

Optimisation du Procédé par Modélisation

Marc Dupuis

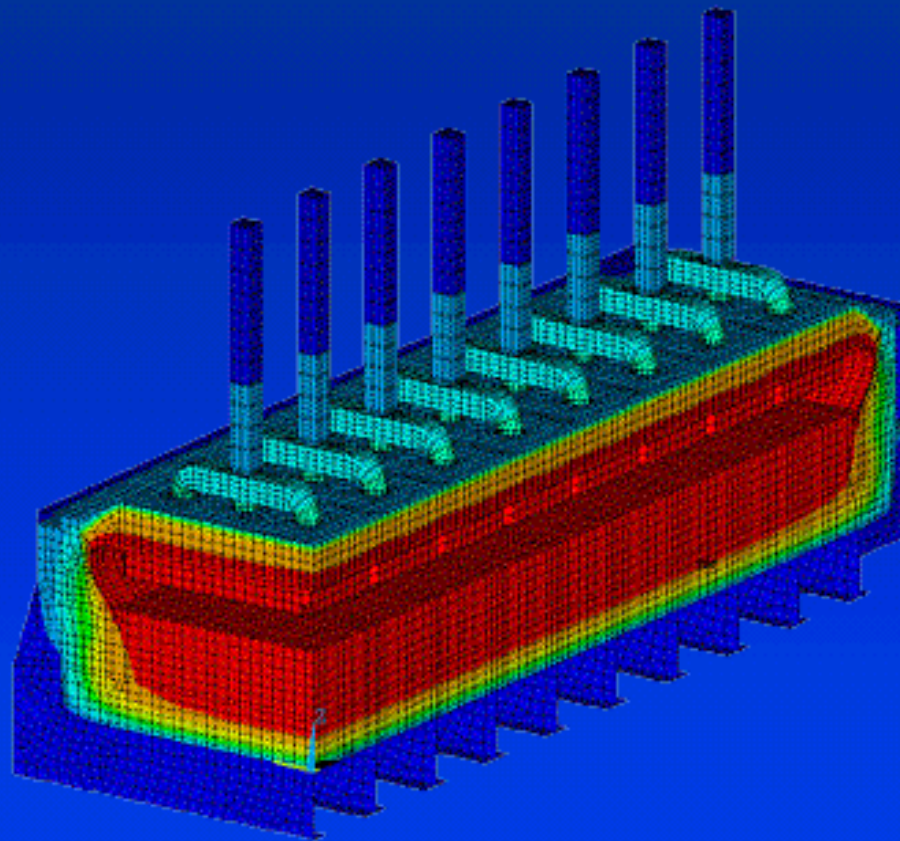
Les modèles thermiques

GENISIM

GENISIM

Les modèles thermo-électriques 2D et 3D stationnaires

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

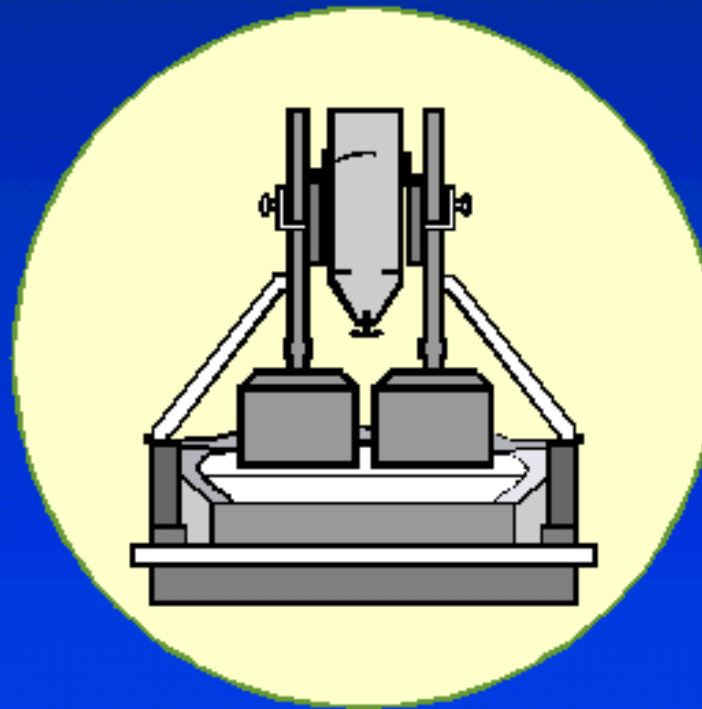


Les modèles 0D et 1D dynamiques

- 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

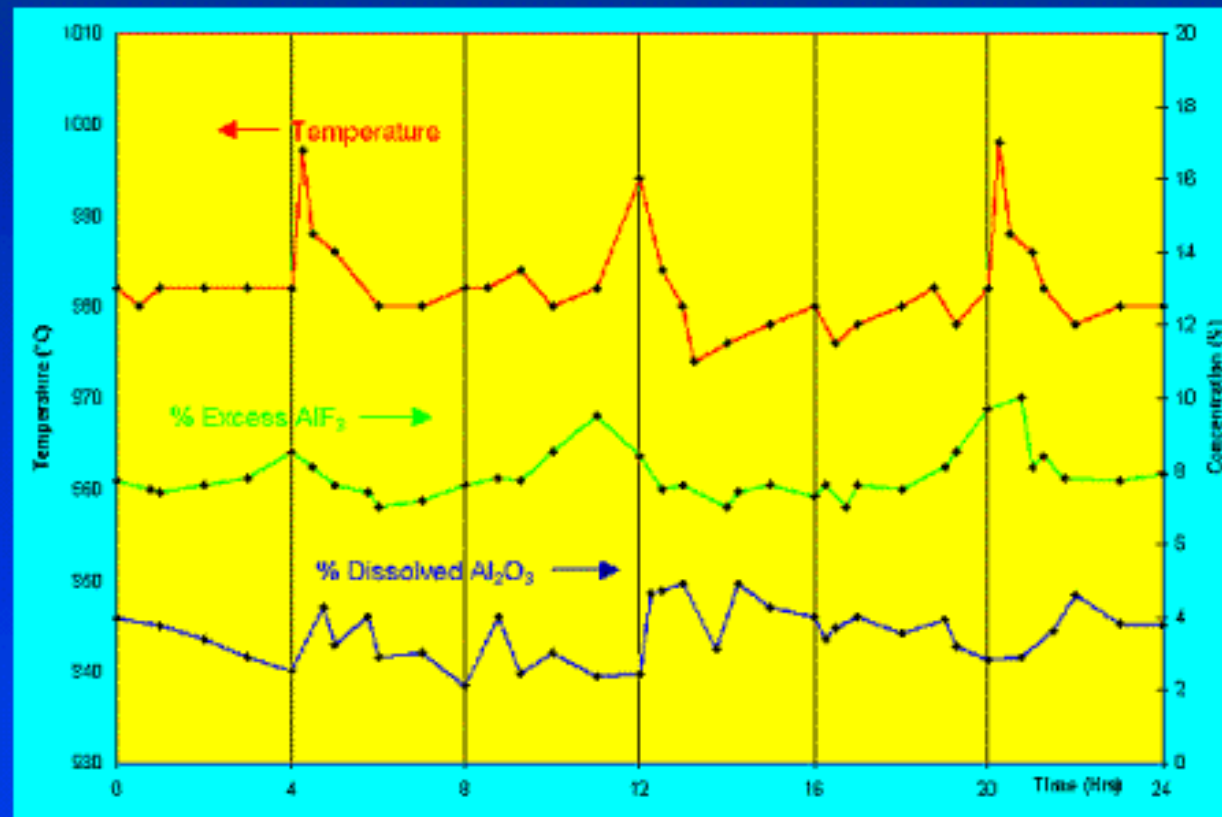
Partie 1:

Travaux pratiques sur la notion de surchauffe de la cuve

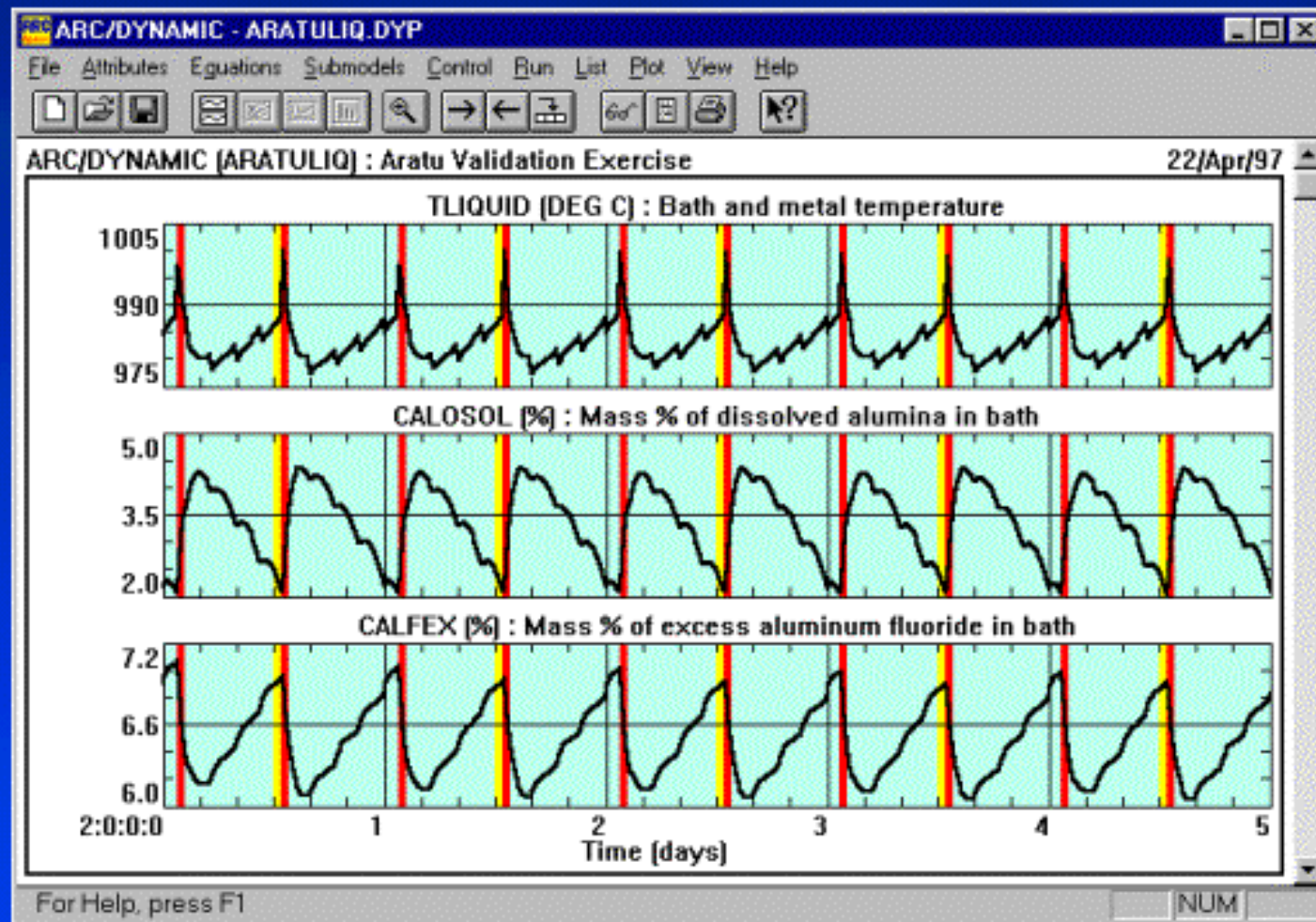
- **température liquidus**
 - fonction de la concentration d'alumine dissoute
- **surchauffe liquidus**
 - coefficient de transfert de chaleur requis de l'ordre de $2000 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$
- **température eutectique**
 - indépendante de la concentration d'alumine dissoute
- **surchauffe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

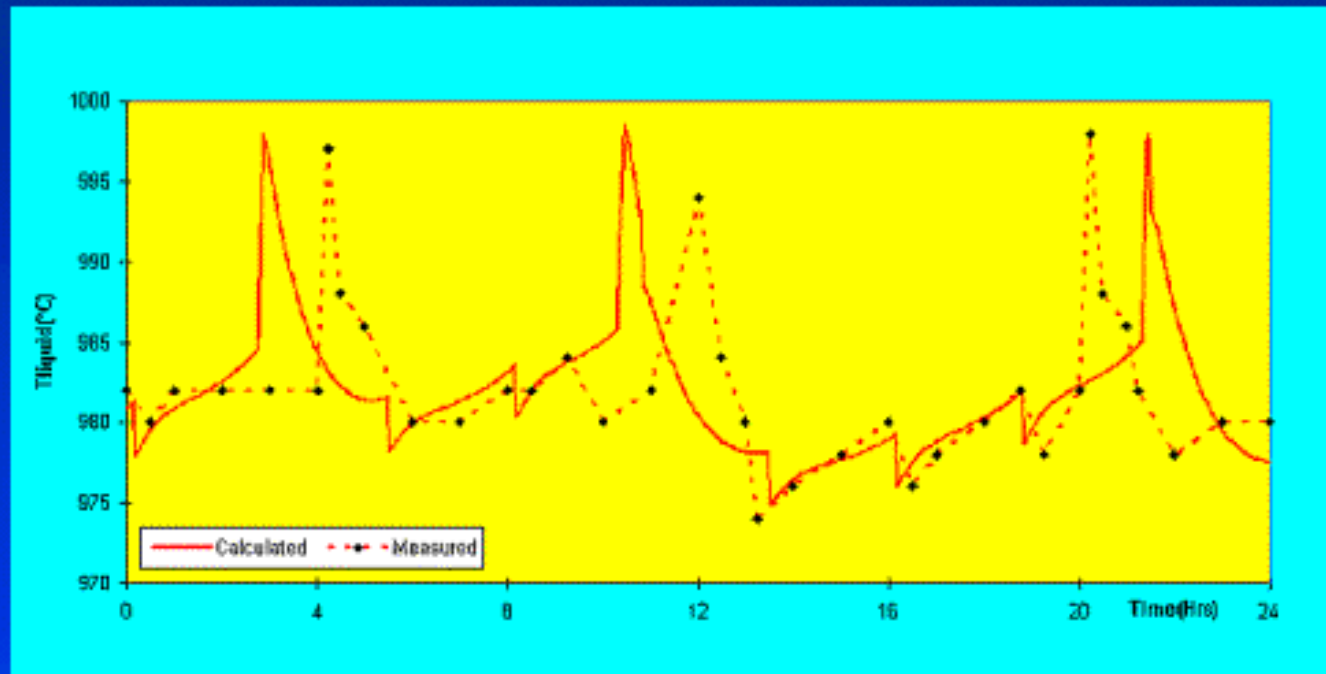
- Quelle définition de la surchauffe va permettre de reproduire le comportement mesuré ?



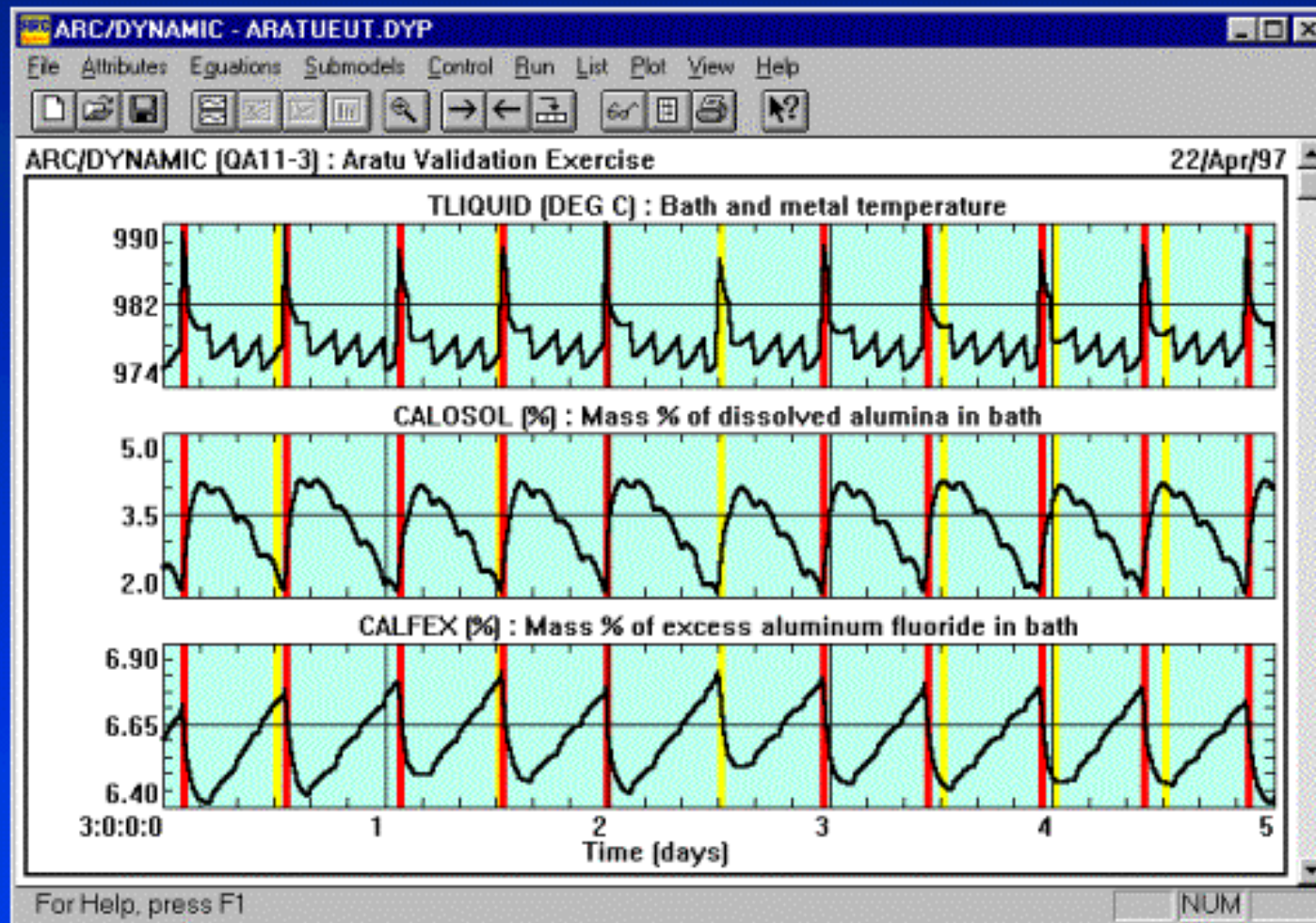
Résultats du modèle dynamique employant la surchauffe liquidus



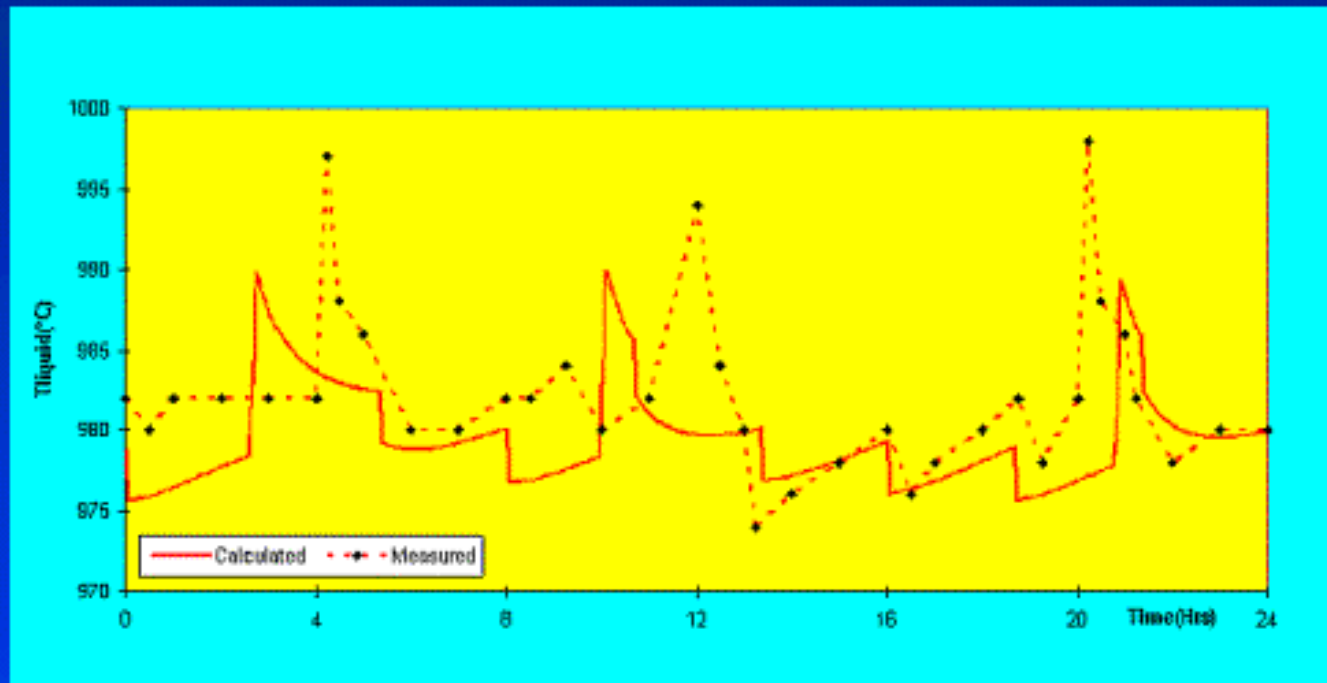
Comparaison directe en employant la surchauffe liquidus



Résultats du modèle dynamique employant la surchauffe eutectique



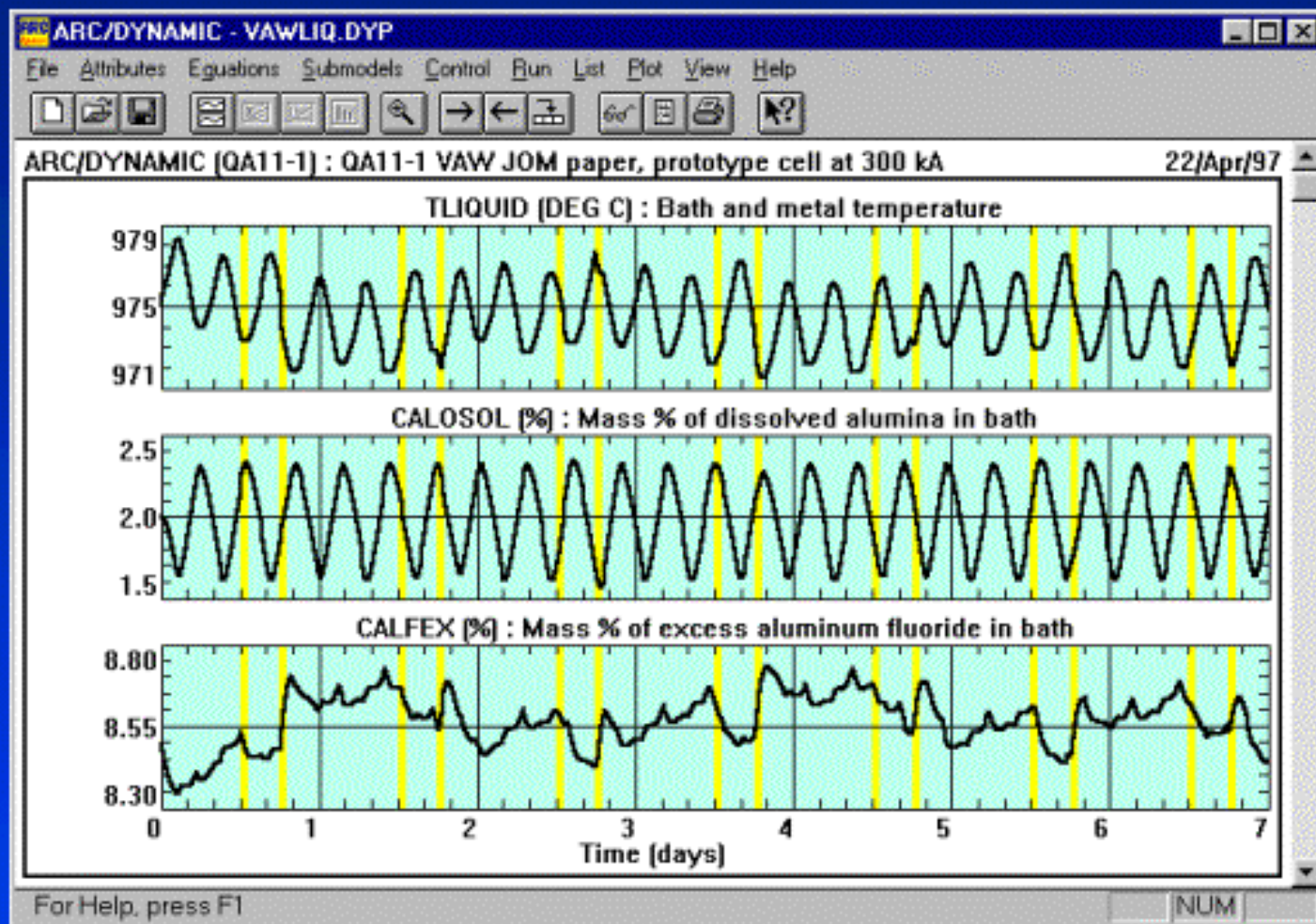
Comparaison directe en employant la surchauffe eutectique



Observations

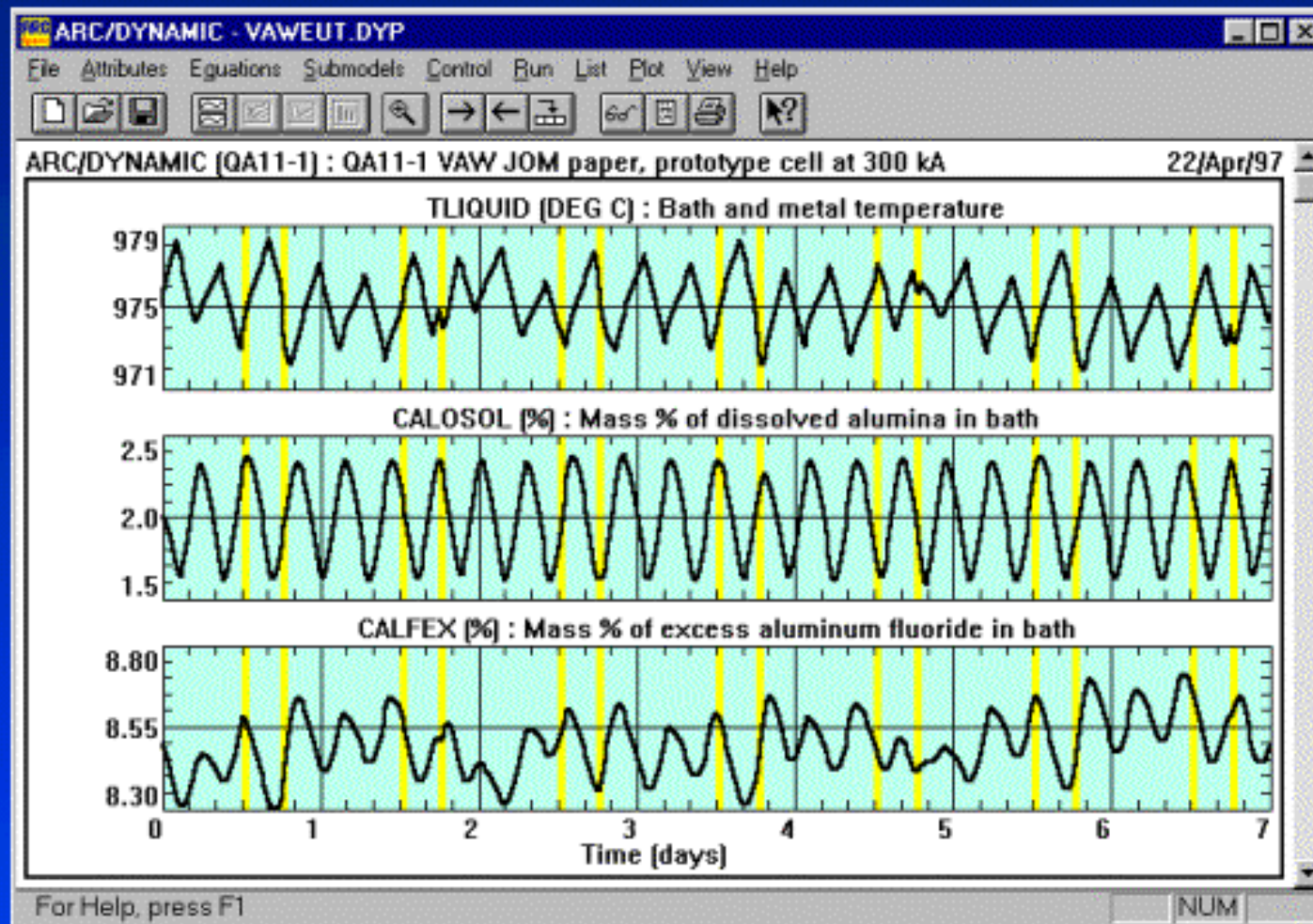
- le modèle utilisant la surchauffe liquidus permet de reproduire le comportement mesuré en tous points, mais pas le modèle utilisant la surchauffe eutectique
- c'est la forte variation de la concentration d'alumine dissoute due aux cycles de cassage latéral qui a permis de mettre en évidence la différence 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

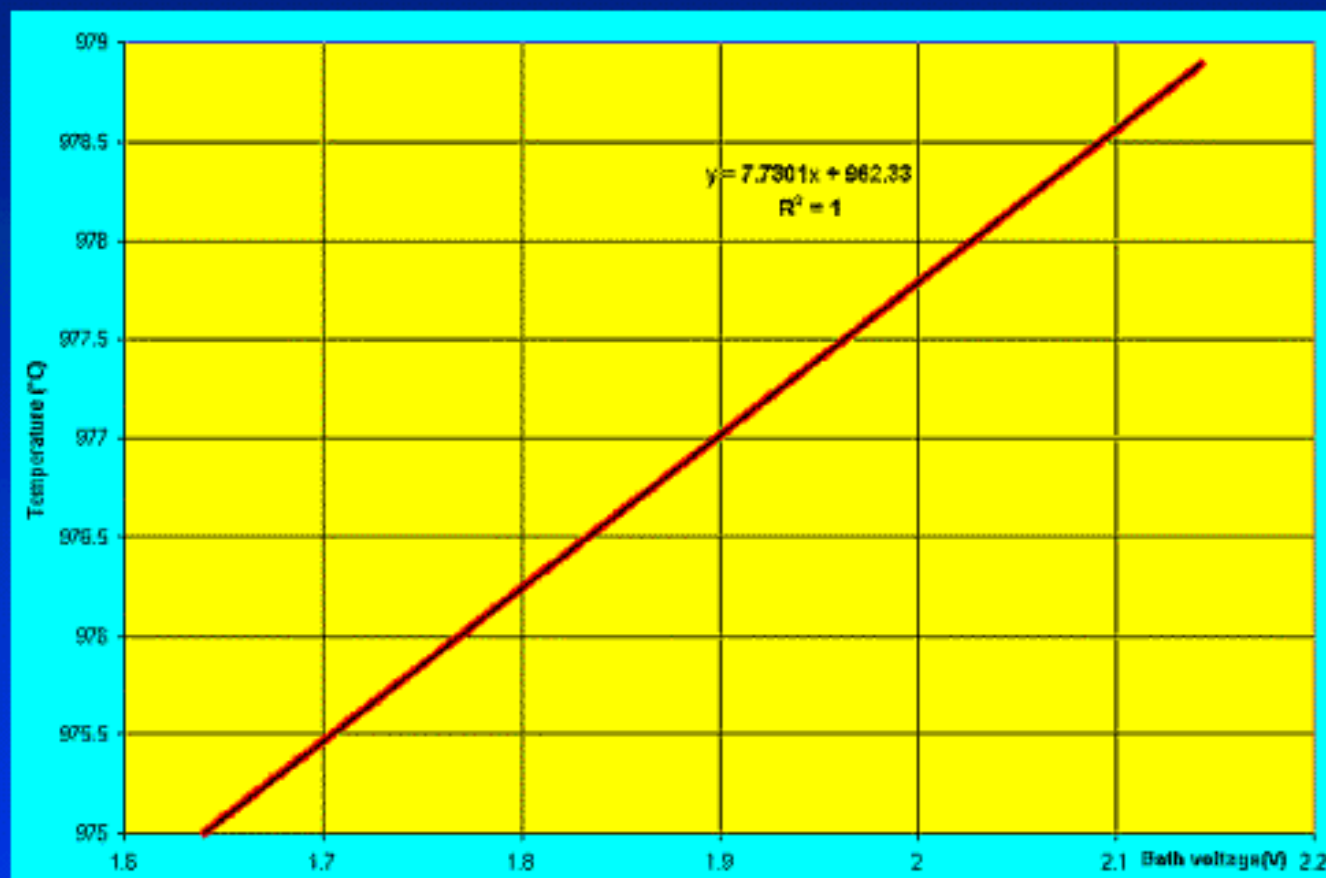


Résultats obtenus en utilisant la surchauffe eutectique

Observations

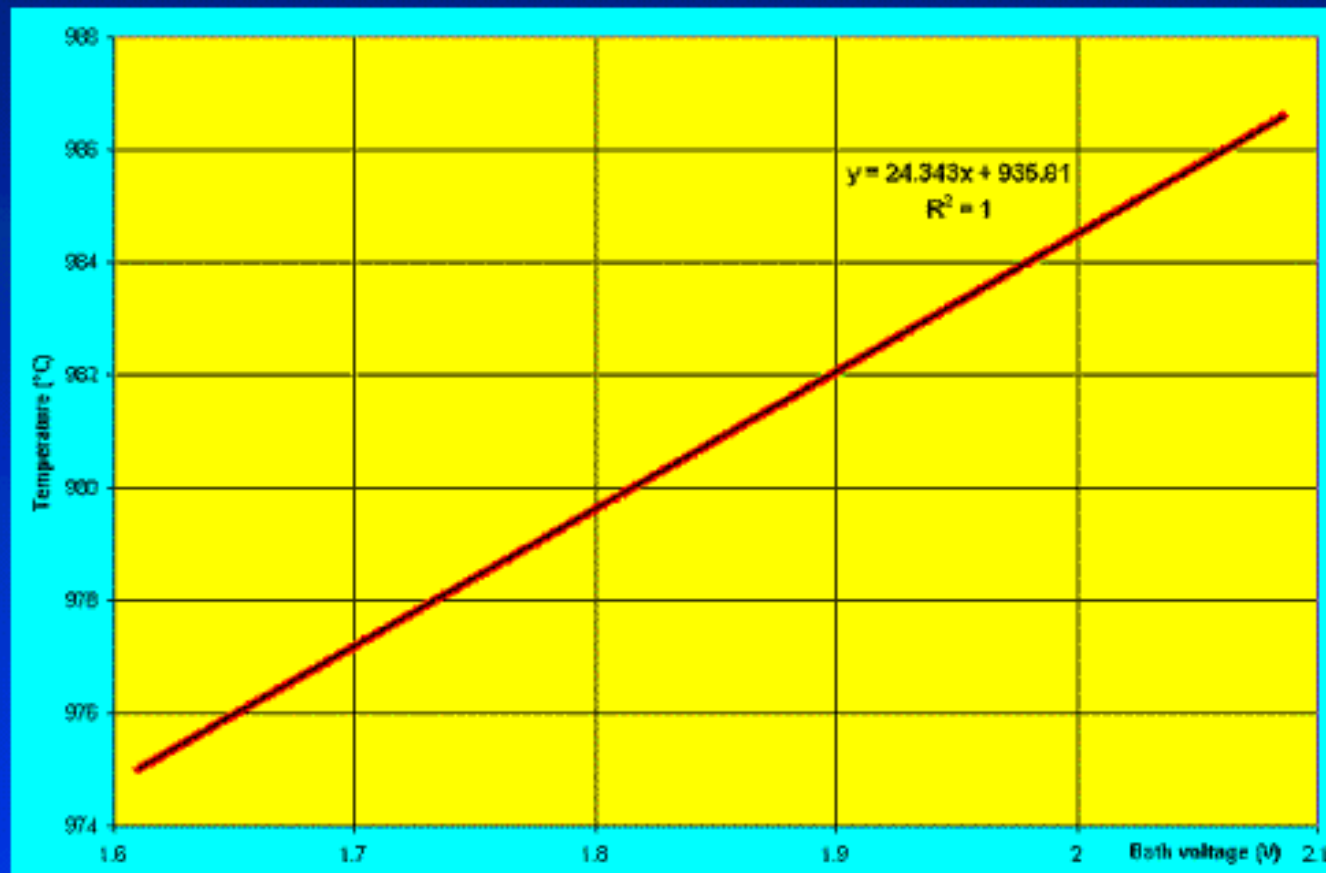
- l'évolution dynamique de la température est maintenant très similaire parce que la concentration d'alumine dissoute varie beaucoup moins pour une cuve "PBF"
- on constate toutefois que les inversions de température sont plus brusques avec le modèle utilisant la surchauffe eutectique qu'avec le modèle 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

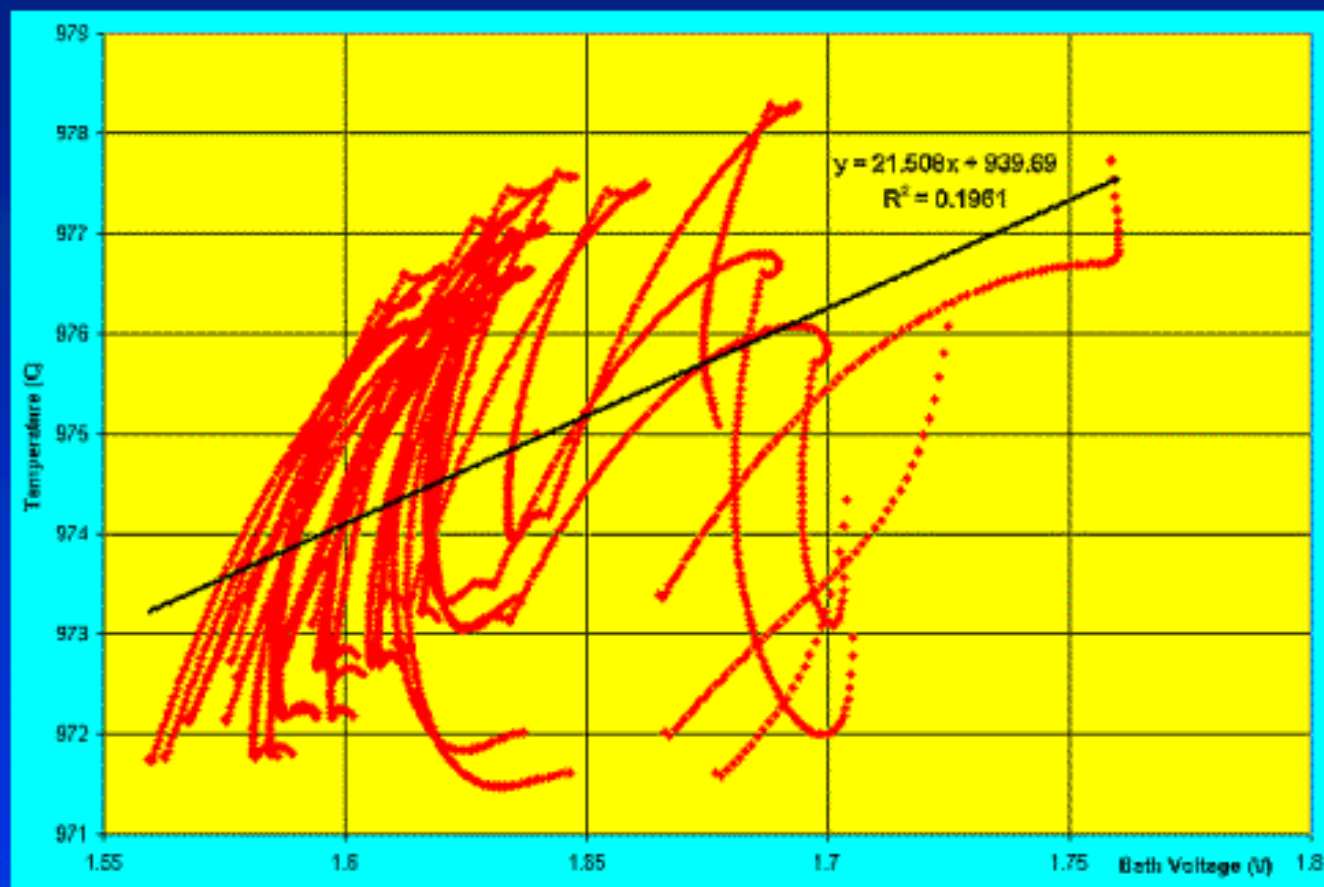


Résultats obtenus en mode stationnaire en utilisant la surchauffe eutectique: 2.4 °C par 100 mV supplémentaire

Observations

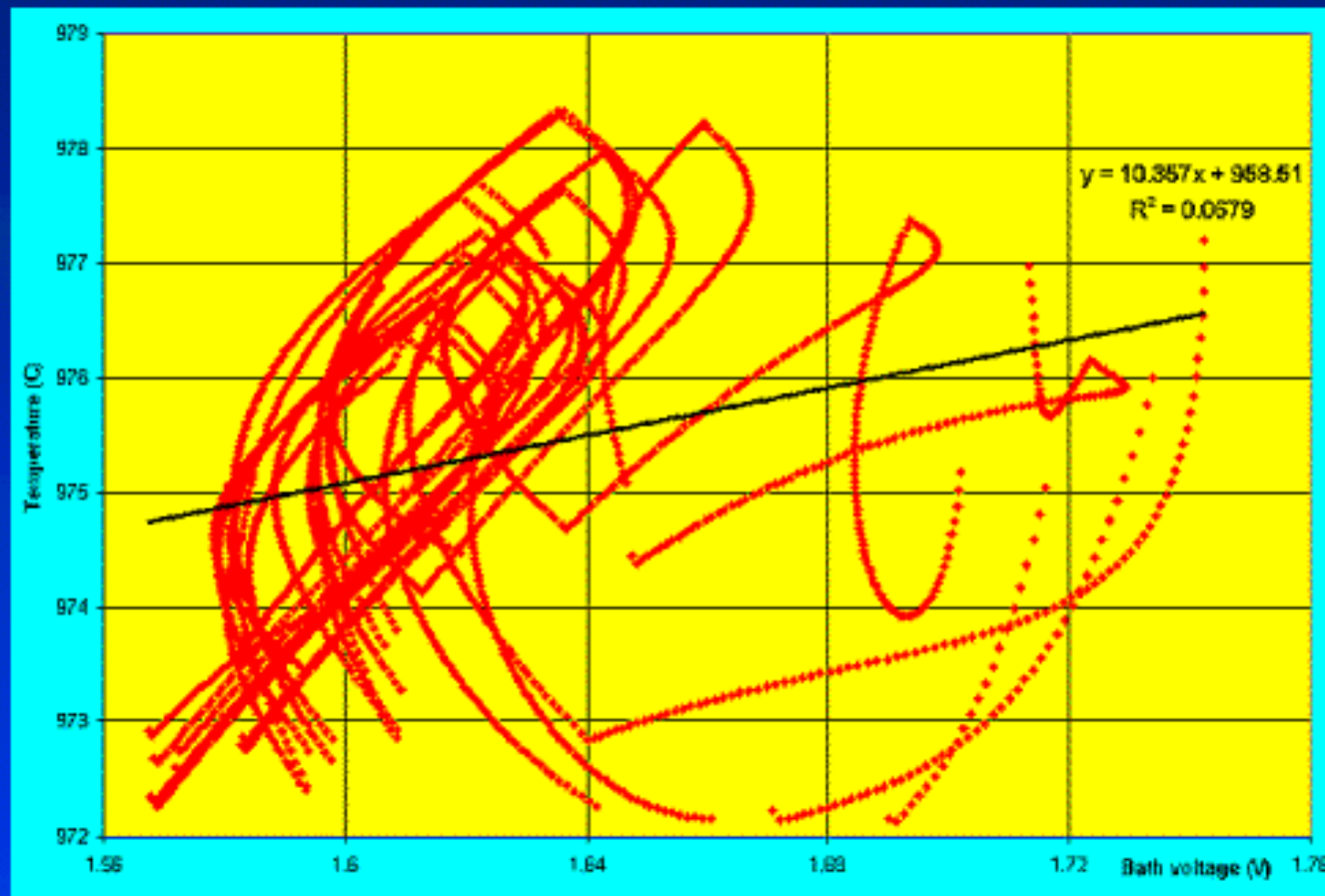
- l'utilisation de l'option Monte Carlo de ARC/DYNAMIC permet de résoudre une succession de solutions stationnaires en faisant varier un seul paramètre d'entrée, ce qui permet de générer très facilement ce type de corrélation
- on constate que l'augmentation de la température avec le modèle liquidus est trois fois moins grande qu'avec le modèle eutectique et surtout qu'elle est de moins de 1°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:

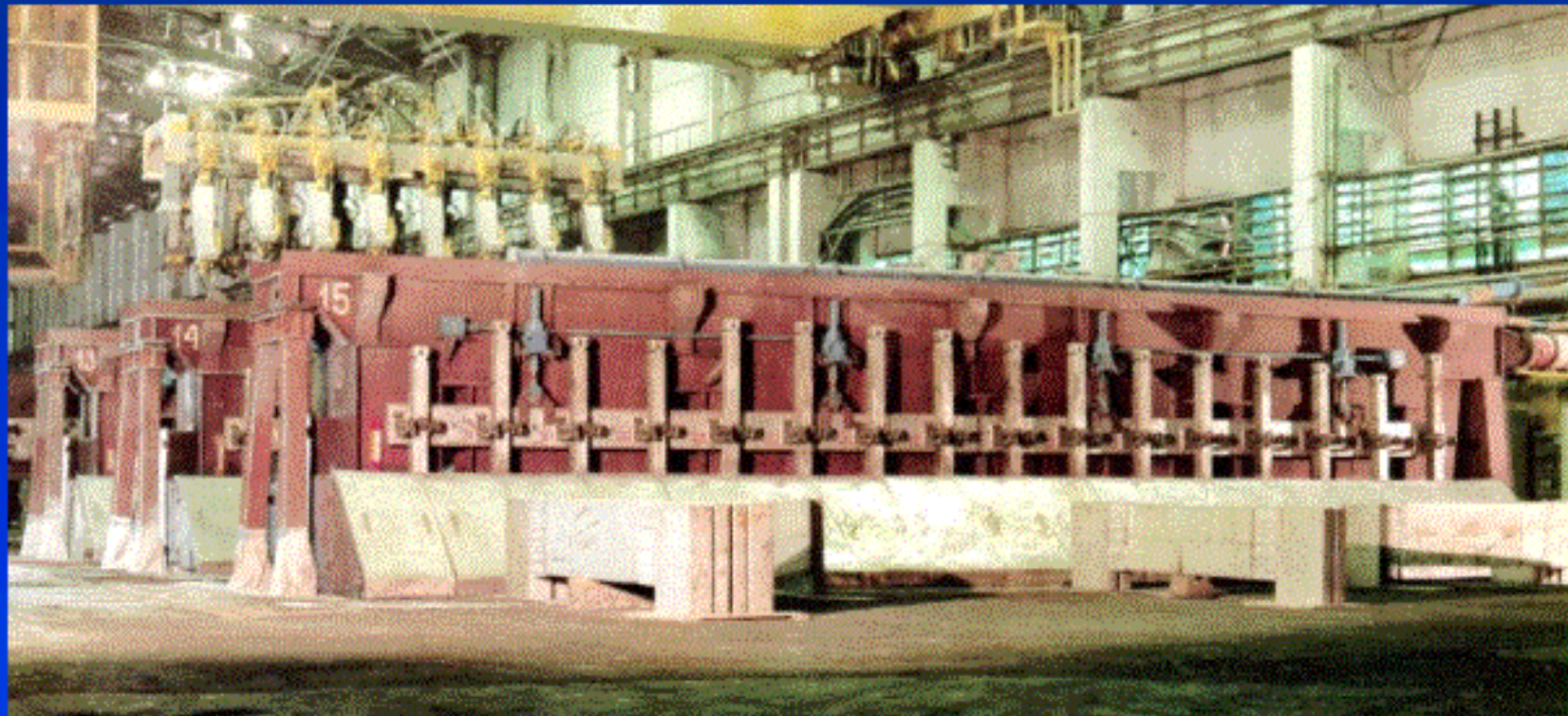
- l'emploi de ARC/DYNAMIC, un modèle thermo-électrique dynamique 0D, comme outil de formation a été illustré
- la notion de surchauffe, et surtout la différence entre la surchauffe liquidus et la surchauffe eutectique a été mise en évidence par l'emploi du modèle
- l'emploi du modèle pour confronter 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:

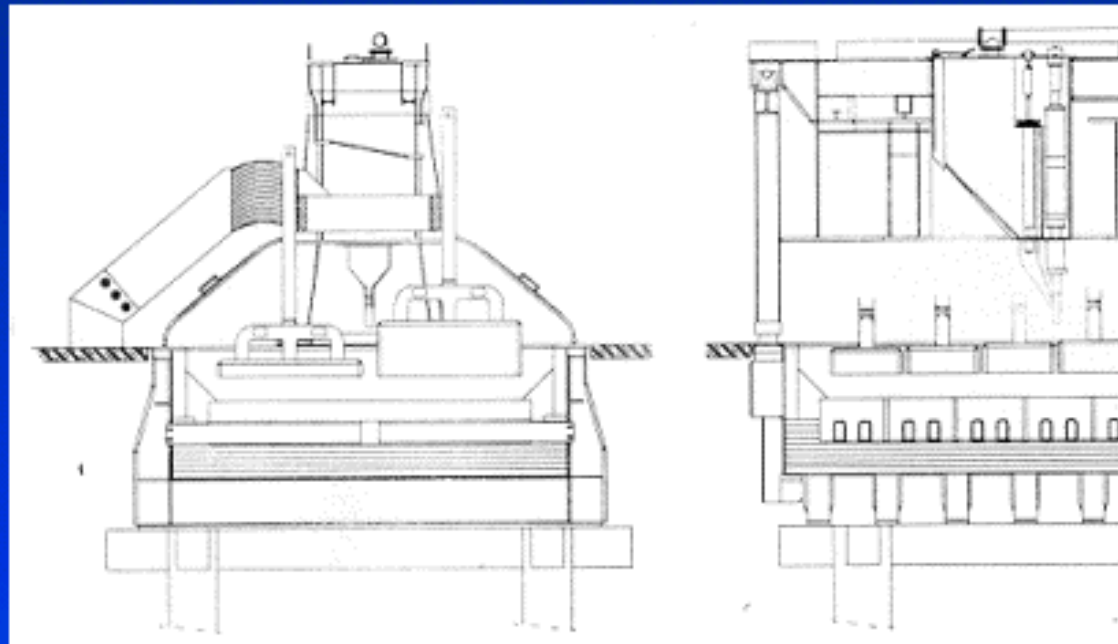
Projet de "rétrofit" d'une cuve à haut ampérage

- 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

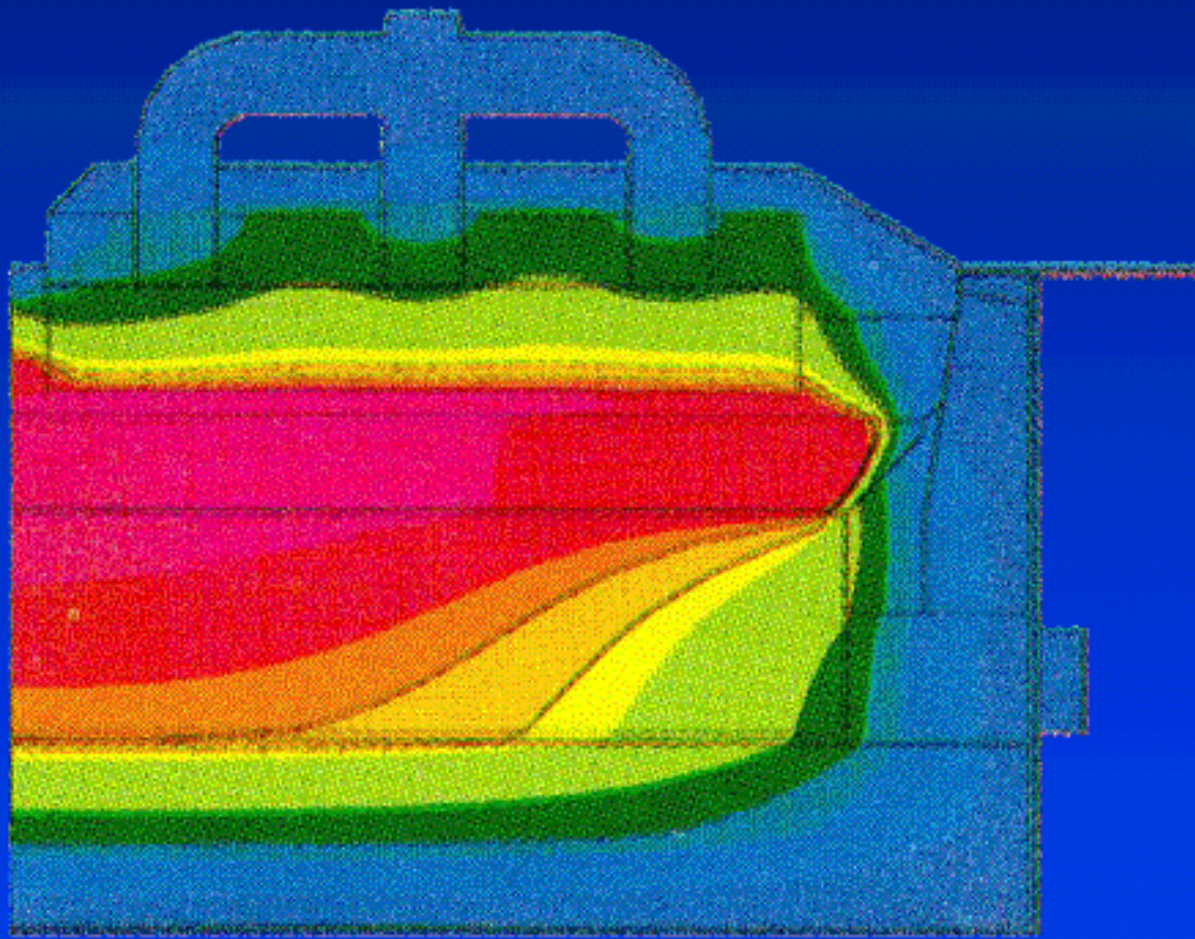
**Design de base inspiré d'une cuve
expérimentale présentée par VAW dans
JOM en février 1994**



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

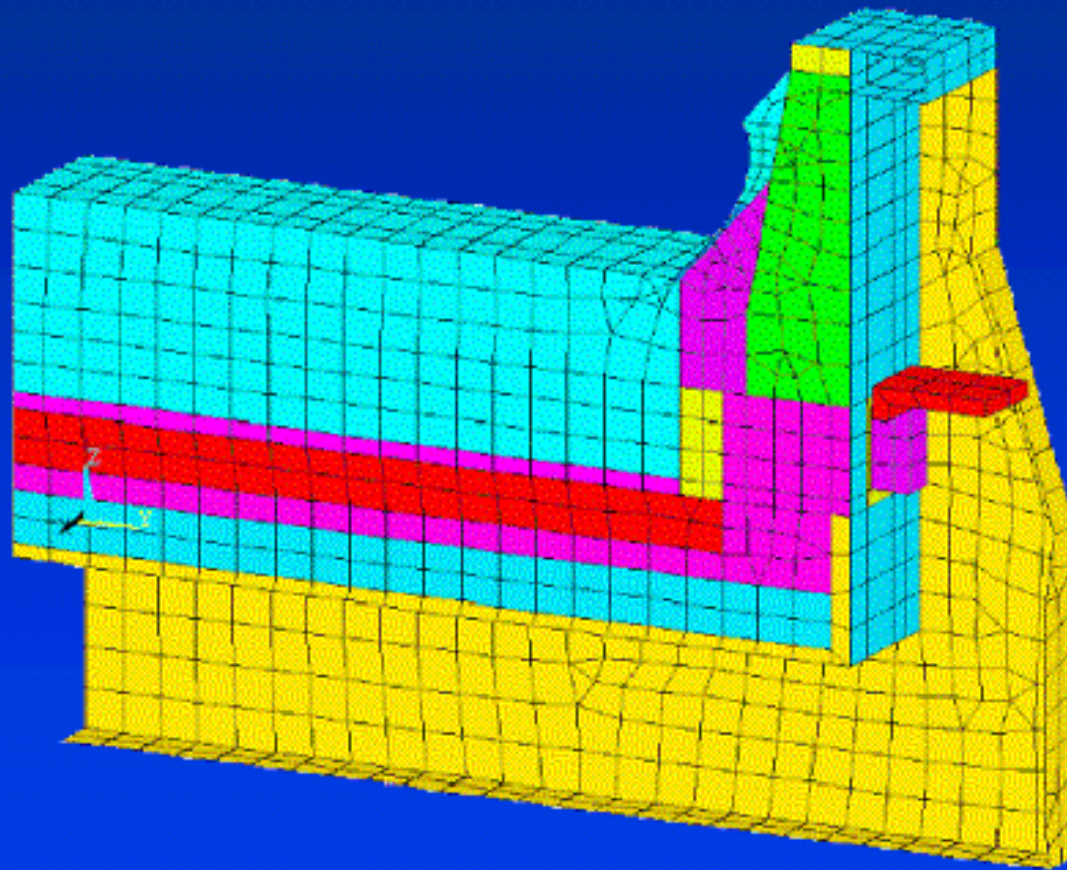
Données de base obtenues par la "campagne de mesure"

● données du design de base (suite):

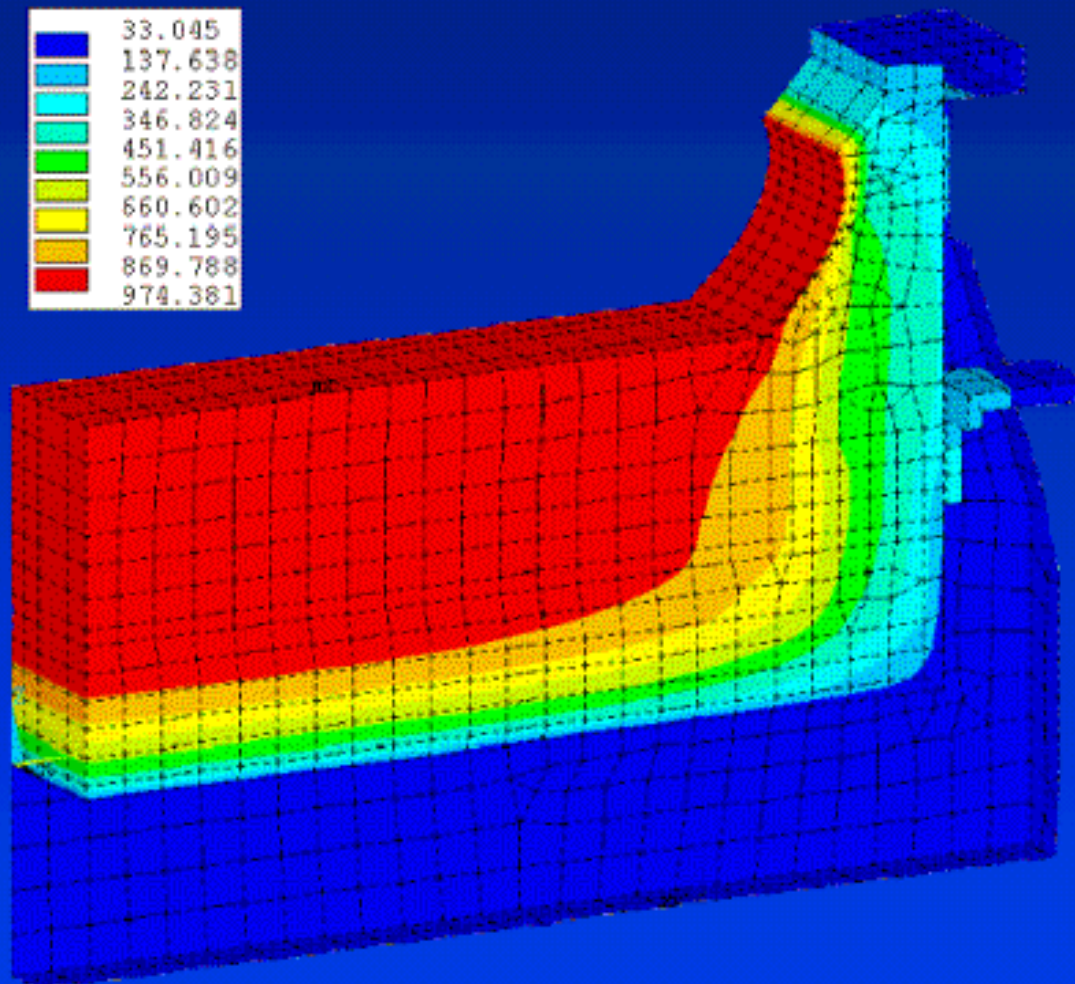
– niveau de métal	20 cm
– niveau de bain	20 cm
– ACD	5 cm
– épaisseur gelée niveau bain	8.9 cm
– épaisseur gelée niveau métal	2.4 cm
– surchauffe eutectique	21.6 °C
– excès de AlF_3	7.53 %
– chaleur interne	621.72 kW
– efficacité de courant	92.91 %
– consommation énergétique	13.75 kWh / kg

Maillage du modèle de tranche de cathode

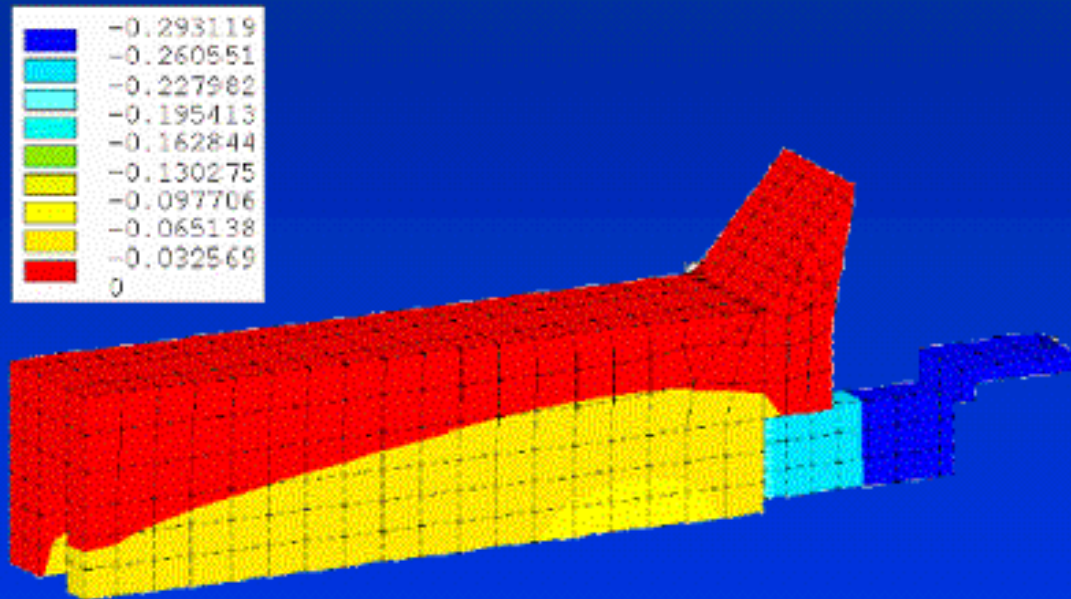
- épaisseur de la tranche: $\frac{1}{2}$ bloc



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:

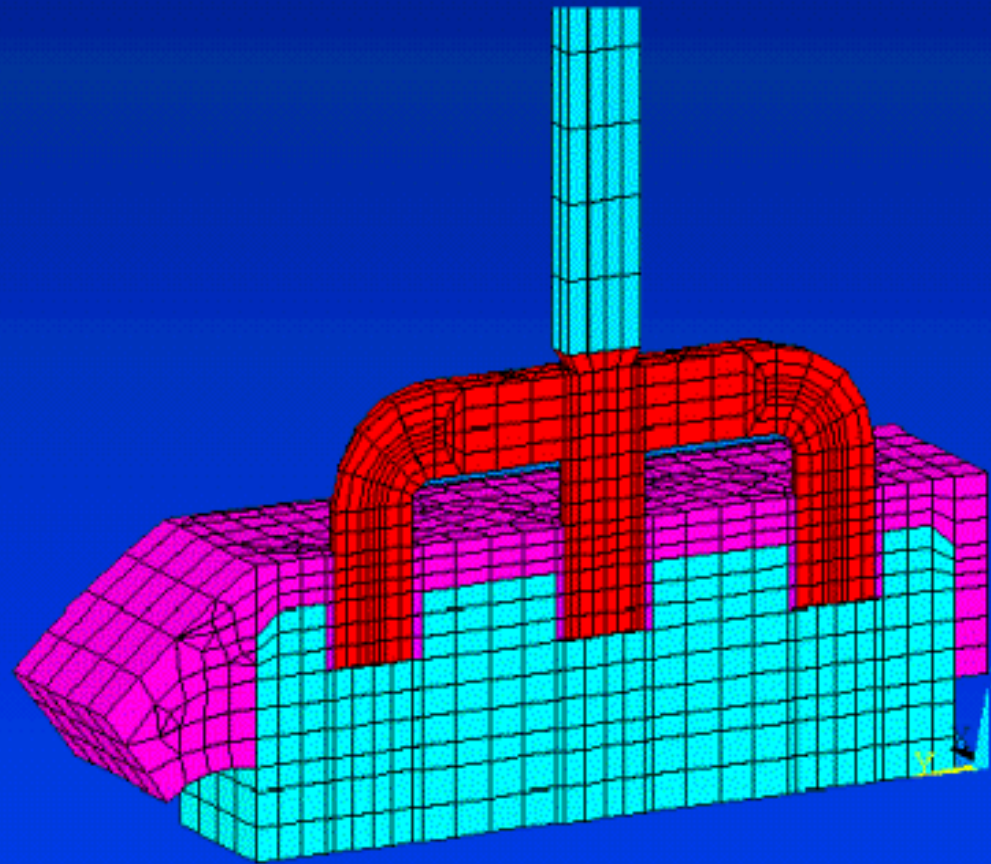
● résultats directs:

– 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 ²
– flux thermique gelée niveau bain	10109 W / m ²

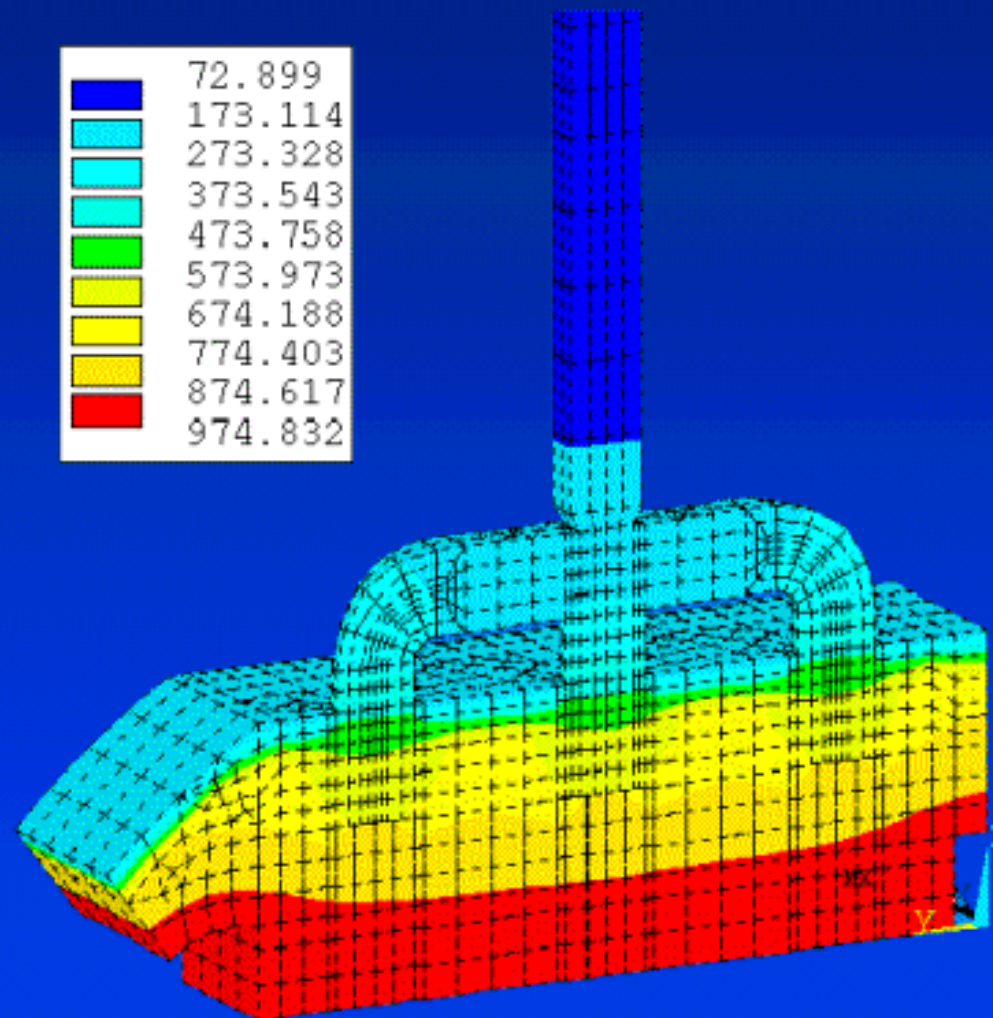
● résultats extrapolés:

– 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 ² °C
– coefficient transfert gelée niveau bain	500 W / m ² °C

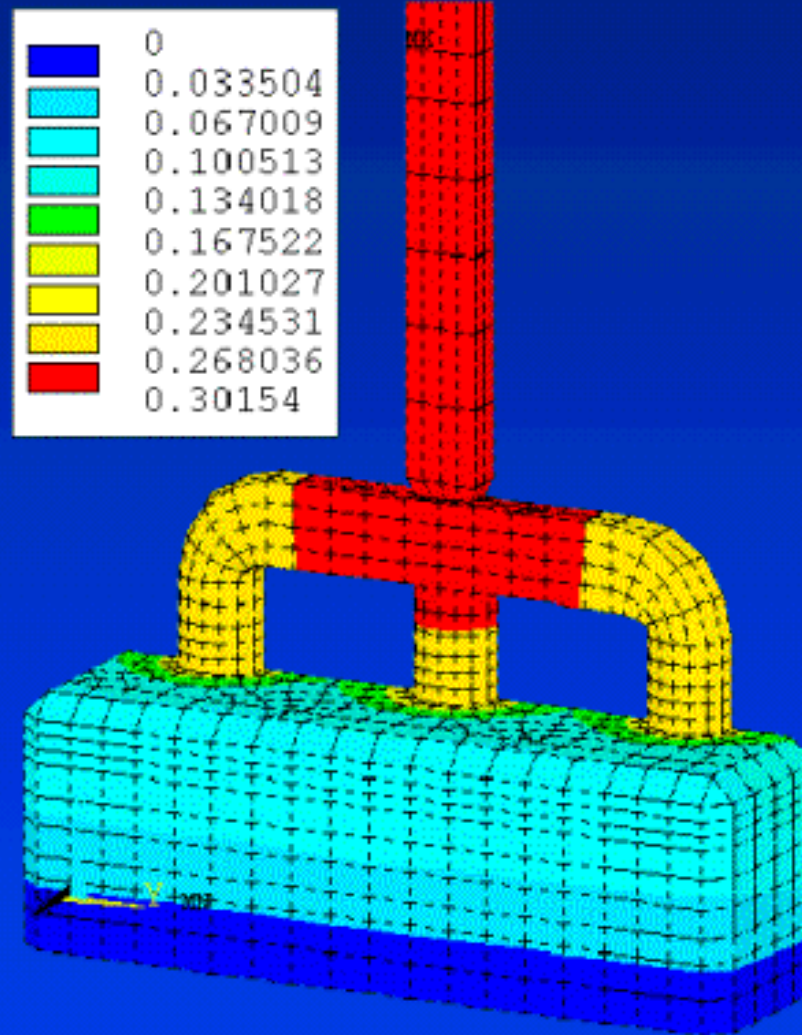
Maillage du modèle de demi-anode



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:

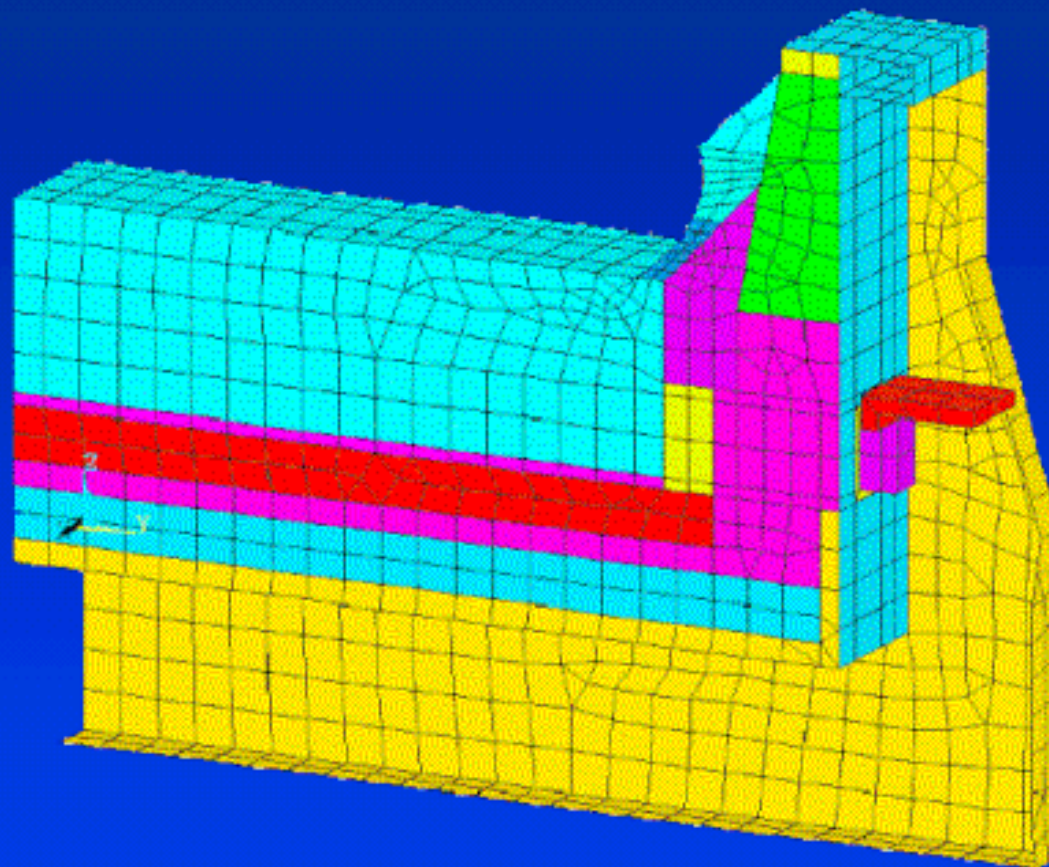
- perte de chaleur du plan anodique 232 kW

Conception du nouveau design avec l'aide des modèles

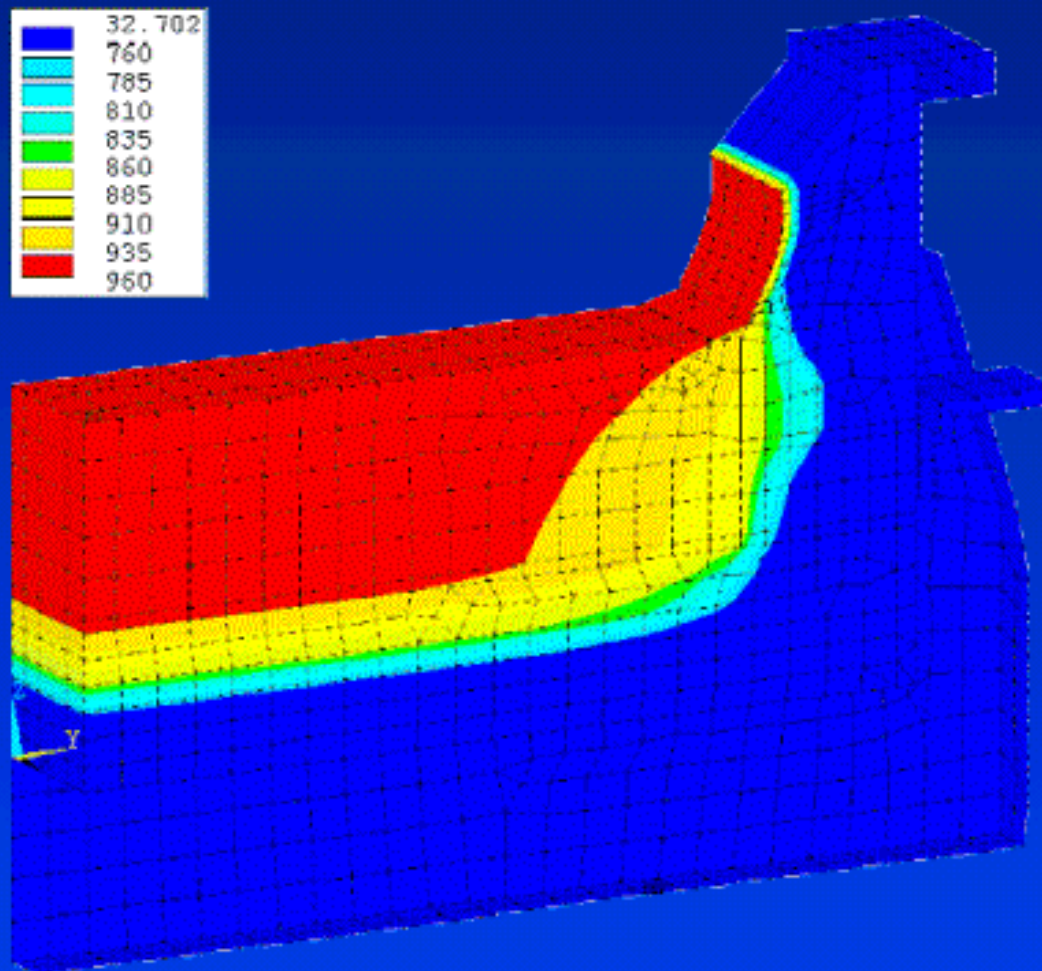
- test des changements suivants au niveau cathodique:
 - ACD réduit de 5 à 4 cm
 - température d'opération réduite de 975 à 950 °C
 - surchauffe eutectique réduite de 20 à 10 °C
 - niveau de métal réduit de 20 à 16 cm
 - niveau de bain réduit de 20 à 18 cm
 - épaisseur du silicate de calcium augmentée 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:

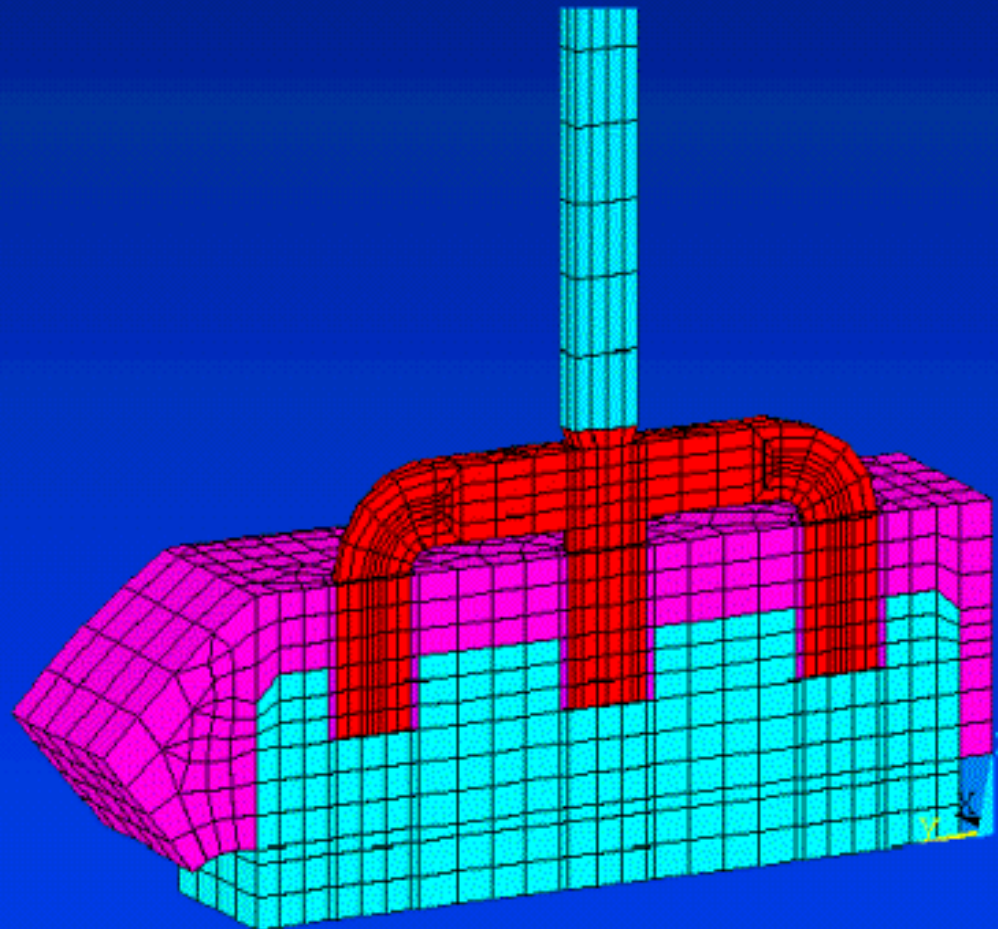
– perte de chaleur de la cathode	245 kW
– perte de chaleur cathode par le fond	106 kW

Conception du nouveau design avec l'aide des modèles

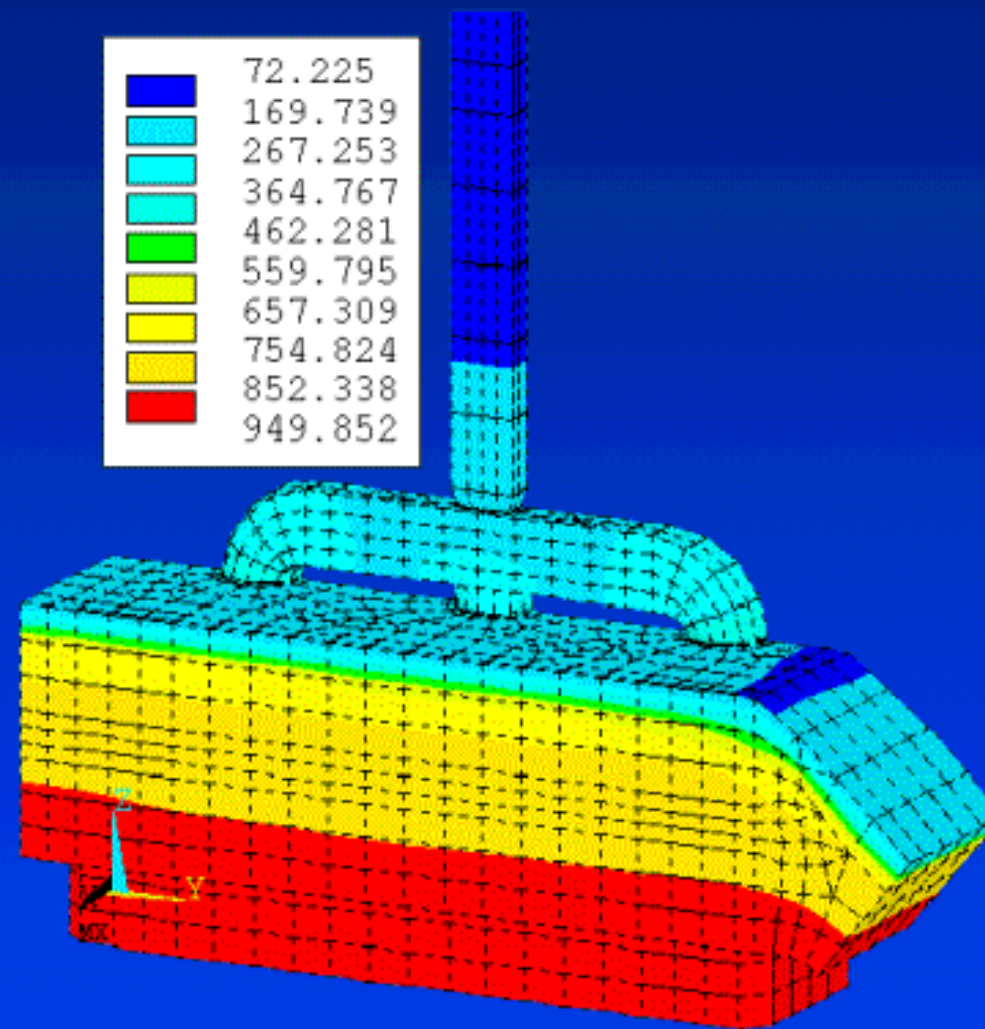
- test des changements suivants au niveau anodique:

- 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 cm²

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