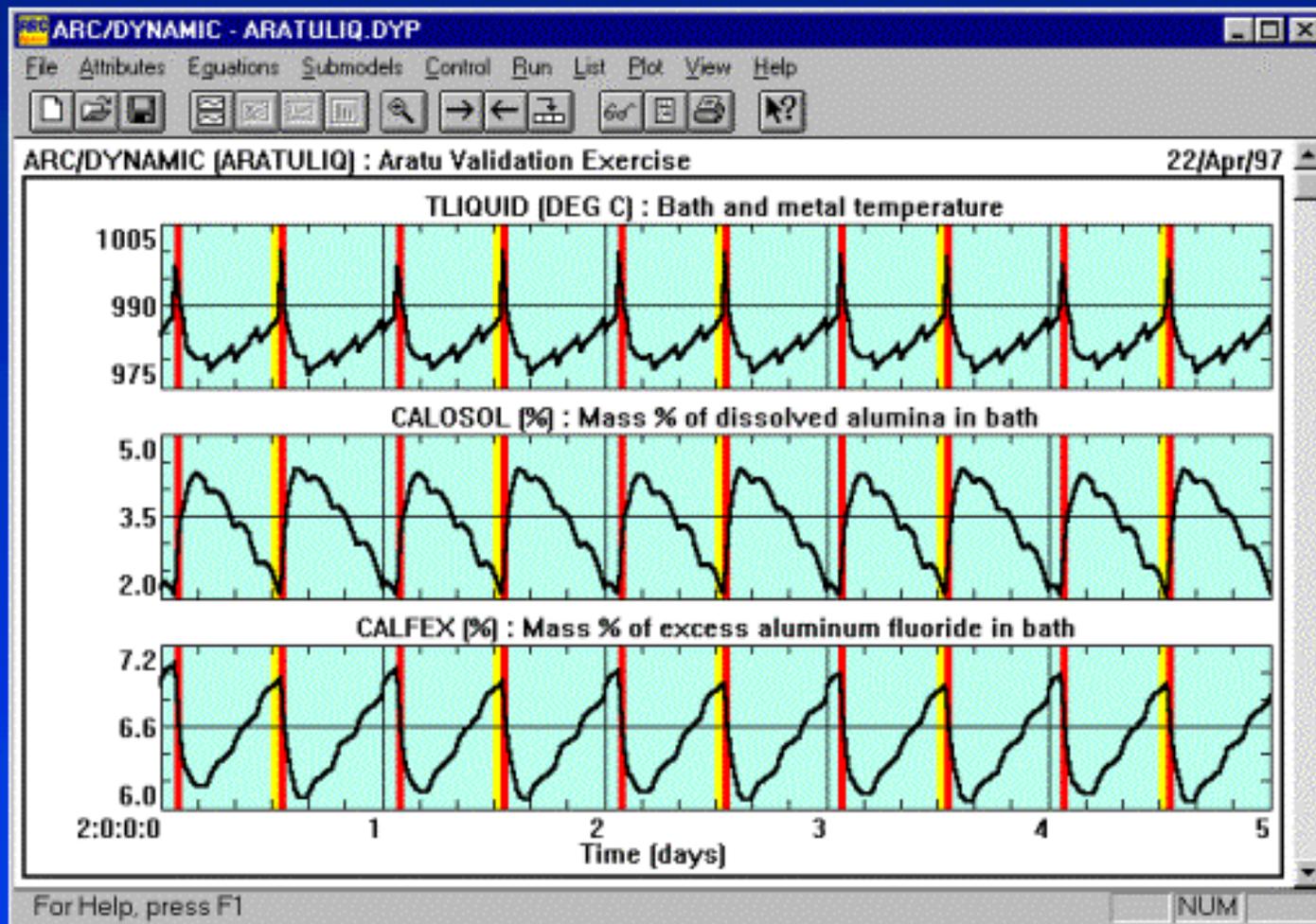
- **température liquidus**
  - fonction de la concentration d'alumine dissoute
- **surchauffe liquidus**
  - coefficient de transfert de chaleur requis de l'ordre de  $2000 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$
- **température eutectique**
  - indépendante de la concentration d'alumine dissoute
- **surchauffe eutectique**
  - coefficient de transfert de chaleur requis de l'ordre de  $650 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

# Campagne de mesure d'Aratu en 1984

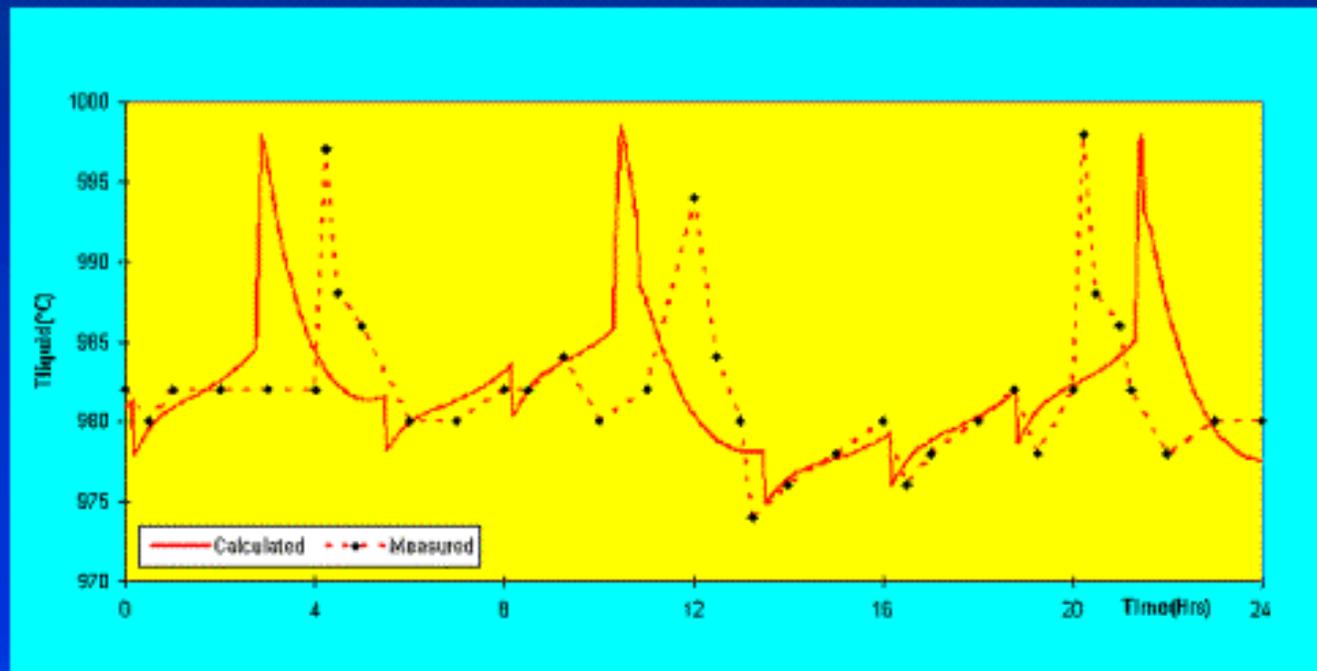
- Quelle définition de la surchauffe va permettre de reproduire le comportement mesuré ?



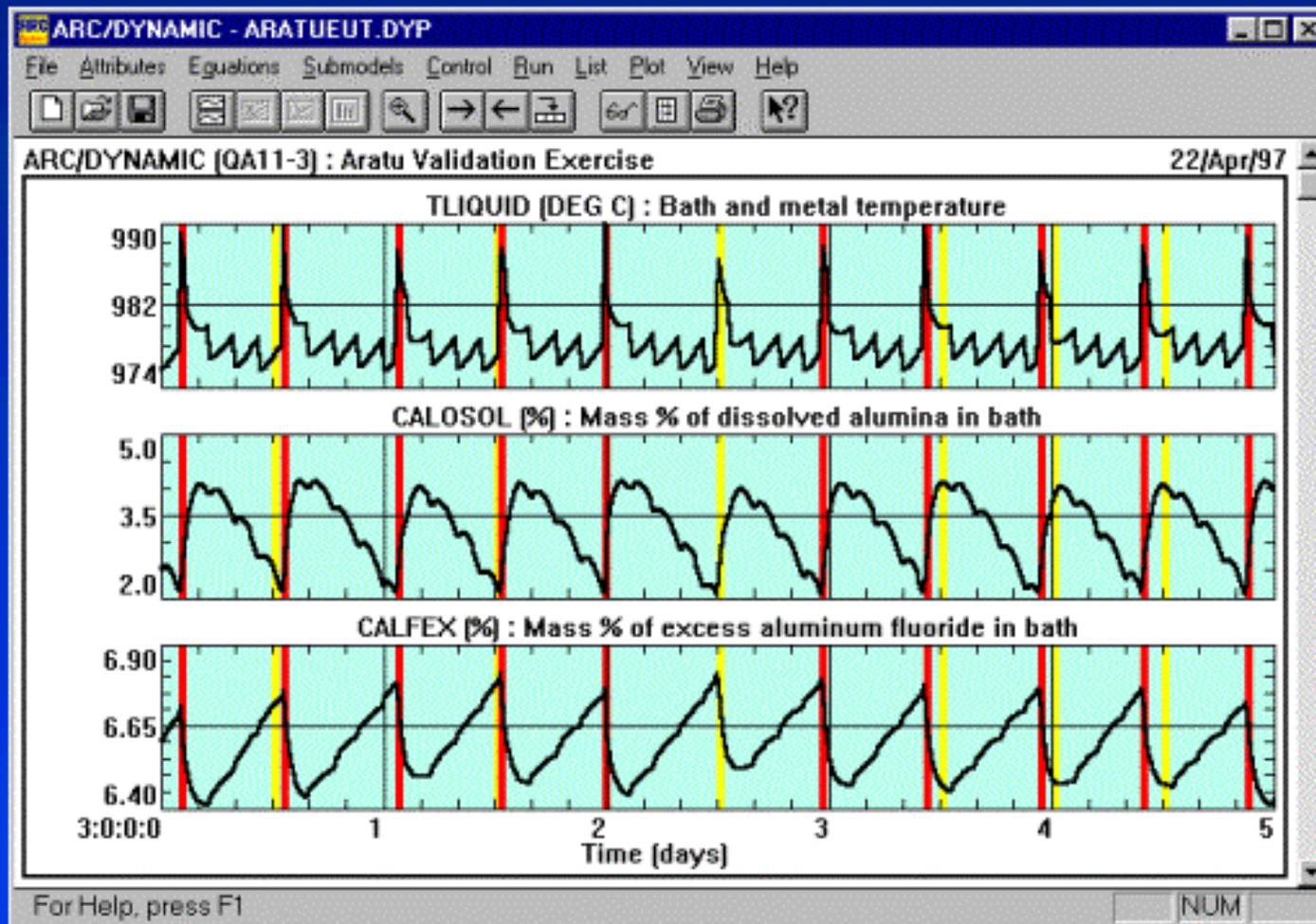
# Résultats du modèle dynamique employant la surchauffe liquidus



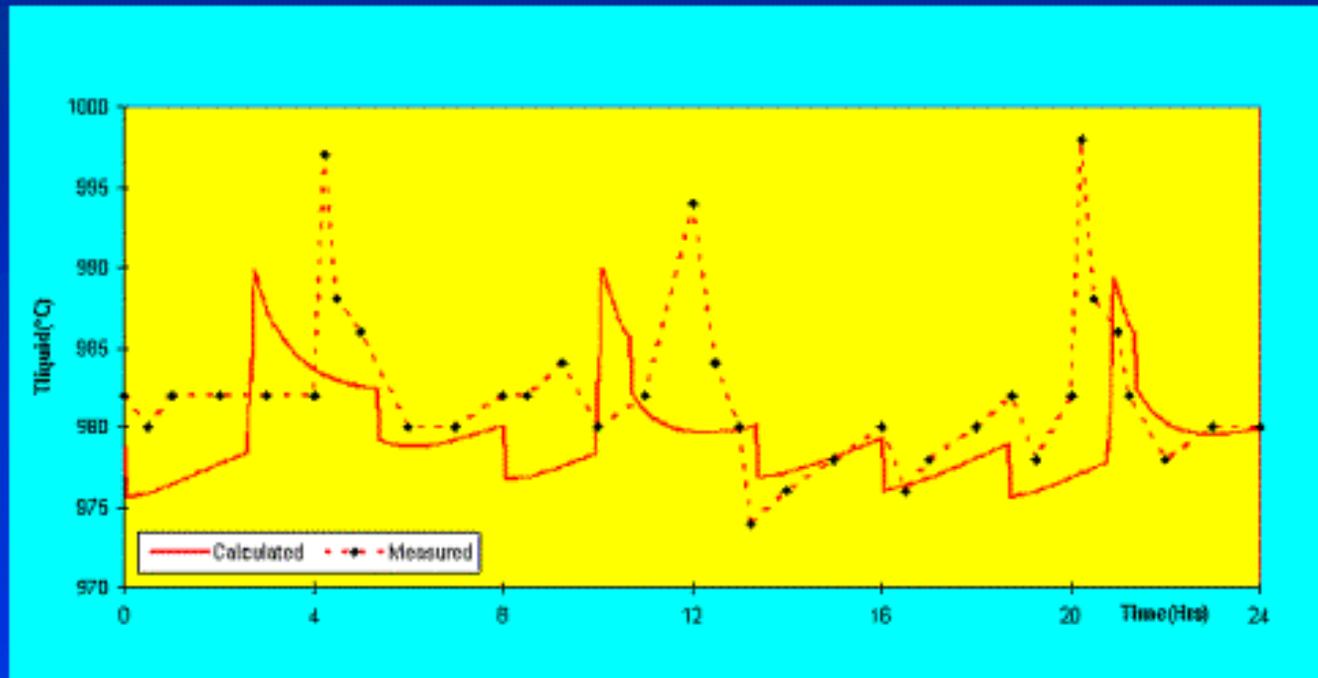
# Comparaison directe en employant la surchauffe liquidus



# Résultats du modèle dynamique employant la surchauffe eutectique



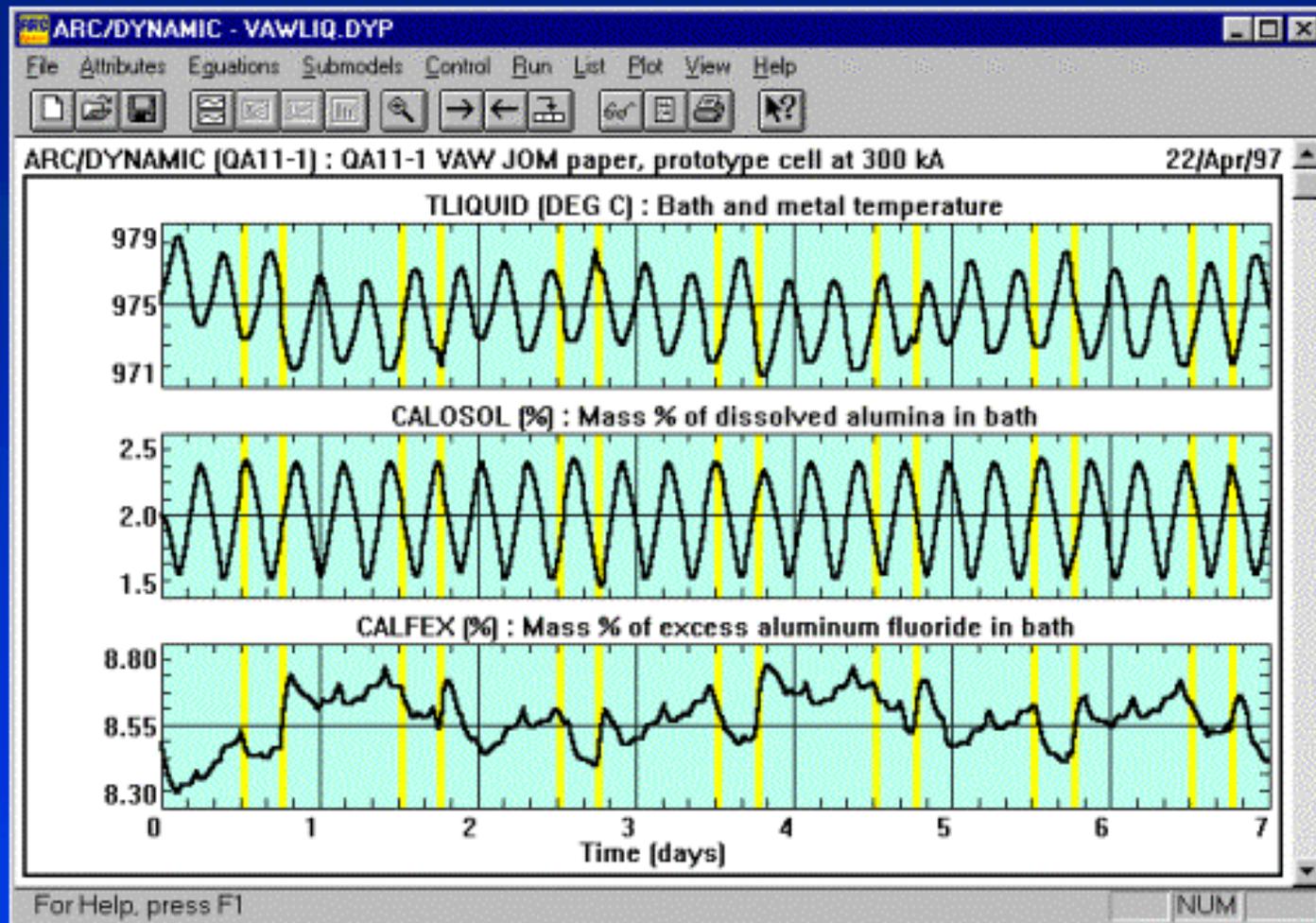
# Comparaison directe en employant la surchauffe eutectique



# Observations

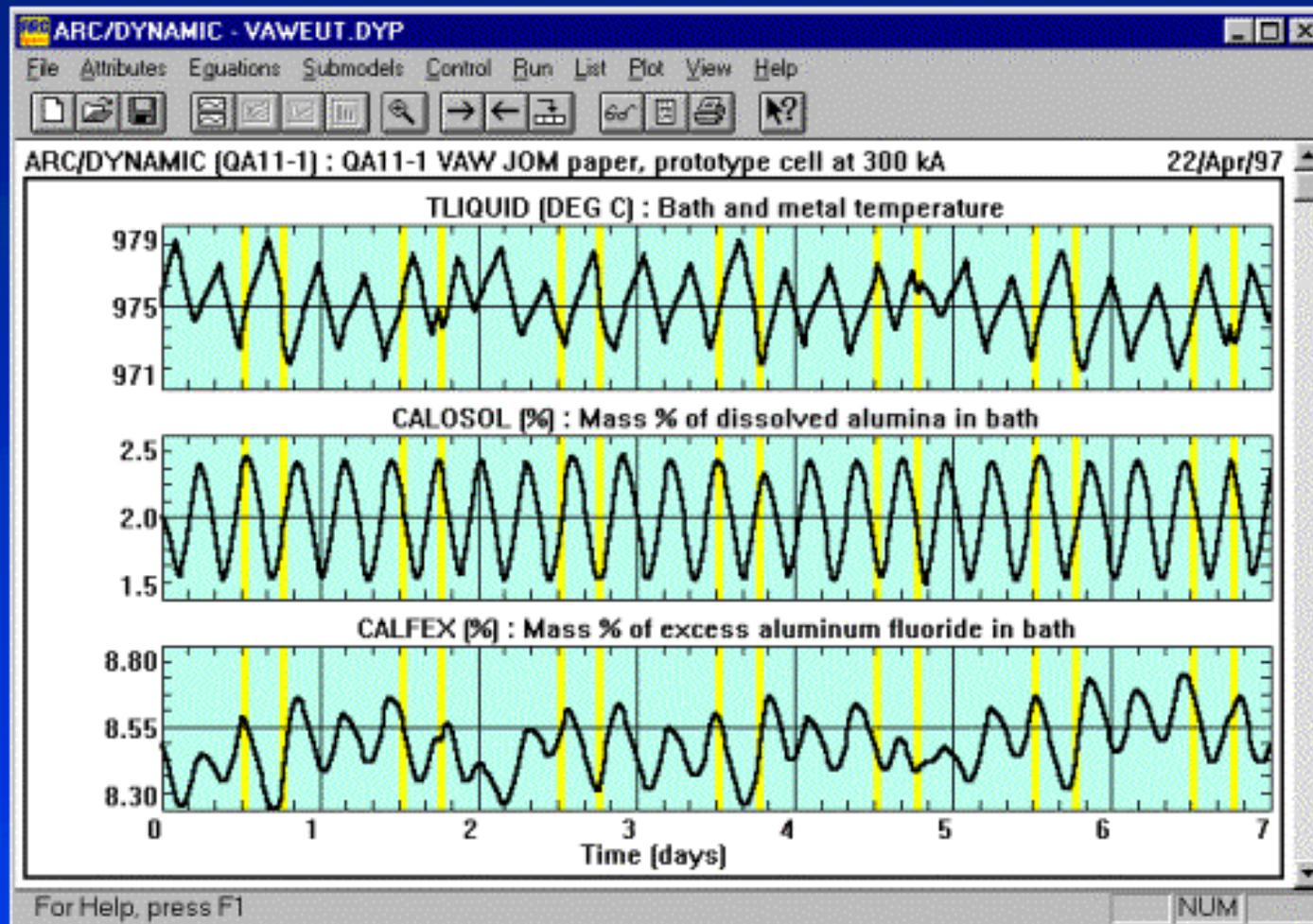
- le modèle utilisant la surchauffe liquidus permet de reproduire le comportement mesuré en tous points, mais pas le modèle utilisant la surchauffe eutectique
- c'est la forte variation de la concentration d'alumine dissoute due aux cycles de cassage latéral qui a permis de mettre en évidence la différence de comportement entre les deux modèles de surchauffe
- l'influence de la différence entre les coefficients de transfert de chaleur est beaucoup plus difficile à identifier

# Simulation dynamique d'une cuve à haut ampérage avec piquage central



Résultats obtenus en utilisant la surchauffe liquidus

# Simulation dynamique d'une cuve à haut ampérage avec piquage central

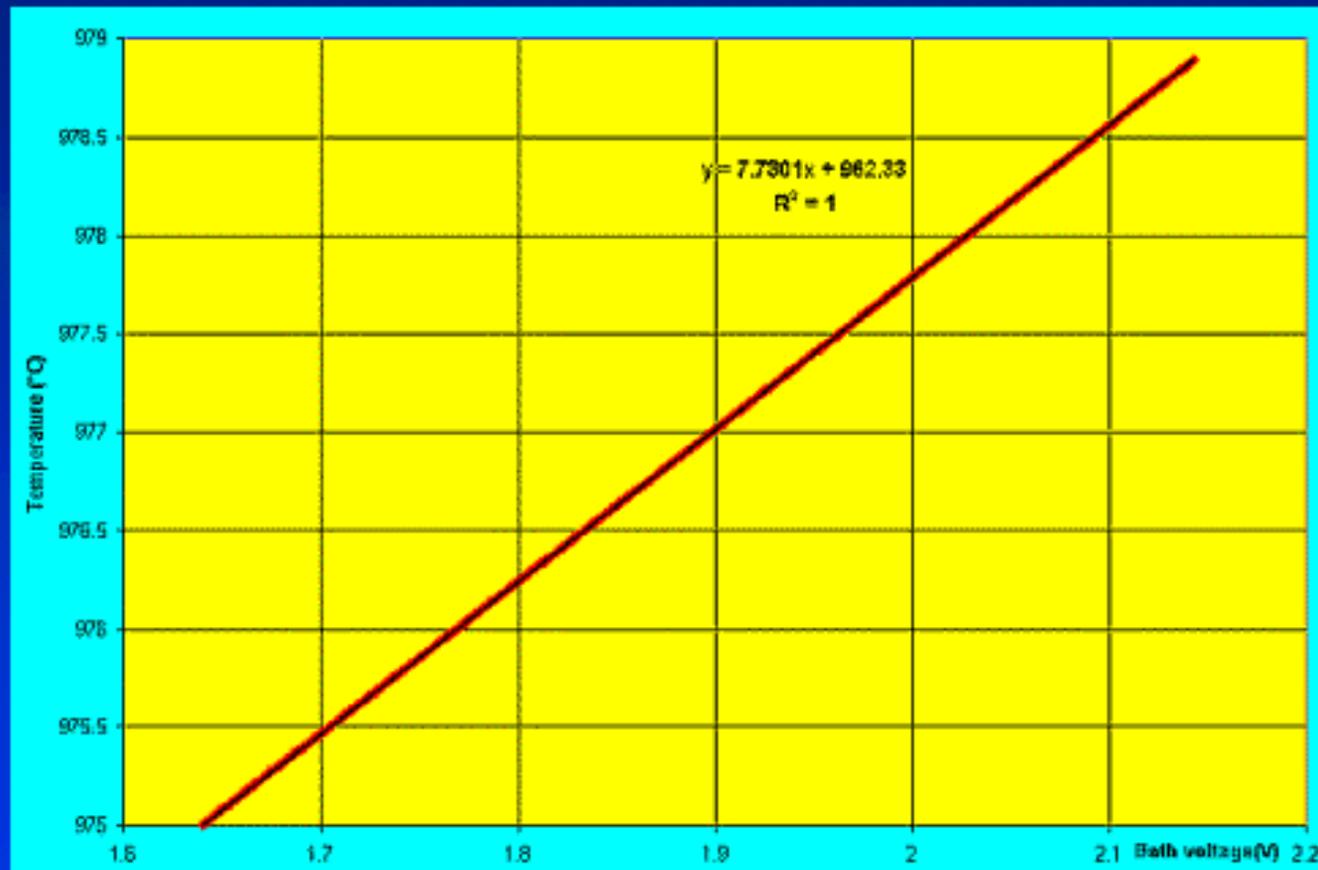


Résultats obtenus en utilisant la surchauffe eutectique

# Observations

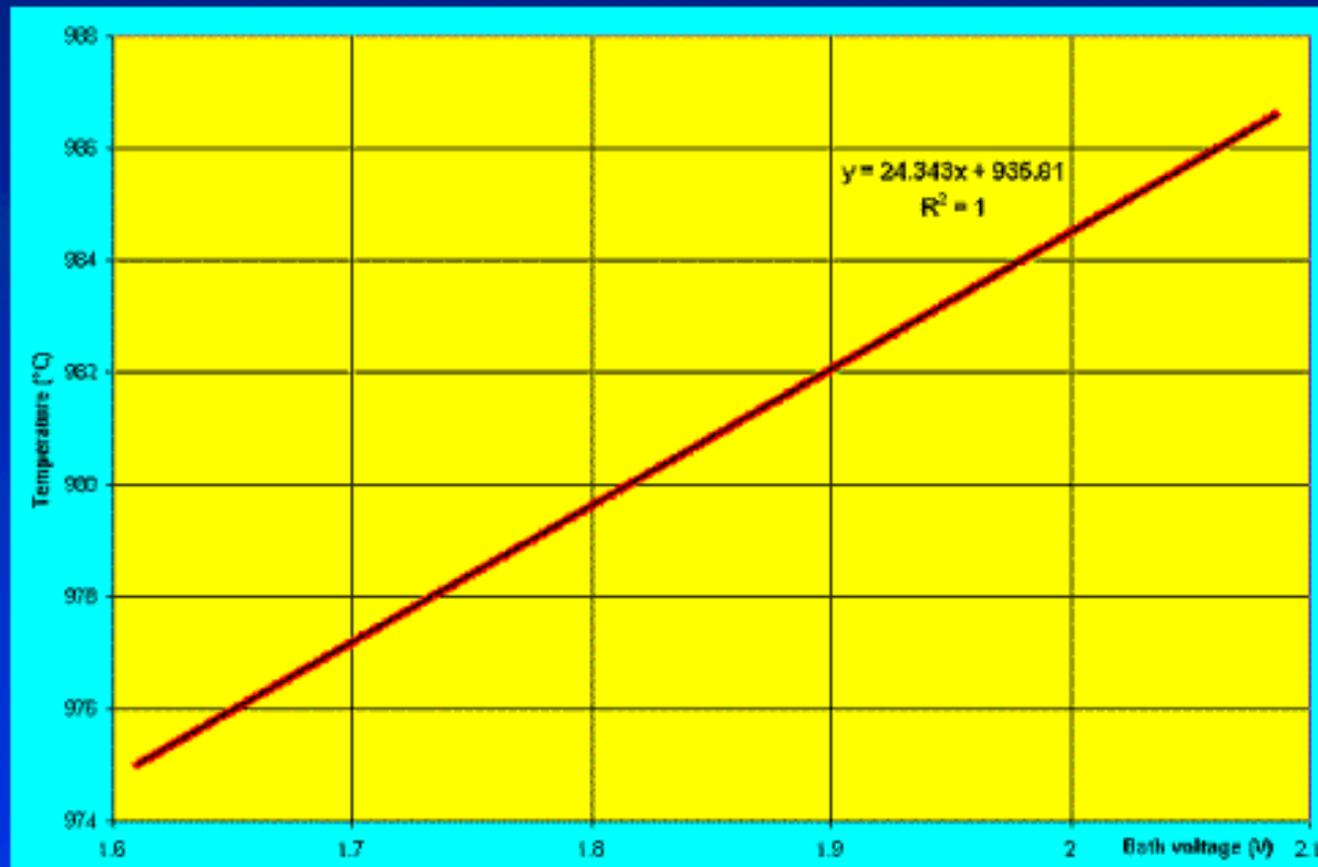
- l'évolution dynamique de la température est maintenant très similaire parce que la concentration d'alumine dissoute varie beaucoup moins pour une cuve "PBF"
- on constate toutefois que les inversions de température sont plus brusques avec le modèle utilisant la surchauffe eutectique qu'avec le modèle utilisant la surchauffe liquidus
- par contre, l'évolution de la concentration en excès d' $AlF_3$  est plus affectée parce qu'influencée par le taux de formation de la gelée, lui-même influencé par le coefficient de transfert de chaleur

# Mesure de la corrélation entre la température et le voltage dans le bain



Résultats obtenus en mode stationnaire en utilisant la surchauffe liquidus: 0.8 °C par 100 mV supplémentaire

# Mesure de la corrélation entre la température et le voltage dans le bain

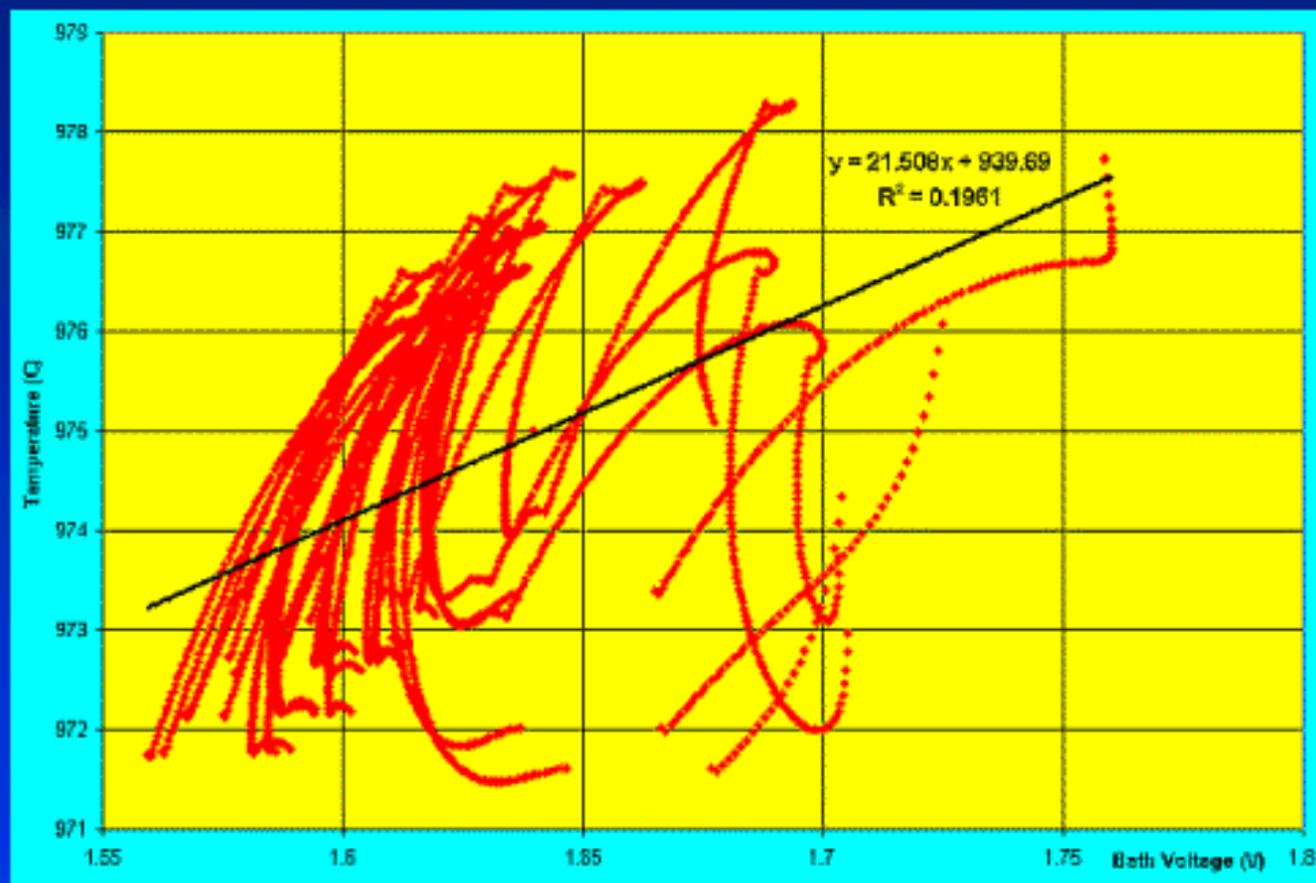


Résultats obtenus en mode stationnaire en utilisant la surchauffe eutectique: **2.4 °C par 100 mV supplémentaire**

## Observations

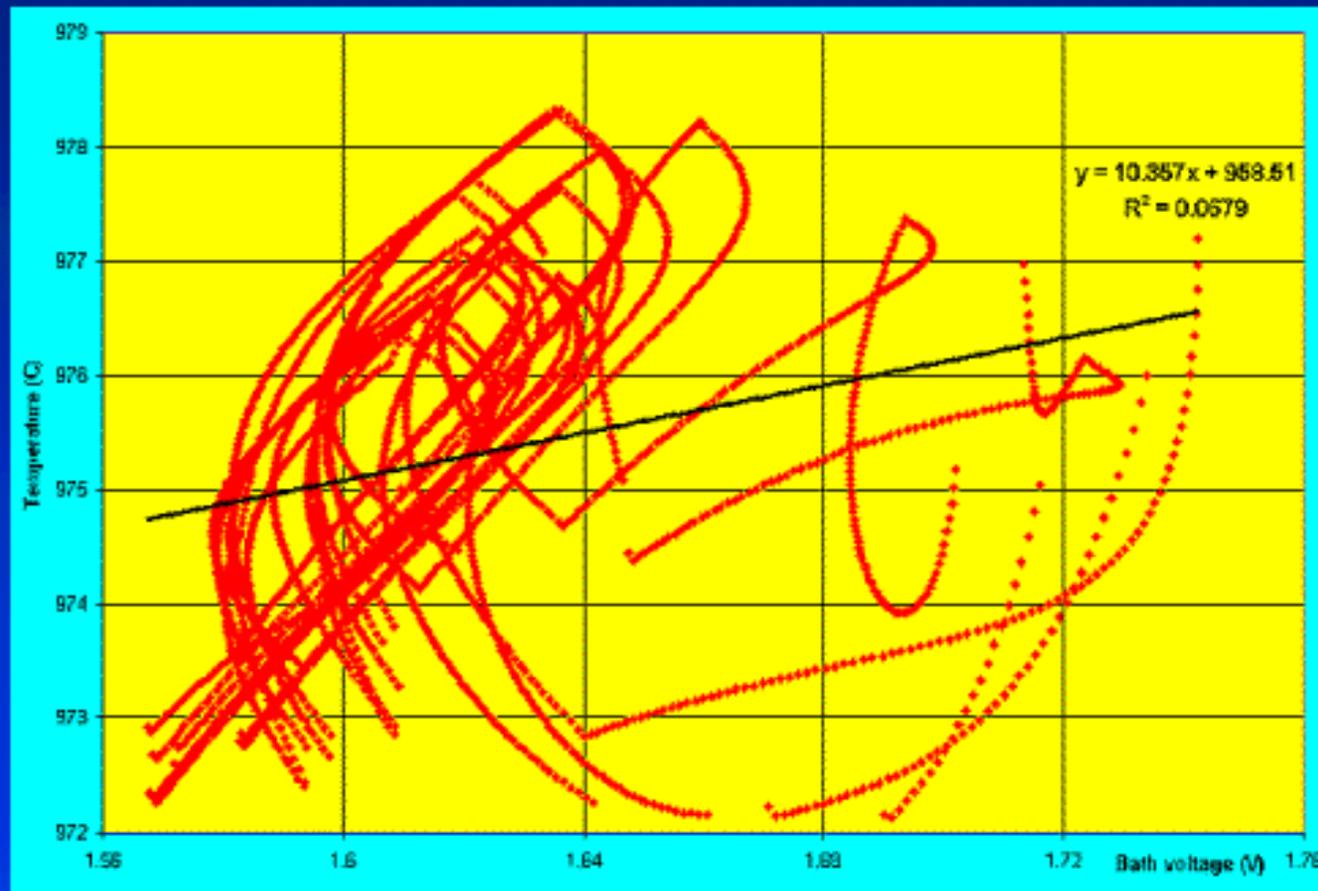
- l'utilisation de l'option Monte Carlo de ARC/DYNAMIC permet de résoudre une succession de solutions stationnaires en faisant varier un seul paramètre d'entrée, ce qui permet de générer très facilement ce type de corrélation
- on constate que l'augmentation de la température avec le modèle liquidus est trois fois moins grande qu'avec le modèle eutectique et surtout qu'elle est de moins de  $1^{\circ}\text{C}$  par 100 mV d'augmentation de la chaleur interne
- le coefficient de corrélation est de 1.0, parce qu'il est obtenu dans des conditions d'équilibre thermique idéal que l'on ne peut retrouver dans une cuve en opération

# Mesure de la corrélation entre la température et le voltage dans le bain



Résultats obtenus en mode dynamique en utilisant la surchauffe liquidus: 2.2 °C par 100 mV supplémentaire

# Mesure de la corrélation entre la température et le voltage dans le bain



Résultats obtenus en mode dynamique en utilisant la surchauffe eutectique: 1.0 °C par 100 mV supplémentaire

# Observations

- en mode dynamique, la cuve n'est pas en équilibre thermique, c'est pourtant la base de l'établissement d'une corrélation entre la température et le voltage dans le bain
- le coefficient de corrélation est de l'ordre de 0.1, donc non significatif, parce qu'il y a beaucoup d'autres paramètres qui varient et qui influencent fortement la température d'opération
- les coefficients obtenus en mode dynamiques indiquent que le modèle liquidus est plus sensible que le modèle eutectique aux variations de la chaleur interne; cela illustre le danger de tirer des conclusions sur des corrélations ayant des coefficients de corrélation non significatifs

# Conclusions de la partie 1:

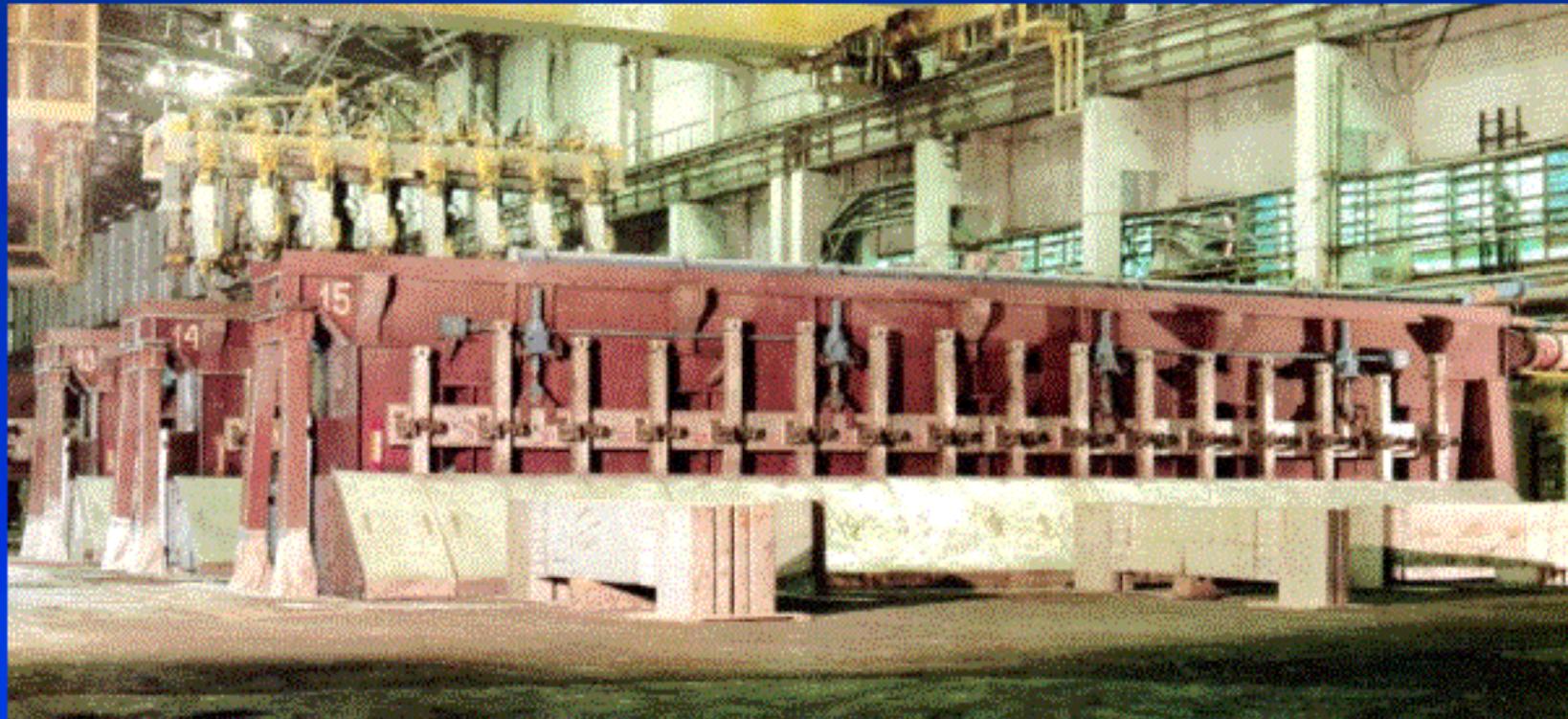
- l'emploi de ARC/DYNAMIC, un modèle thermo-électrique dynamique 0D, comme outil de formation a été illustré
- la notion de surchauffe, et surtout la différence entre la surchauffe liquidus et la surchauffe eutectique a été mise en évidence par l'emploi du modèle
- l'emploi du modèle pour confronter une hypothèse théorique à la réalité a aussi été présenté
- finalement, le modèle a été utilisé pour illustrer le danger associé à l'emploi non judicieux de corrélations statistiques

## Partie 2:

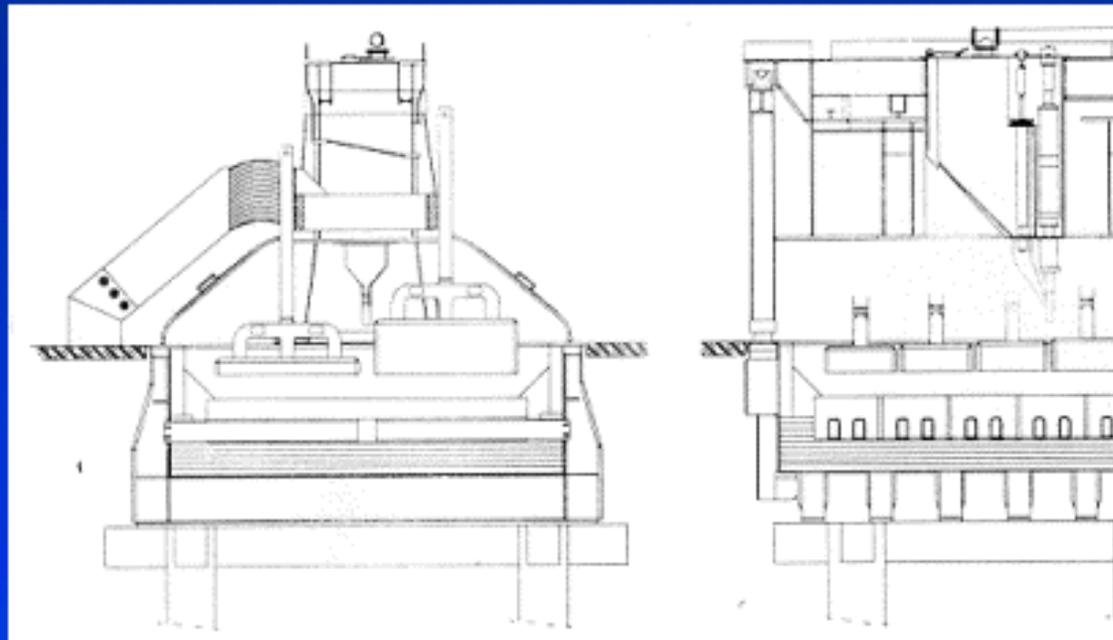
# Projet de "rétrofit" d'une cuve à haut ampérage

- cible du "rétrofit": minimiser la consommation énergétique "à tout prix"
- point de départ du projet: produire un modèle reproduisant le comportement thermo-électrique du design actuel
- nécessité donc de procéder à une campagne de mesure pour établir le bilan thermo-électrique d'une cuve "typique" en opération

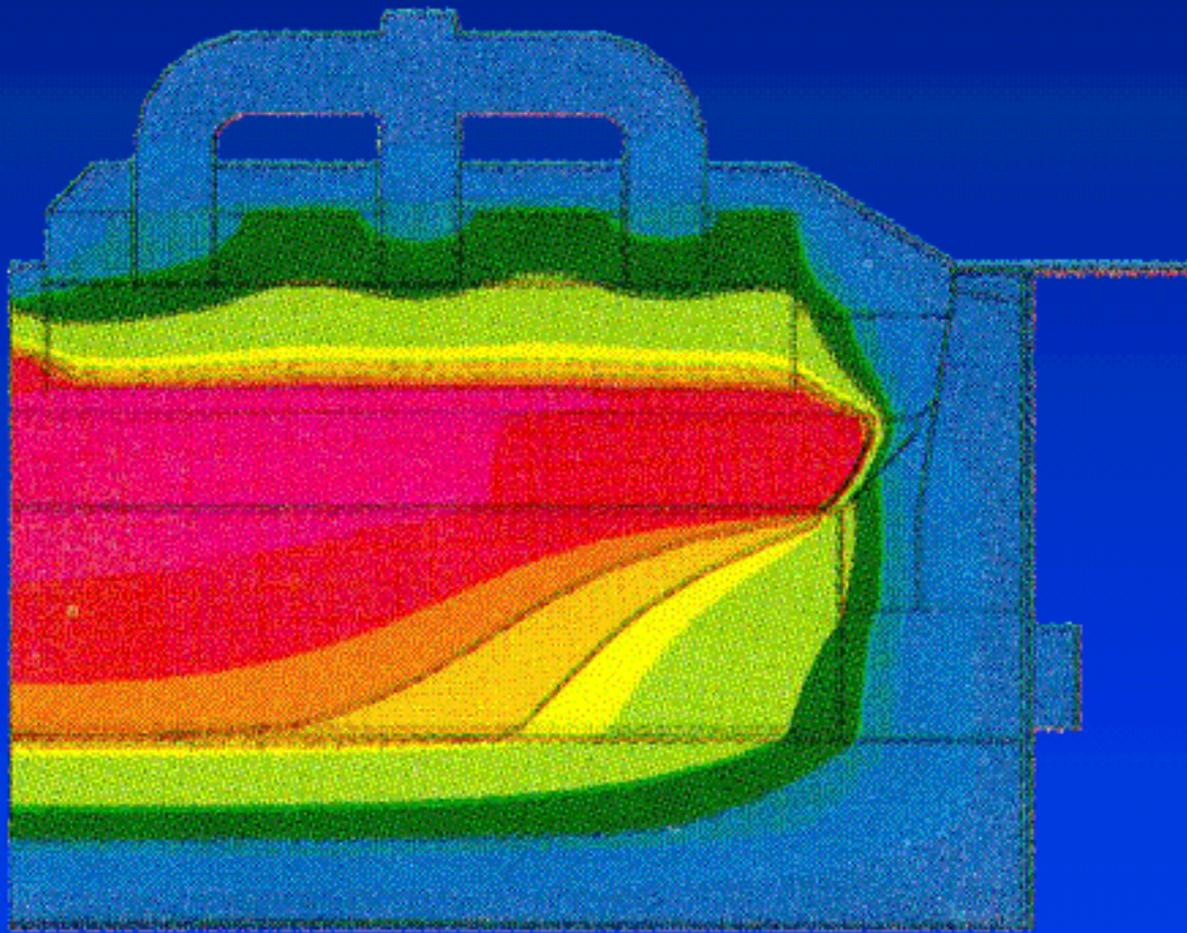
**Design de base inspiré d'une cuve  
expérimentale présentée par VAW dans  
JOM en février 1994**



**Design de base inspiré d'une cuve  
expérimentale présentée par VAW dans  
JOM en février 1994**



**Design de base inspiré d'une cuve  
expérimentale présentée par VAW dans  
JOM en février 1994**



# Données de base obtenues par la "campagne de mesure"

- données du design de base:

– ampérage	300 kA
– voltage de cuve	4.28 V
– température d'opération	975 °C
– consommation anodique	0.425 kg / kg Al
– chute de voltage cathodique	285 mV
– chute de voltage anodique	300 mV
– chute de voltage externe	300 mV
– perte de chaleur anodique	235 kW
– perte de chaleur cathodique totale	390 kW
– perte de chaleur par le fond cathode	120 kW

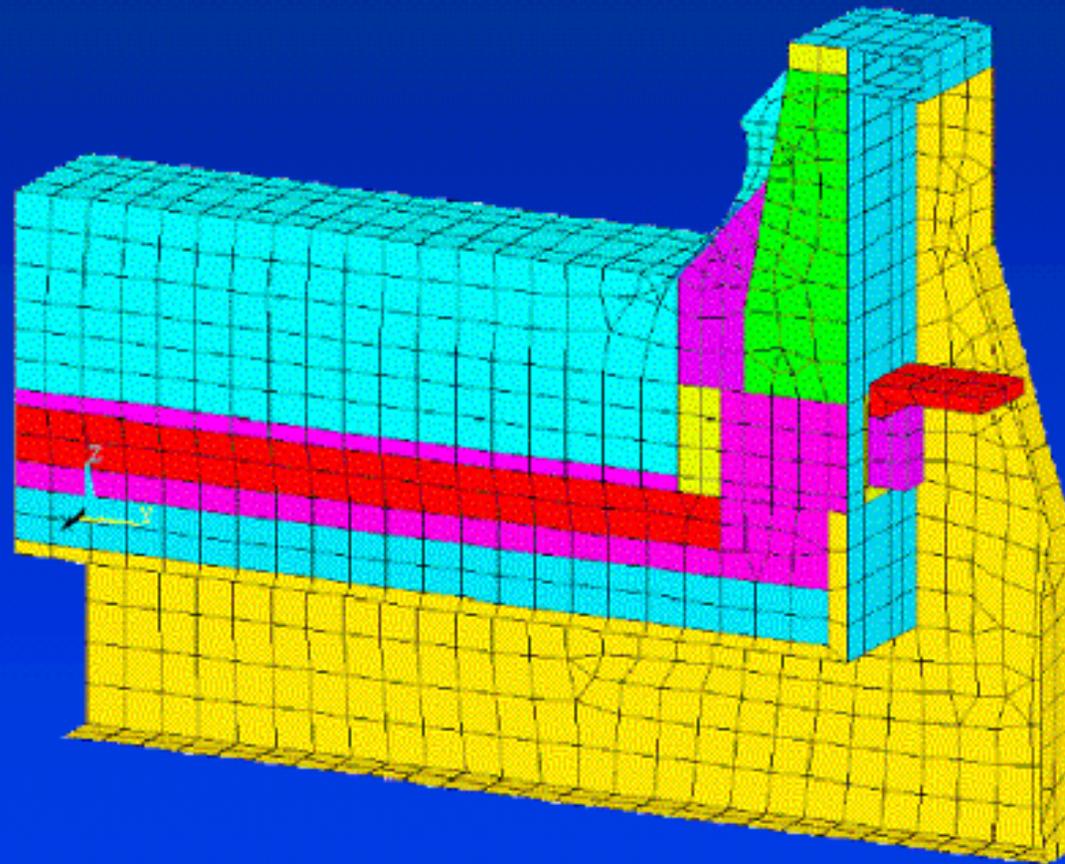
# Données de base obtenues par la "campagne de mesure"

## ● données du design de base (suite):

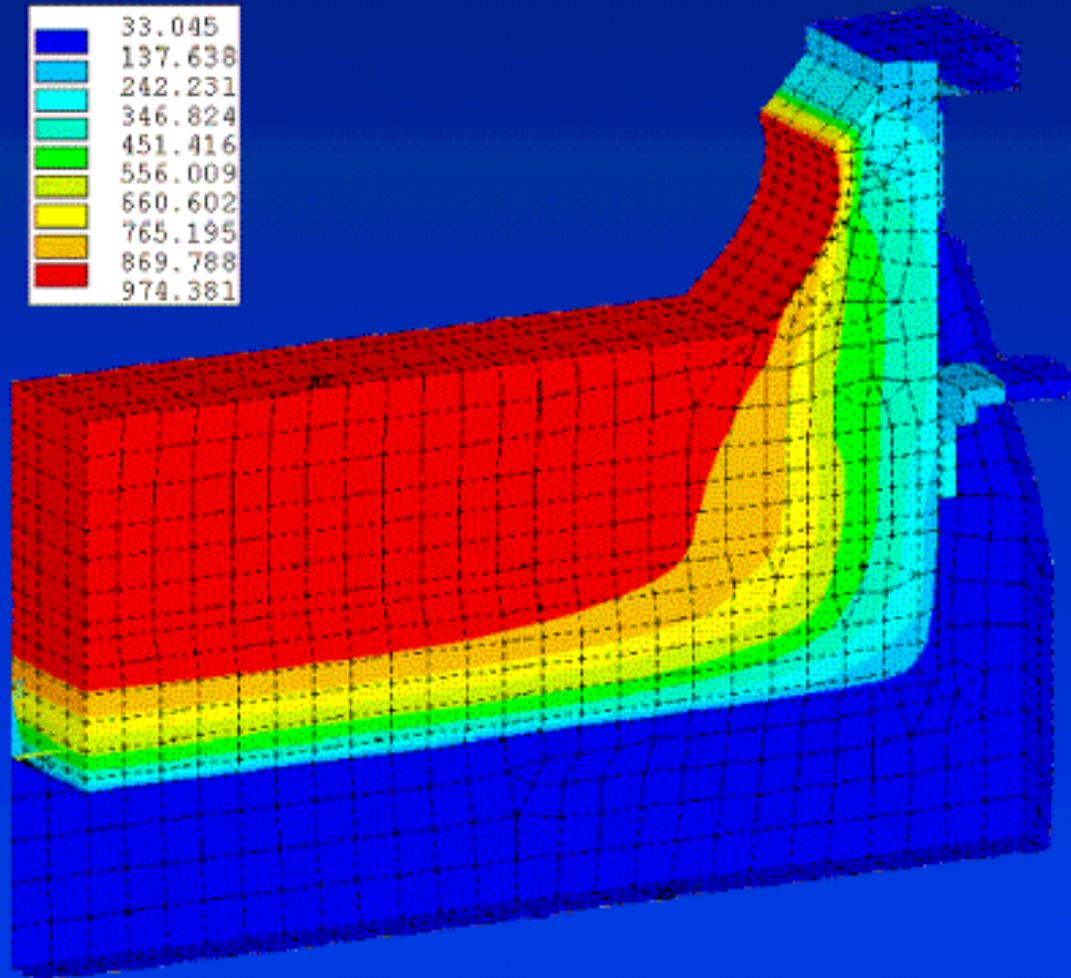
– niveau de métal	20 cm
– niveau de bain	20 cm
– ACD	5 cm
– épaisseur gelée niveau bain	8.9 cm
– épaisseur gelée niveau métal	2.4 cm
– surchauffe eutectique	21.6 °C
– excès de $AlF_3$	7.53 %
– chaleur interne	621.72 kW
– efficacité de courant	92.91 %
– consommation énergétique	13.75 kWh / kg

# Maillage du modèle de tranche de cathode

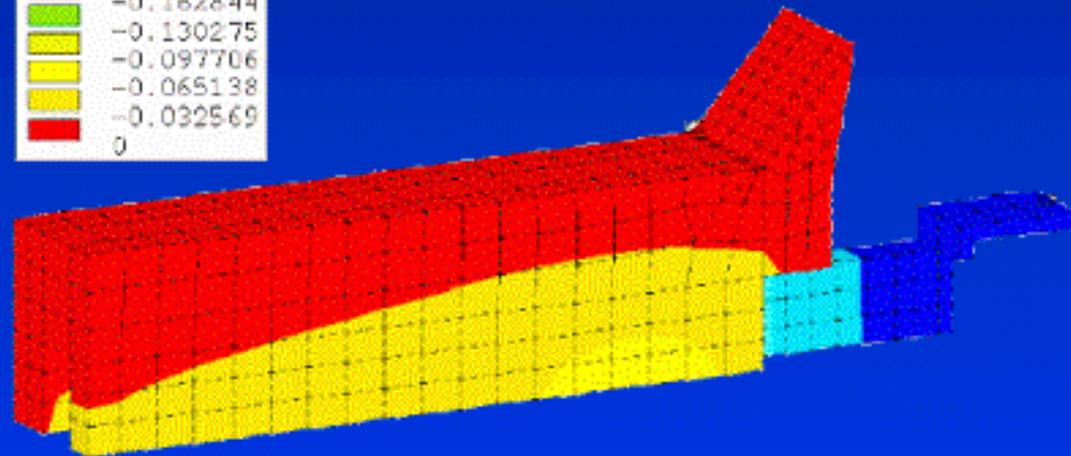
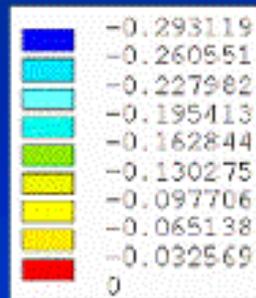
- épaisseur de la tranche:  $\frac{1}{2}$  bloc



# Solution thermique du modèle de tranche de cathode



# Solution électrique du modèle de tranche de cathode



# Sommaire des résultats du modèle de tranche de cathode:

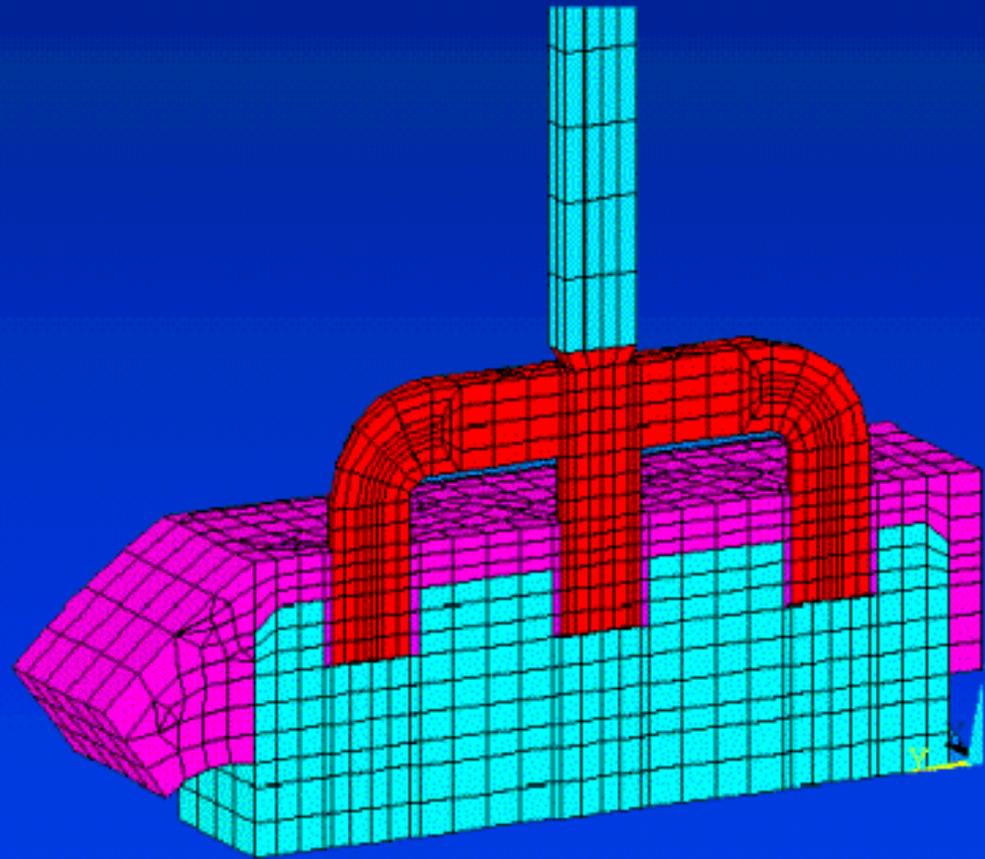
## ● résultats directs:

– perte de chaleur totale du modèle	4584 W
– perte de chaleur modèle par le fond	1653 W
– chute de voltage sans le flexible	286 mV
– flux thermique gelée niveau métal	14457 W / m <sup>2</sup>
– flux thermique gelée niveau bain	10109 W / m <sup>2</sup>

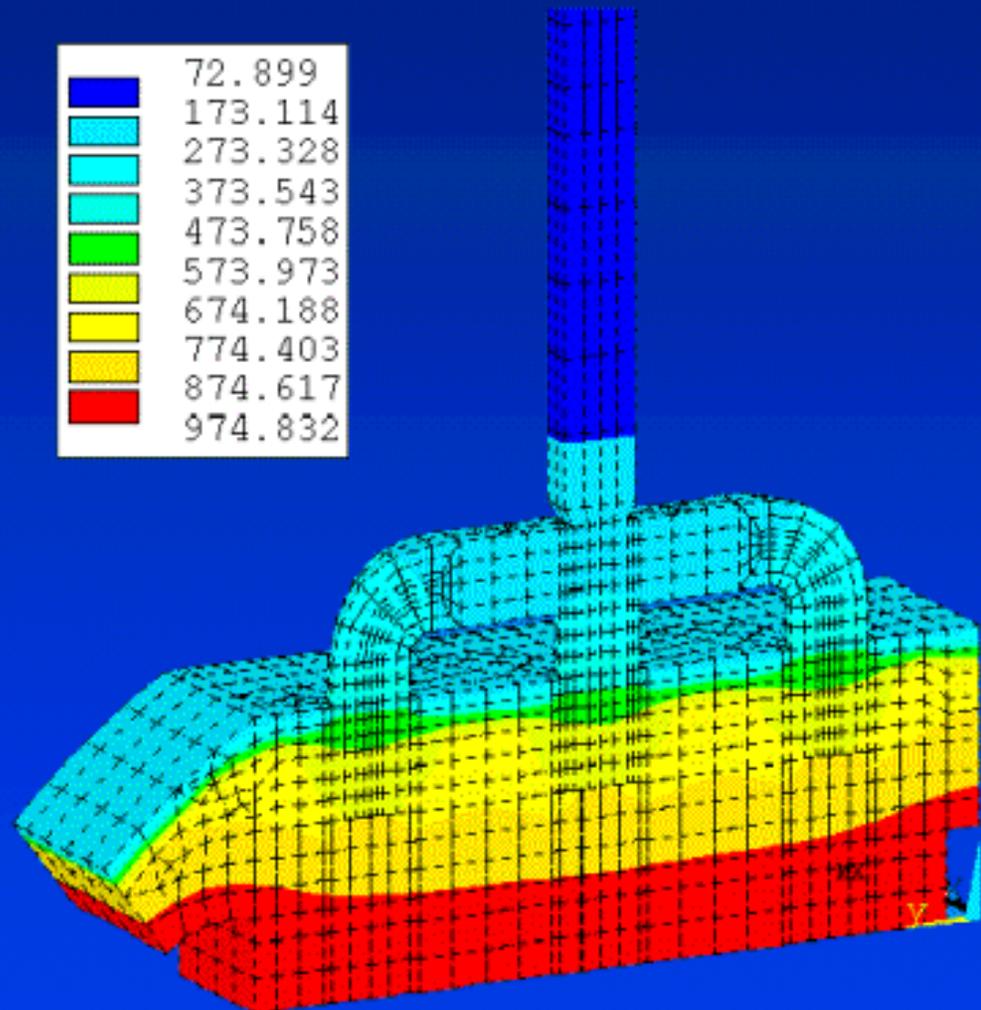
## ● résultats extrapolés:

– perte de chaleur de la cathode	396 kW
– perte de chaleur cathode par le fond	119 kW
– coefficient transfert gelée niveau métal	720 W / m <sup>2</sup> °C
– coefficient transfert gelée niveau bain	500 W / m <sup>2</sup> °C

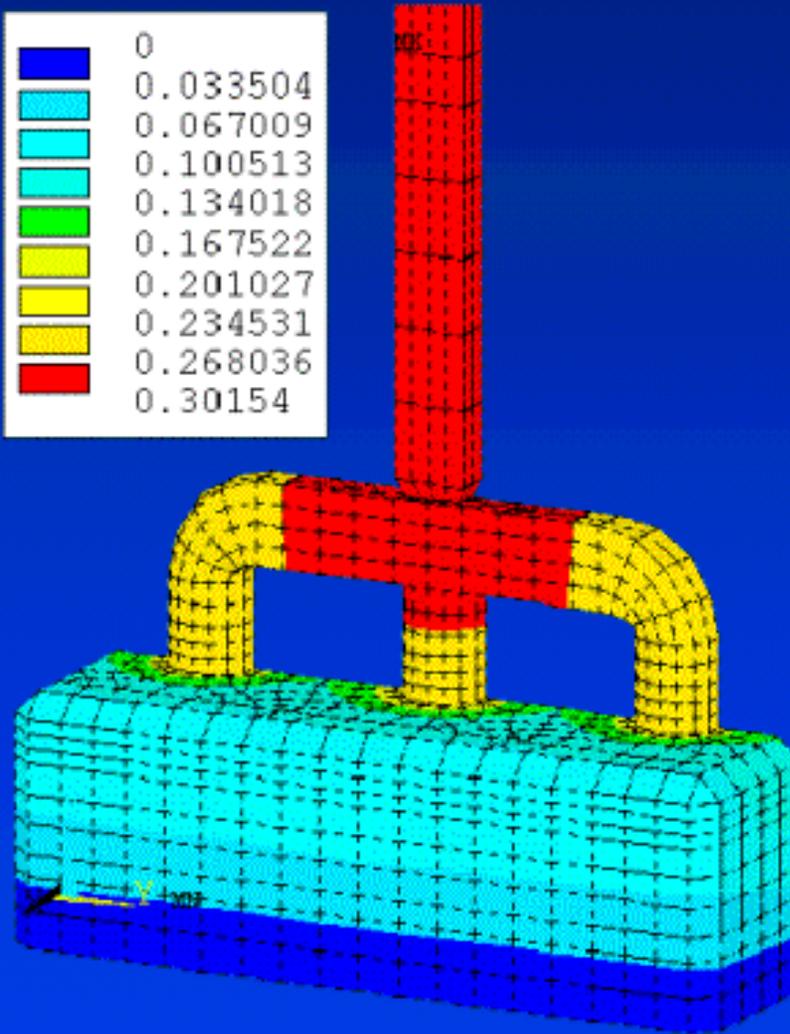
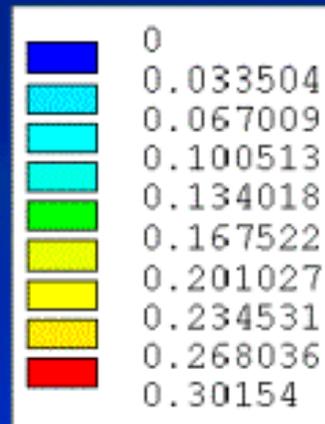
# Maillage du modèle de demi-anode



# Solution thermique du modèle de demi-anode



# Solution électrique du modèle de demi-anode



# Sommaire des résultats du modèle de demi-anode:

## ● résultats directs:

- perte de chaleur totale du modèle 3633 W
- chute de voltage de l'anode 302 mV

## ● résultats extrapolés:

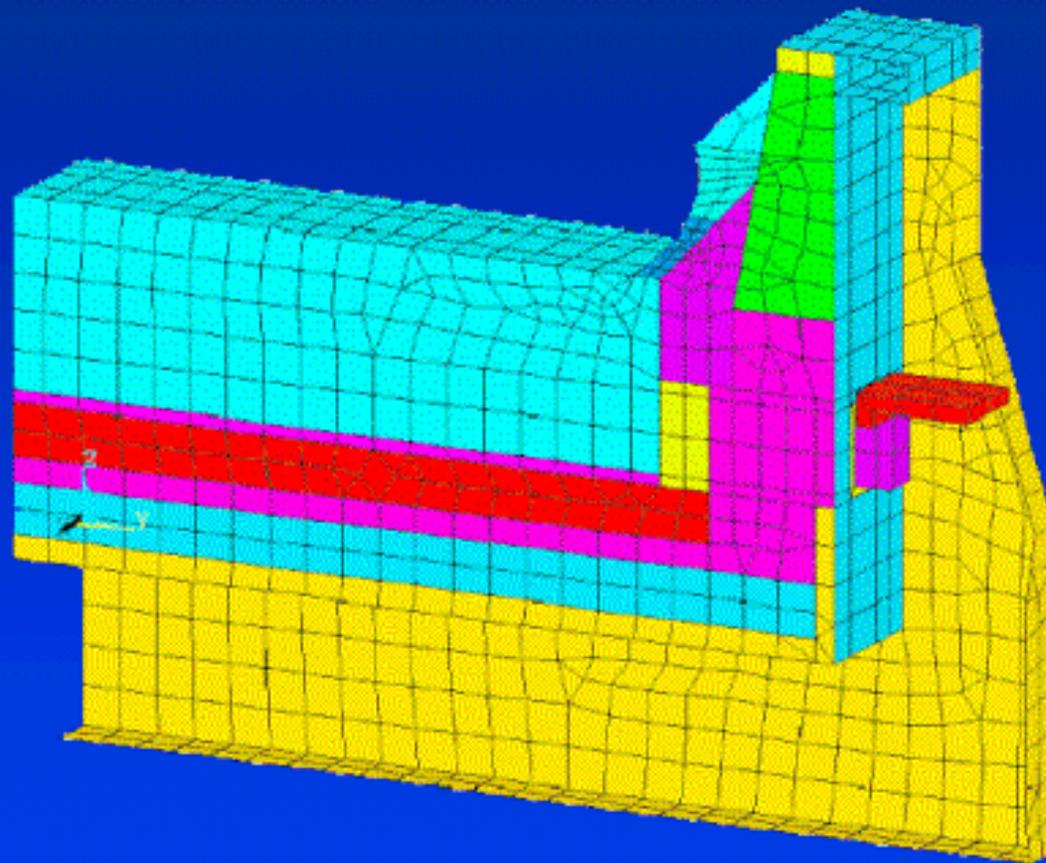
- perte de chaleur du plan anodique 232 kW

# Conception du nouveau design avec l'aide des modèles

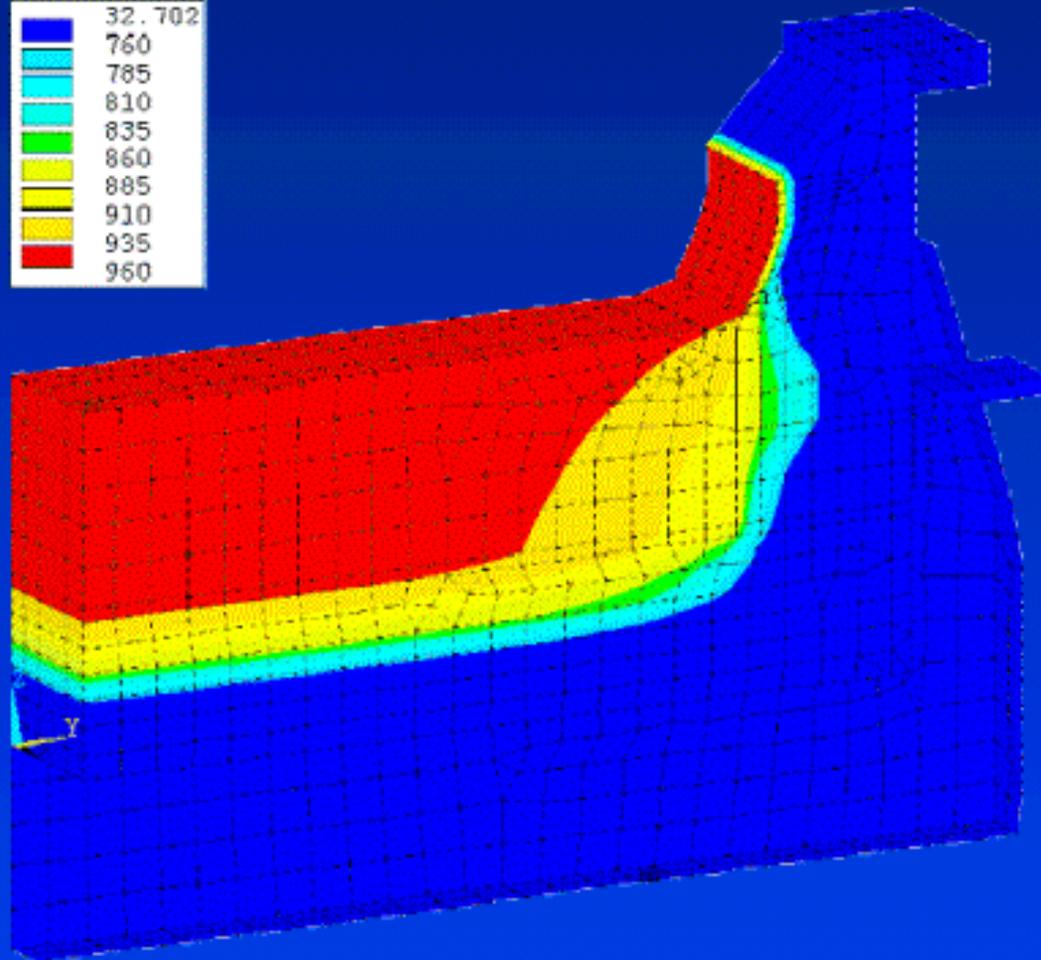
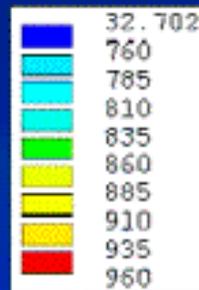
- **test des changements suivants au niveau cathodique:**
  - ACD réduit de 5 à 4 cm
  - température d'opération réduite de 975 à 950 °C
  - surchauffe eutectique réduite de 20 à 10 °C
  - niveau de métal réduit de 20 à 16 cm
  - niveau de bain réduit de 20 à 18 cm
  - épaisseur du silicate de calcium augmentée de 3.5 à 6 cm
  - hauteur barres collectrices réduite de 20 à 18 cm
  - blocs de côté en carbone amorphe (étaient en semi-graphite)
  - bas des blocs de côté remplacé par briques semi-isolantes
  - blocs de cathode en graphite (étaient en semi-graphite)
  - longueur des blocs de cathode réduite de 3.47 à 3.43 m
  - isolation des barres collectrices réduite de 10 à 8 cm

# Maillage du modèle de tranche de cathode modifié

- on remarque que la topologie est restée la même



# Solution thermique du modèle de tranche de cathode modifié



# Sommaire des résultats du modèle de tranche de cathode modifié:

## ● résultats directs:

- perte de chaleur totale du modèle 2833 W
- perte de chaleur modèle par le fond 1467 W
- chute de voltage sans le flexible 213 mV

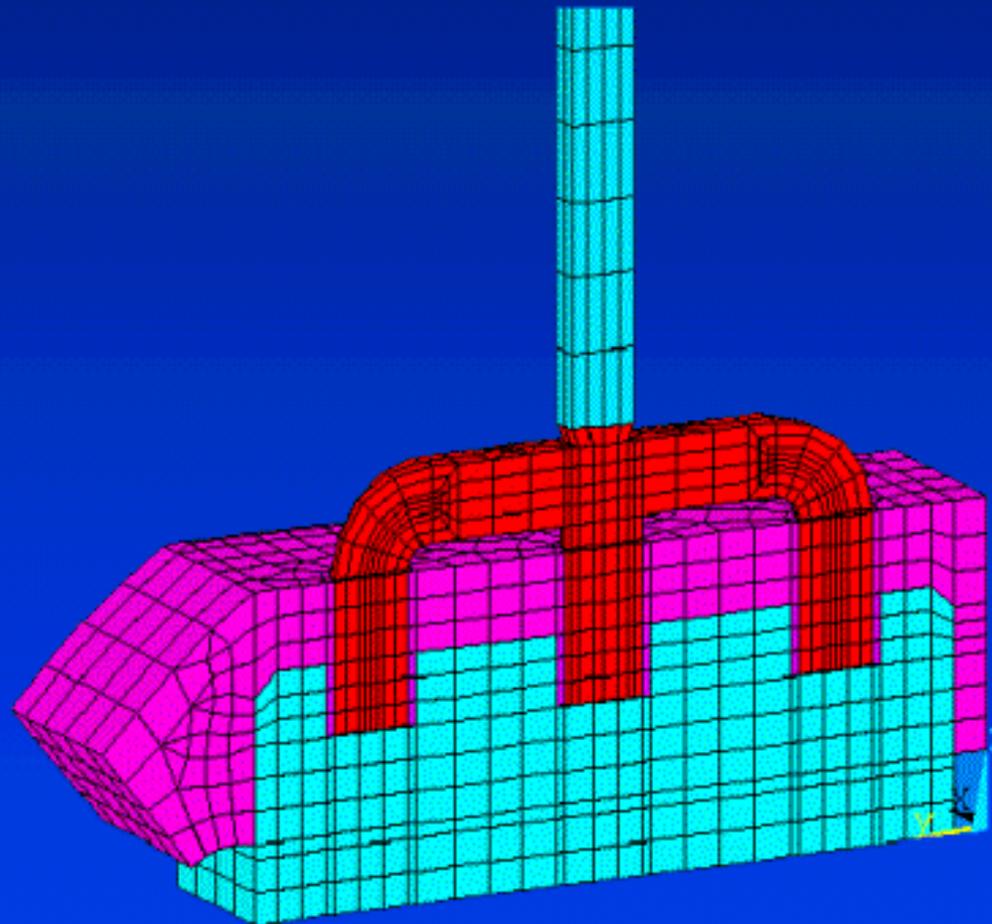
## ● résultats extrapolés:

- perte de chaleur de la cathode 245 kW
- perte de chaleur cathode par le fond 106 kW

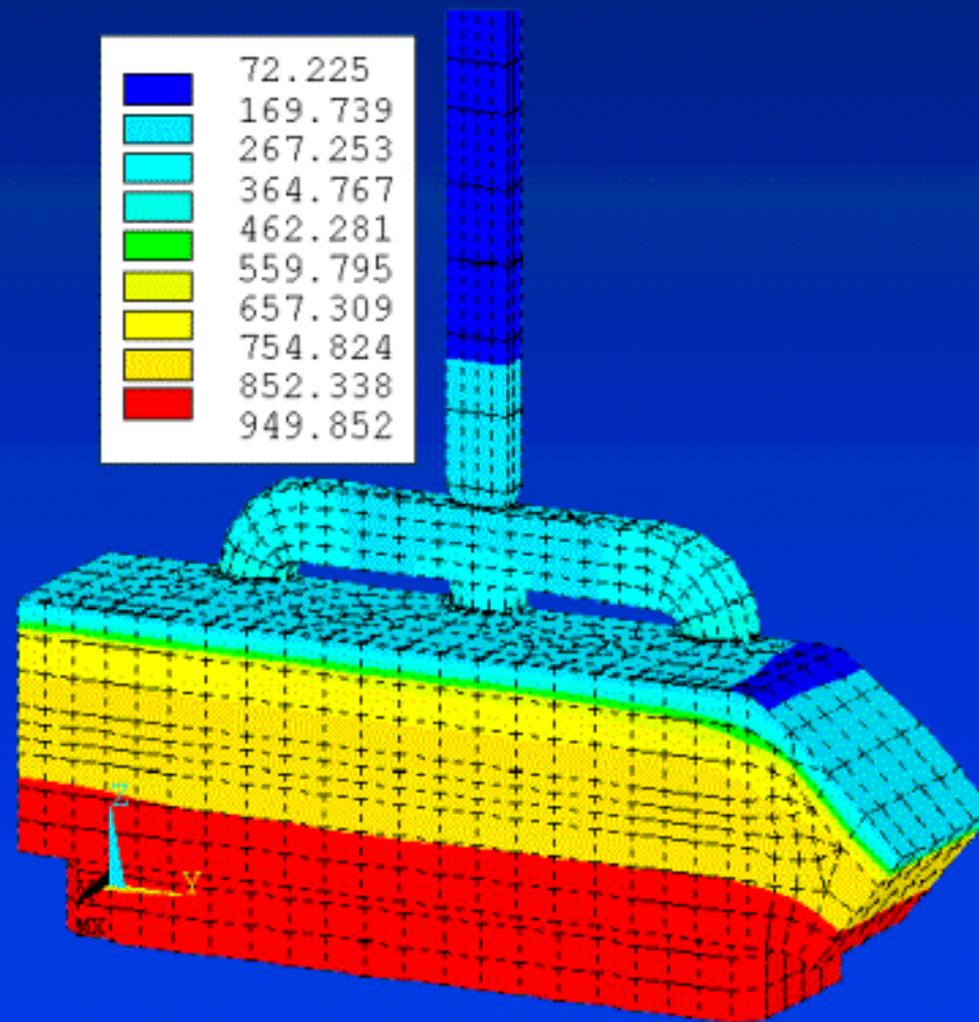
# Conception du nouveau design avec l'aide des modèles

- test des changements suivants au niveau anodique:
  - immersion réduite de 15 à 14 cm
  - couche de recouvrement augmentée de 10 à 17.5 cm
  - diamètre des goujons réduit de 18 à 16 cm
  - profondeur des trous augmentée de 14 à 15 cm
  - section de la tige réduite de 18x18 à 16x16 cm<sup>2</sup>

# Maillage du modèle de demi-anode modifié



# Solution thermique du modèle de demi-anode modifié



# Sommaire des résultats du modèle de demi-anode modifié:

- résultats directs:

- perte de chaleur totale du modèle 2861 W
- chute de voltage de l'anode 276 mV

- résultats extrapolés:

- perte de chaleur du plan anodique 183 kW

# Résultats de l'exercice de "rétrofit"

## ● Analyse finale effectuée avec ARC/DYNAMIC:

– ampérage de la cuve	265 kA
– température d'opération	950 °C
– excès de $AlF_3$	12.5 %
– niveau de bain	18 cm
– niveau de métal	16 cm
– chute de voltage cathodique	213 mV
– chute de voltage anodique	276 mV

## ● Résultats:

– voltage de cuve	3.85 V
– efficacité de courant	96.0 %
– chaleur interne	427 kW
– consommation énergétique	11.94 kWh / kg

## Conclusions de la partie 2:

- conception d'un design de cuve opérant à 265 kA et 11.94 kWh/kg à partir d'un design opérant actuellement à 300 kA et 13.75 kWh/kg
- donc réduction de 13.1 % de la consommation énergétique pour une perte de productivité de l'usine de seulement 8.7 %
- dans le contexte d'un coût de l'énergie prohibitif, c'est une proposition très rentable rendue possible par l'emploi des modèles thermo-électriques