

FIGURE 3.7 – Évolution de Var_c au cours du temps sur l'intervalle $[0, T]$ dans le bain électrolytique de la cuve AP32 lorsque la température n'est pas prise en compte dans la vitesse de dissolution des particules.

des particules provoque un accroissement rapide de la concentration d'alumine dissoute localement autour du point d'injection. Lorsque la dose est totalement dissoute, ce pique de concentration est atténué par la diffusion de la concentration dans l'électrolyte. Cet effet se traduit par un accroissement de la variance de la concentration immédiatement après l'injection d'une dose, puis par une décroissance de la variance.

Cependant, ces variations de la concentration dans l'état périodique sont très localisées autour des points d'injection. Dans le reste du bain électrolytique, les variations de la concentration restent de l'ordre de 1%.

Puisque, lorsque l'état périodique est atteint, la concentration varie peu au cours du cycle d'injection global, nous pouvons nous permettre de visualiser la distribution de la concentration dans le bain électrolytique à un instant arbitraire du cycle d'injection global. Le temps $T = 10\,000$ s auquel la solution est évaluée correspond donc à environ 51 périodes du cycle d'injection global, sans compter la phase transitoire initiale de 64 s.

On s'intéresse à la distribution de la concentration d'alumine là où a lieu la réaction d'électrolyse, c'est-à-dire essentiellement dans l'ACD. On se contente donc de visualiser la distribution de la concentration d'alumine dans cette zone. Dans le domaine Ω occupé par l'électrolyte, l'ACD est maintenue constante avec 3.2 cm d'épaisseur sur l'ensemble de l'interface. Pour visualiser la concentration d'alumine dissoute dans l'ACD, on évalue c sur une surface fictive placée dans l'électrolyte, parallèle à l'interface et à une distance égale à la moitié de l'ACD. La figure 3.8 présente la distribution de la concentration d'alumine dans le bain électrolytique.

On remarque sur la figure 3.8 que la concentration atteint des maximums locaux aux voisinages des points d'injection, ce qui montre que l'essentiel de la poudre d'alumine se dissout dans ces régions. Cette alumine dissoute est ensuite transportée par l'écoulement. Les deux injecteurs de gauche alimentent le tourbillon de gauche (voir figure 3.2), tandis que les deux injecteurs de droite alimentent essentiellement le tourbillon de droite. Les régions du bain sous-alimentées sont les coins en aval, où la concentration descend en dessous de 3 %w et où l'écoulement est caractérisé par la présence de petits tourbillons

Question: est-ce que ACD n'est pas pour la distance (anode-interface)?
(détail)
(plutôt que la région entre l'anode et l'interface)

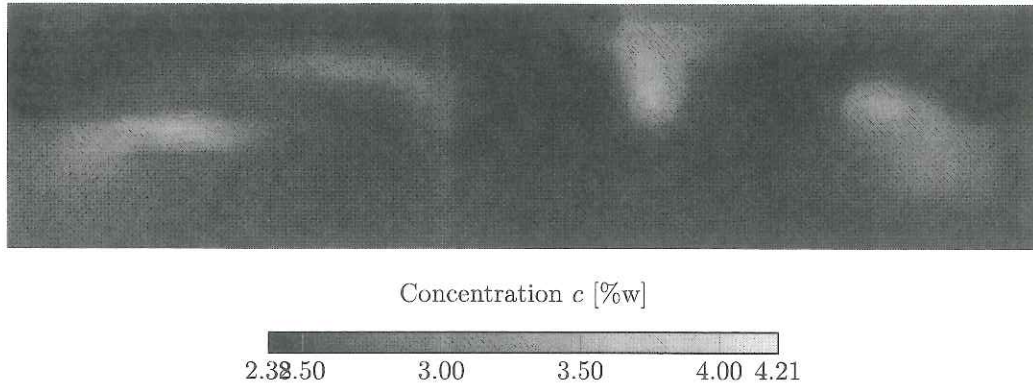


FIGURE 3.8 – Concentration d'alumine dissoute dans l'ACD de la cuve AP32 à $t = 10\,000$ s et à température constante.

isolés. La région centrale en amont des points d'injections est remarquablement uniforme avec une concentration proche de 3 %w.

Nous consacrons maintenant le reste de cette partie au modèle de transport et dissolution d'alumine qui dépend de la température ~~du bain~~ dans le bain de la cuve AP32. ~~et~~ ~~on étudie~~ l'influence des nouveaux paramètres que ce modèle introduit, en particulier le temps de latence Θ_{Lat} , la température initial du bain Θ_{Init} , la température critique Θ_{Crit} et la vitesse de chute des particules dans le bain w .

Sensibilité par rapport au temps de latence Nous avons introduit dans le paragraphe 2.2 un temps de latence qui précède le début de la dissolution d'une particule lâchée dans le bain d'une cuve d'électrolyse. Ce temps était de l'ordre de 0.1 s, ce qui est négligeable devant le temps de dissolution qui est au minimum de 10 s pour le choix de paramètres reportés dans la table 3.2.

Cependant, lors de l'injection d'une dose d'alumine typique, les particules ne peuvent plus être suffisamment dispersées pour que les hypothèses du modèle introduit dans la section 2.2 soient satisfaites, et c'est l'effet collectif de l'ensemble des particules qui prédomine. Selon [Das15], toutes les particules d'une dose subissent un temps de latence de l'ordre de 1 s quel que soit leur taille.

Nous proposons maintenant de déterminer si la distribution de concentration dans le bain électrolytique est sensible au temps de latence de dissolution des particules lors de leur injection. Dans ce but, nous présentons les résultats de 4 calculs du champ de concentration d'alumine dissoute c dans le bain électrolytique de la cuve AP32 avec le modèle décrit dans la section 3.2 et dont les paramètres sont reportés dans la table 3.2 à l'exception du temps de latence Θ_{Lat} pour lequel nous fixons successivement $\Theta_{\text{Lat}} = 1, 2, 5$ et 10 secondes.

La figure 3.9 présente la distribution de concentration d'alumine dissoute dans l'ACD de la cuve AP32 à $T = 10\,000$ s pour les différentes valeurs de Θ_{Lat} croissantes de haut en bas.

Les quatre champs de concentration présentés sur la figure 3.9 sont très similaires.

Légende des figures 3.9 et 3.10 manquante...

(détail: tu utilises des fois $t = 10000$ s et d'autres $T = 10000$ s. pour le résultat à un temps fixe)

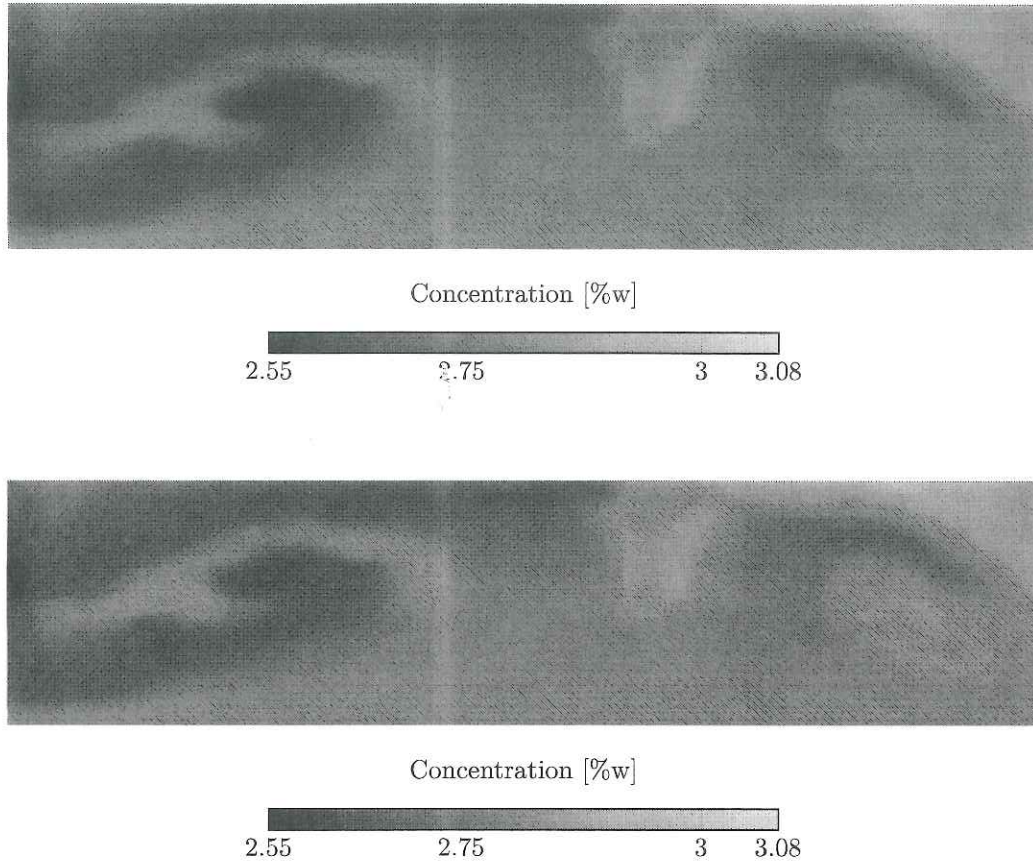


FIGURE 3.11 – Champ de concentration c dans l'ACD de la cuve AP32 à $t = 10,000$ s. En haut, $T_{\text{Crit}} = T_{\text{Liq}}$. En bas, $T_{\text{Crit}} = T_{\text{Liq}} + 0.86$ K.

Sensibilité par rapport à la température critique de transition Dans la limite où $\Theta_{\text{Crit}} - \Theta_{\text{Liq}}$ devient grand, on voit facilement dans l'expression (2.54) que le taux de dissolution des particules, et donc leur vitesse de dissolution, devient nulle dans l'intervalle de température que le bain électrolytique peut raisonnablement admettre. Par conséquent, si la valeur de $\Theta_{\text{Crit}} - \Theta_{\text{Liq}}$ est trop élevée, le temps dissolution des particules peut devenir arbitrairement long, ce qui n'est pas réaliste dans le cas d'une cuve d'électrolyse d'aluminium industrielle.

A l'inverse, en prenant la limite $\Theta_{\text{Crit}} \rightarrow \Theta_{\text{Liq}}$, le taux de dissolution (2.54) s'écrit :

$$\kappa(c, \Theta) = \begin{cases} K \frac{c_{\text{Sat}} - c}{c_{\text{Sat}}} & \text{si } \Theta \geq \Theta_{\text{Liq}} \text{ et } 0 \leq c \leq c_{\text{Sat}}, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (3.68)$$

En d'autres termes, la dissolution des particules est contrôlée uniquement par la concentration locale c si $\Theta \geq \Theta_{\text{Liq}}$, et ne se dissolvent pas sinon.

Nous présentons maintenant la distribution de concentration d'alumine dissoute dans le bain de la cuve AP32 dans l'état périodique résultant de deux calculs. Comme précédemment, l'ensemble des paramètres du modèle de transport et dissolution est reporté

dans la table 3.2. Pour le premier calcul on fixe $\Theta_{\text{Crit}} = \Theta_{\text{Liq}}$, et le taux de dissolution est donné par (3.68). Pour le deuxième calcul on fixe $\Theta_{\text{Crit}} = \Theta_{\text{Liq}} + 0.86 \text{ K}$.

La figure 3.11 présente la concentration d'alumine dans l'ACD de la cuve AP32 à $t = 10\,000 \text{ s}$, lorsque l'état périodique est atteint. Le premier champ de concentration correspond au cas où $\Theta_{\text{Crit}} = \Theta_{\text{Liq}}$, tandis que le deuxième champ de concentration correspond au cas où $\Theta_{\text{Crit}} = \Theta_{\text{Liq}} + 0.86 \text{ K}$. Même si l'on parvient à observer de petites variations entre ces deux solutions, en particulier dans le coin aval droite et autour du point d'injection #4, ces deux champs de concentration sont indistinguables l'un de l'autre.

Finalement, nous nous penchons sur l'effet de la chute gravitationnelle des particules d'alumine sur le champ de concentration d'alumine dissoute.

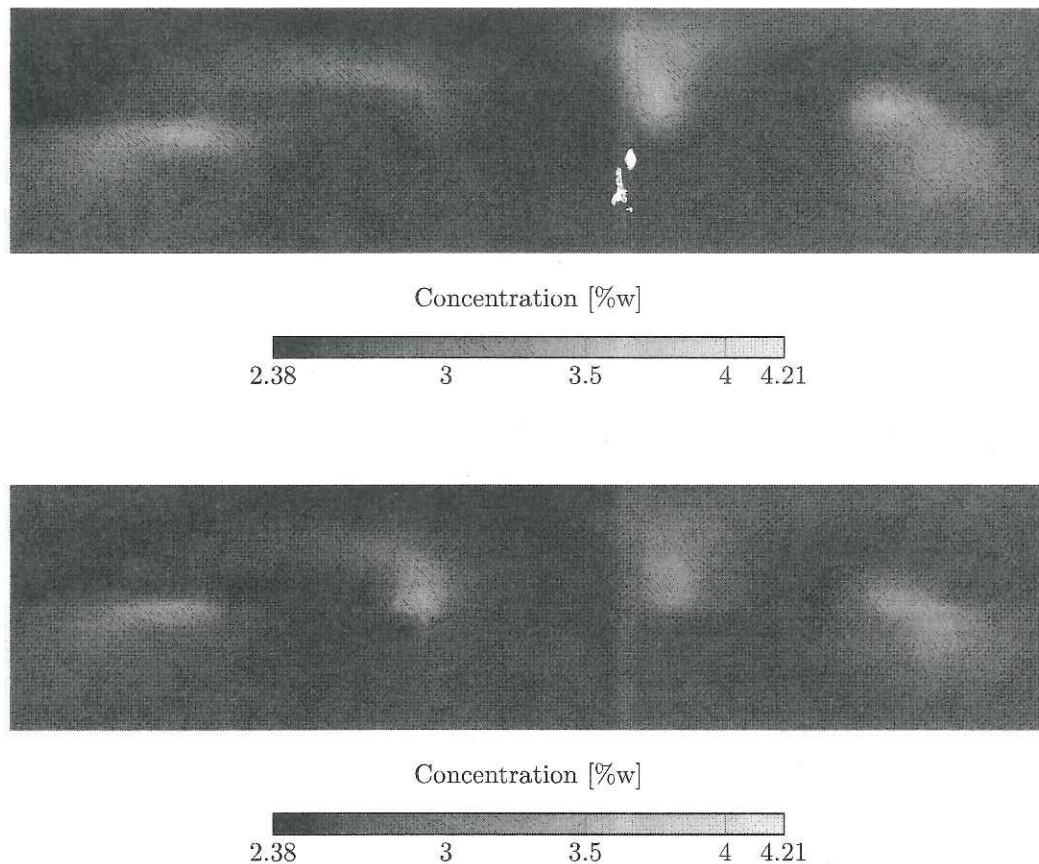


FIGURE 3.12 – Champ de concentration d'alumine dissoute dans l'ACD de la cuve AP32 à $t = 10\,000 \text{ s}$. En haut, dissolution des particules sans chute gravitationnelle dans le bain. En bas, dissolution des particules avec chute gravitationnelle dans le bain.

Effet de la vitesse de chute des particules sur leur dissolution Nous avons déterminé, dans la section 2.5, la vitesse de chute et la profondeur maximale atteinte dans le fluide des particules soumises à la gravité et à une force de traînée de Stokes. Dans le cas le plus favorable, les particules de plus grande taille peuvent chuter de plusieurs

curiosité:
est-ce que
tu as aussi
tenté avec
des $\Theta_{\text{crit}} - \Theta_{\text{Liq}}$
plus élevés?

par des

centimètres dans le bain électrolytique avant de se dissoudre complètement.

Dans ce dernier paragraphe, nous proposons de comparer deux calculs qui illustrent l'effet de la chute des particules dans le bain sur la concentration d'alumine dissoute dans celui-ci.

Pour le premier calcul, qui joue le rôle de point de référence, les paramètres sont reportés dans la table 3.2 et nous annulons l'accélération de la gravité $g = 0$, ce qui donne lieu à une vitesse de chute strictement nulle, soit $w(r) = 0$ pour tout $r > 0$. De plus, l'injection des dose d'alumine a lieu dans le canal central comme indiqué sur la figure 3.5, au niveau de l'ACD.

Pour le deuxième calcul la valeur de g est restaurée, telle que donnée dans la table 3.2 et la vitesse de chute des particules est donnée par l'expression (3.2). Cependant, les points d'injections sont déplacés verticalement vers le haut du canal.

Nous avons montré dans la section 2.5 que les profondeurs maximales atteintes par les particules lorsque la viscosité du fluide est supérieure ou égale à $1 \times 10^{-2} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ sont de l'ordre du millimètre. Or, la taille verticale des mailles dans les canaux ne permet pas de capturer des effets de cette amplitude. Pour cette raison, nous choisissons pour le paramètre de viscosité μ , qui intervient dans la définition (3.2), la viscosité laminaire du fluide, soit $\mu = 2 \times 10^{-3} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Cette valeur de la viscosité donne lieu à des profondeurs de chute maximale de particule dans le bain de l'ordre de quelques centimètres.

La figure 3.12 représente les champs de concentration dans l'ACD de la cuve AP32 obtenus par ces deux calculs, évalués à $t = 10\,000 \text{ s}$, lorsque l'état périodique est atteint.

On remarque quelques différences entre les deux solutions, essentiellement au niveau des points d'injection. Les valeur maximales de la concentration d'alumine dissoute à proximité des points d'injection #1, #3 et #4 sont plus grandes lorsque la chute des particules est négligée. On constate l'effet inverse pour l'injecteur #2 : la concentration d'alumine dissoute sous cet injecteur atteint un maximum local plus marqué lorsque la chute des particules est pris en compte. Dans le reste du bain, la distribution de concentration est similaire entre les deux calculs.

Nous concluons cette partie par une discussion de ces résultats.

3.5 Discussion et conclusion

{sec:populations-conclusion}

Dans ce chapitre 3, nous avons proposé un modèle de transport et dissolution des particules d'alumine dans le bain électrolytique d'une cuve d'électrolyse d'aluminium. La dissolution des particules dépend de leur taille, de la concentration d'alumine dissoute dans leur voisinage et de la température du bain électrolytique. Nous avons proposé un schéma numérique pour approcher la densité de particules n_p , concentration d'alumine dissoute c et la température de l'électrolyte Θ dans le bain électrolytique basé sur un splitting en temps des différentes équations et une méthode d'éléments finis. Nous avons ensuite appliqué ce modèle au cas de la cuve industrielle AP32 et calculé la distribution du champ de concentration c dans le bain électrolytique jusqu'à ce que le système atteigne un état stationnaire périodique. Nous avons évalué le comportement de cette distribution de concentration stationnaire en fonction des nouveaux paramètres introduits par ce modèle par rapport au travail de T. Hofer [Hof11].

Tout d'abord, nous avons montré que le temps de latence de dissolution des particules a

un impact négligeable sur la distribution de concentration. La vitesse de l'écoulement dans le bain aux points d'injection est de l'ordre de $2 \text{ à } 3 \text{ cm s}^{-1}$. Dans le cas le plus extrême, c'est-à-dire lorsque $\Theta_{\text{Lat}} = 10 \text{ s}$, les particules sont transportées sur une distance maximale de 20 à 30 cm avant de commencer à se dissoudre, ce qui correspond à environ 2% de la longueur de la cuve. Dans la mesure où un tel temps de latence surestime certainement celui des particules dispersées dans le bain d'une cuve d'électrolyse, on peut raisonnablement négliger l'effet d'un tel phénomène dans le cadre du modèle proposé dans cette section et poser $\Theta_{\text{Lat}} = 0$, ce qui réduit la complexité de l'implémentation du modèle et le temps de calcul nécessaire.

considéré dans ce travail

Remarquons ~~enfin~~ qu'ici nous avons supposé que l'ensemble des particules qui constituent une dose d'alumine pénètrent et se dispersent dans le bain électrolytique. Dans une cuve industrielle, il peut arriver qu'une partie des particules s'agglomèrent après être entrées en contact avec le bain, et forment ce qu'on appelle des agrégats [Das15]. Ces agrégats mettent un temps, assimilé à un temps de latence, nettement plus long à se dissoudre et par conséquent peuvent être transportés par l'écoulement du bain sur des distances bien plus grandes. La description de la formation de ces agrégats et leur déplacement dans le bain, la modélisation des phénomènes thermochimiques qui ont lieu en leur sein et la dissolution des particules qui les constituent est un sujet complexe qui sort du cadre de ce travail.

Nous nous sommes ensuite intéressés à la dissolution des particules dans le bain électrolytique en fonction de sa température de surchauffe Θ_{Sur} . C'est très certainement le paramètre le plus important du modèle de transport et dissolution d'alumine, qu'il faut choisir avec soin. Il est clair que si la température du bain Θ est proche de la température de liquidus Θ_{Liq} , une petite perturbation est suffisante pour que Θ soit inférieure à Θ_{Liq} . Une telle perturbation intervient lorsque des particules d'alumine extraient l'énergie thermique du bain pour se réchauffer et se dissoudre. Dans une telle situation, la dissolution est fortement ralentie et les particules sont transportées sur de longues distances, typiquement plusieurs mètres, avant de se dissoudre complètement. Les particules peuvent alors déposer de la masse sous forme d'alumine dissoute dans une plus grande région, ce qui contribue à influencer et modifier significativement la distribution de l'alumine dissoute dans le bain électrolytique. A l'inverse, plus la température de surchauffe du bain est élevée, i.e., plus la température du bain s'écarte de la température du liquidus, plus la perturbation nécessaire à ce que la température du bain passe en-dessous de Θ_{Liq} est importante. A partir d'une certaine limite, l'énergie nécessaire à réchauffer et dissoudre une dose d'alumine ne constitue plus une perturbation suffisante. Dans ce cas, la température ne joue essentiellement plus de rôle dans la dissolution des particules d'alumine. Cette constatation rejoint les observations faites sur des cuves industrielles. En effet, lorsque la température de surchauffe est grande, les doses d'alumine se dissolvent plus facilement que lorsque la surchauffe est faible. La difficulté est de trouver un équilibre pour que l'alumine se dissolve suffisamment vite, *pour* que la concentration dans le bain soit contrôlable, tout en maintenant une surchauffe aussi faible que possible pour minimiser les pertes énergétiques.

sur

donc

Au niveau microscopique, la réaction de dissolution des particules est contrôlée par deux mécanismes. Pour que la dissolution puisse avoir lieu, il suffit d'une part que la concentration d'alumine dissoute à proximité de la particule soit inférieure à la concentration de saturation. Il faut d'autre part fournir de l'énergie à la réaction qui est endothermique. Le paramètre Θ_{Crit} contrôle la taille de la région de transition entre ces deux régimes : lorsque la température est largement supérieure à Θ_{Crit} , la vitesse de dissolution est essentiellement contrôlée par la valeur de la concentration c à proximité de la particule. Nous avons évalué la sensibilité de la distribution de concentration d'alumine dissoute dans le

bain par rapport au paramètre Θ_{Crit} . Clairement, une valeur arbitrairement grande pour Θ_{Crit} bloque complètement la dissolution des particules. En revanche, lorsque Θ_{Crit} est compris dans l'intervalle $[\Theta_{\text{Liq}}, \Theta_{\text{Liq}} + 0.86]$, la distribution de concentration est insensible à la valeur précise de Θ_{Crit} . Le rôle essentiel de la température dans ce cas-là est de bloquer la dissolution des particules lorsque la température Θ est inférieure à Θ_{Liq} .

Finalement, nous avons étudié l'effet de la chute gravitationnelle des particules dans le bain sur la distribution de la concentration d'alumine dissoute. La chute des particules apportent des variations notables de la concentration uniquement autour des points d'injection, qui sont de toute manière soumis à des fluctuations importantes, due aux injections qui interviennent à intervalles réguliers au cours du cycle global d'injection. De plus, les vitesses de chute des particules sont très certainement surestimées dans notre modèle. L'écoulement dans le canal central, dans lequel ont lieu les injections de particules, est turbulent. Cet écoulement turbulent se traduit par une viscosité effective ressentie par les particules qui est certainement supérieure à la viscosité laminaire de l'électrolyte. Les profondeurs maximales atteintes par les particules dans ce cas sont alors de l'ordre du millimètre ou inférieure. En suivant les mêmes arguments qui nous ont conduits à ne pas considérer de temps de latence, nous pouvons raisonnablement négliger la chute des particules dans le bain électrolytique et son effet sur la distribution de la concentration de l'alumine.

Dans ce chapitre 3, nous avons supposé que la température de liquidus de l'électrolyte Θ_{Liq} ne dépend pas de la chimie du bain, et en particulier de la concentration d'alumine dissoute, que la concentration de saturation de l'alumine dissoute ne dépend ni de la chimie du bain ni de la température de celui-ci, et finalement que l'enthalpie de dissolution ΔH_{Diss} ainsi que la vitesse de dissolution κ ne dépendent pas de la chimie du bain. Ces hypothèses sont valides pour autant que le système s'écarte peu des conditions d'exploitations idéales. Ce n'est bien entendu pas le cas lorsqu'on considère une cuve d'électrolyse industrielle qui subit de nombreuses perturbations et peut traverser des phases d'instabilité. Un sujet de recherche futur consiste à prendre en compte ces différentes dépendances dans le modèle de transport et dissolution d'alumine dans le bain électrolytique.

Je trouve que la discussion est très claire
et résume bien les résultats obtenus!