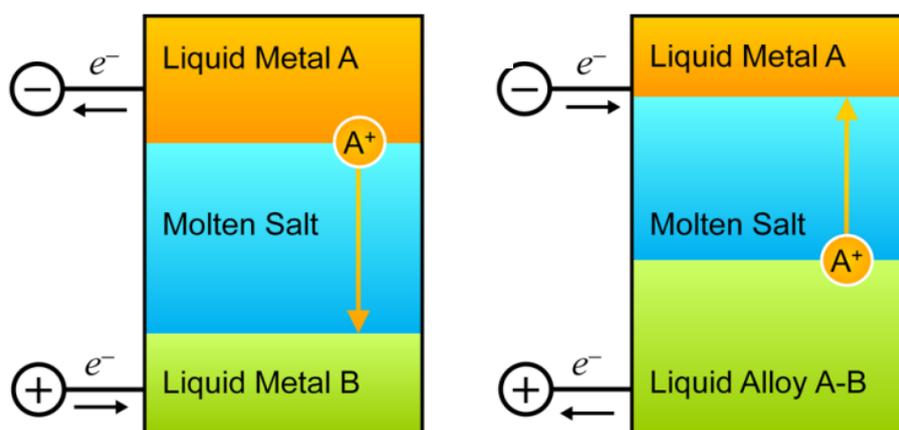


ELECTROCHIMIE DES BATTERIES A METAUX LIQUIDES



Etudiants :

Lucie BRUNEL

Zoé KOMONO

Emma CARLIER

Tifenn LE GOC

Ilyas JBILOU

Laura SOLSONA ICHART

Enseignant-responsable du projet :

Antoine SIMON

Cette page est laissée intentionnellement vierge.

Date de remise du rapport : **17/06/2023**

Référence du projet : **STPI/P6/2023 – 13**

Intitulé du projet : ***Electrochimie des batteries à métaux liquides***

Type de projet : ***Bibliographique***

Objectifs du projet :

Se renseigner sur les batteries à métaux liquides et essayer de trouver des couples anode/cathode + électrolytes qui fonctionnent en conditions réelles.

Nous allons pour cela prendre en compte de nombreux critères comme la viscosité, la masse volumique, l'électronégativité ou encore les risques ayant un impact sur l'environnement et sur la santé engendrés par l'utilisation des différents métaux.

Nous nous pencherons également sur les instabilités potentielles de ces batteries.

Mots-clefs du projet :

Batteries

Métaux

Chimie

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction	5
2. Méthodologie / Organisation du travail	7
2.1. Organisation du travail	7
2.2. Organigramme	7
3. Travail réalisé et résultats	8
3.1. Choix des électrodes et de l'électrolyte	8
3.1.1. Couples d'électrodes	8
3.1.2. Choix de l'électrolyte	9
3.2. Critères de choix des éléments de la batterie	9
3.2.1. Critères principaux	9
3.2.1.1. Plage de température à l'état liquide commune	9
3.2.1.2. Séparation des phases	10
3.2.2. Critères secondaires	10
3.2.2.1. Différence d'électronégativité des électrodes	10
3.2.2.2. Tension de surface	10
3.2.2.3. Viscosité	11
3.2.2.4. Miscibilité	12
3.2.2.5. Risques, impacts sur la santé et environnement	12
3.3. Instabilités	12
3.3.1. Instabilité de Metal Pad Roll	13
3.3.2. Convection thermique	14
3.3.3. Instabilité de Taylor	14
3.3.4. Convection solutale	16
3.4. Résultats	16
4. Conclusions et perspectives	18
5. Bibliographie	19
6. Annexes	21

1. INTRODUCTION

Ce projet de physique s'inscrit dans le cadre de notre deuxième année en département STPI. Il nous a été proposé d'étudier, en groupe, un moyen de stockage de l'énergie électrique : Les batteries à métaux liquides.

L'un des plus grands enjeux de demain est de produire de l'énergie de façon durable tout en répondant aux besoins mondiaux en forte croissance. Ainsi se développe de nombreuses sources d'énergies renouvelables, telles que l'éolien ou le photovoltaïque. Le problème majeur de ces nouvelles sources d'énergies est qu'elles sont uniquement produites de façon intermittente. C'est-à-dire que nous ne pouvons pas réguler leur disponibilité (par exemple, une éolienne ne produit de l'énergie que s'il y a du vent). C'est pourquoi il est essentiel de trouver un moyen de stocker de l'énergie, afin de pouvoir la redistribuer dans le temps à n'importe quel moment. C'est justement le rôle des batteries.

Une batterie est un système électrochimique qui stocke de l'énergie sous forme chimique et la restitue sous forme électrique. Elle est composée d'une cathode où se déroule la réduction des métaux (gain d'électrons) et d'une anode où se déroule l'oxydation des métaux (perte d'électrons). Ces deux électrodes sont reliées par un électrolyte pour permettre la circulation des ions. Le séparateur sert à éviter au maximum les courts-circuits dans la batterie. [\[1\]](#) [\[2\]](#)

L'histoire de la batterie avec des métaux liquides commence il y a près d'un siècle au moment où les premières batteries, composées de cadmium et de nickel, étaient développées et commercialisées. Cependant, le développement des batteries à métaux liquides a été interrompu puis abandonné. En effet, les chercheurs se sont orientés vers des batteries avec une haute densité énergétique et des composants transportables facilement car ceux-ci sont mieux adaptés aux applications automobiles.

Ainsi sont apparues les batteries composées de cadmium et de nickel. Bien qu'à l'époque, elles paraissaient plus pertinentes que les batteries liquides, celles-ci relevaient tout de même quelques problèmes. En effet, d'une part le cadmium est un élément très toxique, et d'autre part ces batteries ont une auto-décharge très importante et perdent ainsi facilement en performance au cours du temps.

Ensuite, c'est dans les années 70 que débutent les premières recherches sur les batteries lithium-ion. Celles-ci sont toujours utilisées aujourd'hui, notamment dans les téléphones portables ou les voitures électriques. Elles sont reconnues pour leur forte capacité à transporter l'énergie, 4 fois supérieure à celle des batteries nickel cadmium, ou encore pour leur facilité de fabrication. Cependant, leur durée d'utilisation est limitée à 2 ou 3 ans, notamment à cause de leur inévitable dégradation au cours du temps (corrosion, surcharge...).

Enfin, après 40 ans d'arrêt des recherches sur les batteries à métaux liquides, le développement des technologies d'énergie renouvelable, comme l'énergie éolienne, a accéléré la demande de stockage d'énergie à grande échelle. L'objectif étant de trouver une batterie à faible coût et qui a une longue durée de vie. C'est ainsi que l'intérêt des batteries à métaux liquides a été ravivé. [\[3\]](#) [\[1\]](#) [\[4\]](#)

Contrairement aux batteries classiques que l'on peut trouver dans nos objets électroniques du quotidien, les composants des batteries que nous avons étudié ont la particularité d'être tous à l'état liquide. Elles comprennent deux électrodes de métaux liquides séparées par un électrolyte, lui aussi liquide. Ces trois phases se séparent toutes seules en fonction de leur masse volumique et grâce à leur immiscibilité conjointe. [\[5\]](#)

En comparaison aux batteries lithium-ion, les batteries à métaux liquides permettent de stocker plus d'énergie et se rechargent plus vite, ce qui permettrait d'augmenter le nombre de cycles de vie d'une batterie. De plus, elles ne sont pas soumises aux problèmes de dendrites (excroissances se formant sur la surface des électrodes au lithium solide au fil des utilisations), qui peuvent occasionner des courts-circuits. [6]

Il y a encore d'autres avantages en ce qui concerne les batteries à métaux liquides. En effet, ces batteries ont la particularité d'être peu coûteuses puisque la plupart de leurs composants sont abondants dans la nature. En outre, la fabrication de ces batteries est plus simple grâce à la séparation naturelle des composants, dû à leur différence de masse volumique et leur non-miscibilité ; ces batteries n'ont donc pas besoin de séparateur. [5]

Dans l'ensemble, le faible coût des matériaux, l'assemblage simple et le potentiel de longues durées de vie positionnent particulièrement bien les batteries à métaux liquides par rapport à ses potentiels concurrents sur le marché du stockage énergétique.

En revanche, ces batteries possèdent tout de même quelques inconvénients, qui les rendent inadaptées à une utilisation dans des applications portables. En effet, comme les composants sont à leur état liquide, la batterie est sensible au mouvement. Si les électrodes entrent en contact, cela peut être dangereux puisque cela provoque un court-circuit dans la batterie et donc engendre une création de chaleur très rapidement. De plus, ces batteries fonctionnent à des températures élevées, généralement plus de 200°C, ce qui n'est pas adapté à certaines applications. [5]

Maintenant, nous pouvons citer certaines applications aux batteries à métaux liquides. Comme les composants sont liquides, ces batteries sont restreintes à des applications stationnaires. Celles-ci sont particulièrement adaptées au stockage d'énergie électrique à grande échelle. Par exemple, ces batteries peuvent être utilisées pour l'alimentation électrique de zones éloignées grâce à du stockage sur des échelles de temps allant du court au long terme. [7]

Dans le cadre de notre projet, nous allons nous pencher sur la partie électrochimie des batteries à métaux liquides. Nous avons comme objectif de trouver des couples Anode/Cathode + électrolytes qui conviendraient.

Nous commencerons par définir notre répartition des tâches, puis nous expliquerons nos critères de sélection pour les couples et les électrolytes, avant de se pencher sur les instabilités pouvant être observées sur ce type de batteries. Enfin, nous présenterons les résultats obtenus et conclurons sur l'avenir du projet et sur ce qu'il nous a apporté.

2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

2.1. Organisation du travail

Pour travailler sur ce projet, nous disposons de créneaux dédiés d'une heure et demie tous les vendredi matin de 8h à 9h30, durant un semestre. Notre sujet étant un sujet de recherches bibliographiques, nous travaillons dans une salle informatique, afin d'avoir tous accès à des ordinateurs et une connexion à internet. Nous avons aussi la possibilité de compléter nos recherches informatiques en allant se renseigner à la bibliothèque de l'INSA.

Durant le premier cours, notre sponsor nous a expliqué les objectifs du projet ainsi que le principe de fonctionnement des batteries.

Ensuite, au début de chaque séance, nous nous regroupons et faisons le point sur l'avancée du projet, puis nous répartissons les tâches en fonction de ce qu'il restait à faire.

Nous avons divisé le travail en 3 grandes étapes :

- Réaliser un tableau de compatibilité et performance de couples chimiques
- Se renseigner sur les instabilités et les dangers entraînés par l'utilisation de métaux liquides
- Réaliser le rapport, le poster et préparer la soutenance orale

2.2. Organigramme

Tâches	Etudiants concernés
Instabilité de Pad Roll	Zoé
Instabilité convection solutale	Lucie, Laura
Instabilité de Tayler	Zoé, Laura
Instabilité convection thermique	Zoé
Ecoulement électro-vortex	Tifenn
Dangers des métaux	Tifenn
Réalisation du tableau	Ilyas, Zoé, Tifenn, Laura, Lucie, Emma
Graphique de viscosité	Laura, Lucie
Recherche sur les électrolytes	Ilyas
Rédaction du rapport	Ilyas, Zoé, Tifenn, Laura, Lucie, Emma

3. TRAVAIL RÉALISÉ ET RÉSULTATS

Dans cette partie, nous allons voir en quoi ont consisté nos recherches et quels ont été nos résultats. Le but de notre projet étant d'étudier l'électrochimie des batteries à métaux liquides, notre première démarche a été de regrouper l'ensemble des électrodes et électrolytes envisageables pour une batterie. Ensuite, nous avons choisi une liste de critères à respecter afin d'assurer une bonne coexistence des phases liquides dans la batterie et de maximiser sa performance. Nous verrons que certains critères sont essentiels au fonctionnement de la batterie, et que d'autres permettent juste de la rendre plus pertinente. Enfin, nous avons donc pu proposer une liste de couples d'électrodes possibles pour réaliser une batterie à métaux liquides.

3.1. Choix des électrodes et de l'électrolyte

3.1.1. Couples d'électrodes

La première étape de nos recherches a été de rassembler tous les couples d'électrodes possibles :

- Nous avons commencé par regrouper les métaux utilisables en tant qu'électrodes. Ensuite, nous avons effectué des recherches sur chaque élément en fonction de nos critères
- Nous avons sélectionné 10 couples anode / cathode en se basant sur un rapport publié dans un journal de chimie (cf figure 3) qui indique les couples prometteurs en fonction de recherches déjà établies.
- Puis pour un couple donné, nous nous sommes assurés que le potentiel standard des deux métaux soit différent

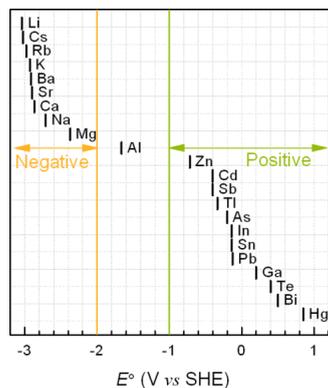


Figure 2: Classification des métaux en fonction de leur potentiel standard

A-B	C_{A-B}^{st} (\$ kWh ⁻¹)	$\hat{E}_{cell,eq}$ (V)	major challenges
Li-Cd	66	0.47	low voltage
Li-Pb	64	0.55	low voltage
Li-Sb	89	0.92	high T_m (Sb)
Na-Hg	31	0.40	solubility of Na, low voltage
Na-Sb	93	0.74	solubility of Na, high T_m (Sb)
Ca-Al	12	0.43	solubility of Ca, high T_m (Ca and Al), low voltage
Ca-Pb	36	0.60	solubility of Ca, high T_m (Ca)
Ca-Sb	69	0.99	solubility of Ca, high T_m (Ca and Sb)
Ba-Pb	40	0.84	solubility of Ba, high T_m (Ba)
Ba-Sb	64	1.28	solubility of Ba, high T_m (Ba and Sb)

Figure 3: Couple d'électrode prometteurs pour les batteries à métaux liquides

3.1.2. Choix de l'électrolyte

Dans une batterie, l'électrolyte est l'élément permettant le passage des ions entre les électrodes. Cette propriété est appelée "conductivité ionique". Pour les batteries classiques, on utilise généralement une molécule dissoute dans un solvant organique (batterie Li-ion) ou dans de l'eau (batterie au plomb). Il arrive aussi qu'on utilise un électrolyte à l'état solide.

Étant donné les températures élevées de fonctionnement des batteries à métaux liquides, de tels solvants s'évaporerait. C'est pourquoi on utilise des sels fondus comme électrolytes dans notre cas. En effet, la majorité des sels restent des électrolytes viables à l'état fondu. C'est-à-dire qu'ils conservent notamment leur bonne conductivité ionique. [8] [5] [16]

3.2. Critères de choix des éléments de la batterie

Notre objectif étant de trouver des triplets anode/cathode/électrolyte, nous avons choisi une liste de critères à prendre en compte afin de proposer une batterie à métaux liquides réalisable. Nous avons nommé "critères principaux" ceux essentiels au fonctionnement d'une batterie à métaux liquides. Nous avons également appelé "secondaires" les critères nous renseignant sur les performances de la batterie, sa durée d'utilisation ainsi que sur les risques de ses composants pour la santé et l'environnement .

3.2.1. Critères principaux

3.2.1.1. Plage de température à l'état liquide commune

Avant toute chose, il doit être possible que l'anode, la cathode et l'électrolyte soient à l'état liquide en même temps. C'est-à-dire qu'il doit exister une plage de température pour laquelle ces trois parties sont à l'état liquide. Pour vérifier cela, nous avons comparé la plus grande des trois températures de fusion à la plus petite des trois températures d'ébullition. En effet si $T_{min}(\max(T_{fus})) > T_{max}(\min(T_{éb}))$ alors l'espèce chimique ayant la plus petite des trois températures d'ébullition sera forcément sous forme gazeuse.

Ainsi, nous nous sommes assurés à l'aide de notre tableau que la plus grande des températures de fusion soit inférieure à la plus petite des températures d'ébullition, dans quel cas les 3 parties de la batterie peuvent coexister dans leur état liquide. [22]

Électrolyte choisi	Anode/Cathode	Tmin (max(Tfus)) (°C)	Tmax (min(Téb)) (°C)	Tmin < Tmax ?
KCl	Na / Hg	770	356,58	Non
NaCl	Ca / Al	839	1465	Oui

Nous avons également pu remarquer que la plupart des électrodes et des électrolytes possédaient des températures de fusion très élevées, allant jusqu'à 1477°C pour SrF2. Maintenir la batterie à des températures aussi élevées nécessiterait un gros apport d'énergie, nuisant ainsi au rendement de celles-ci.

Enfin, l'effet Joule nous a paru essentiel à prendre en compte. C'est pourquoi nous avons réfléchi aux effets positifs ou négatifs que celui-ci pourrait avoir sur une batterie. Nous avons pensé que son principal problème pourrait être la hausse de la température moyenne de la batterie, perturbant ainsi la coexistence des 3 phases liquides. Cependant, il est évident que cette perte d'énergie sous forme thermique pourrait être exploitée. Comme nous l'avons vu précédemment, certains métaux nécessitent une température très élevée afin d'atteindre leur état liquide. Cette énergie thermique pourrait donc être utilisée afin de contribuer à l'obtention de cet équilibre de température.

3.2.1.2. Séparation des phases

Les différents liquides doivent également respecter un bon ordre de positionnement. C'est-à-dire que la cathode et l'anode doivent être séparées par l'électrolyte. En effet, un court-circuit à lieu si les deux électrodes sont en contact. La position des différents liquides au sein de la batterie dépend de la masse volumique de ces derniers. La masse volumique de l'électrolyte doit donc être comprise entre celle des deux électrodes.

3.2.2. Critères secondaires

3.2.2.1. Différence d'électronégativité des électrodes

Afin d'être plus stables, les atomes forment des liaisons covalentes en partageant leurs électrons. En effet, deux atomes liés par une liaison covalente mettent chacun en commun l'un de leurs électrons.

L'électronégativité d'un atome est sa capacité à attirer à lui les électrons de ces liaisons covalentes. Plus la différence d'électronégativité des électrodes est grande, plus le transport de charge au sein de l'électrolyte sera bon. [0]

3.2.2.2. Tension de surface

Il faut savoir qu'il existe des interactions de courte portée entre les molécules d'un liquide. Ces interactions sont les forces de Van der Waals et les liaisons hydrogènes.

- Dans le cas d'une molécule située dans son liquide, ces forces s'annulent. C'est-à-dire que la résultante de ces forces est nulle.
- Toutefois, pour une molécule se situant à l'interface de deux liquides, cette résultante est perpendiculaire à l'interface et dirigée vers le liquide dont est issu la molécule. Cela est dû au fait que cette molécule a des interactions seulement avec les molécules de son liquide. C'est cette force résultante qu'on appelle tension de surface ou tension superficielle.

La tension de surface est intéressante dans le cas des batteries à métaux liquides car elle s'oppose à la modification de l'aire de l'interface et donc aux instabilités. [0]

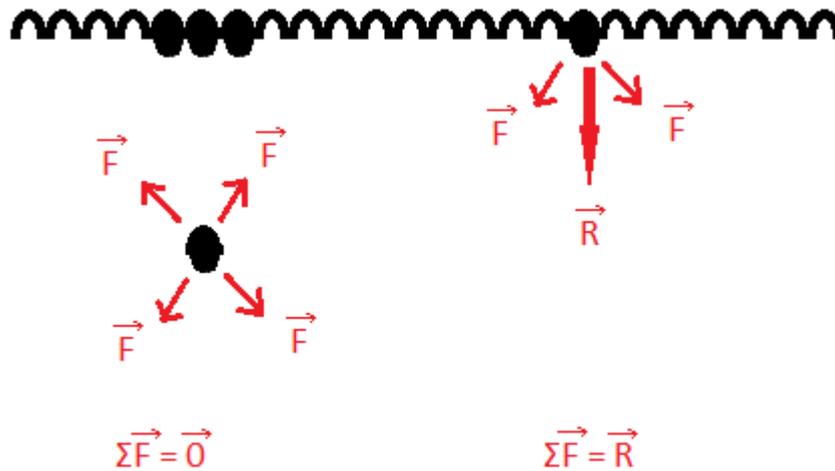


Figure 4 : Schéma des interactions d'une molécule en fonction de son emplacement dans son liquide.

3.2.2.3. Viscosité

La viscosité est la résistance d'un liquide à l'écoulement. Elle est due, elle aussi, aux interactions de Van der Waals et aux liaisons hydrogènes. Plus la viscosité des trois phases liquides de la batterie est élevée, plus la batterie mettra du temps à se déstabiliser en cas de perturbation. Cela permet d'anticiper ces déstabilisations. [0]

Il faut savoir que la viscosité diminue lorsque la température augmente (cf. Figure 5). En effet, lorsqu'il y a augmentation de la température, les interactions de Van der Waals et les liaisons hydrogènes diminuent en intensité. Il est donc préférable que la température de fonctionnement de la batterie soit faible.

Le graphique ci-dessous montre l'évolution de la viscosité de différents éléments en fonction de la température. [21]

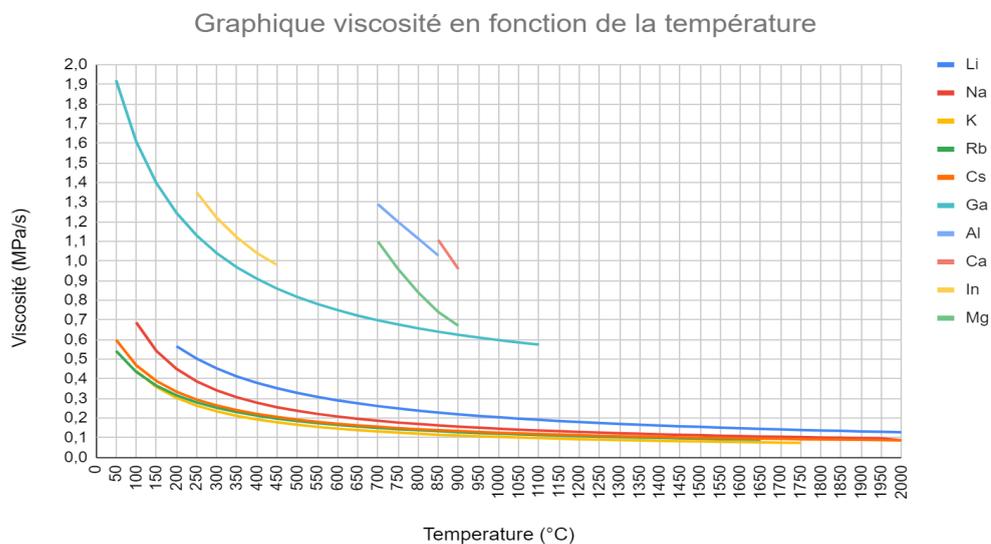


Figure 5: Graphique représentant la viscosité de certains métaux en fonction de la température

3.2.2.4. Miscibilité

Il est préférable que les métaux liquides soient non miscibles avec l'électrolyte de façon à conserver les trois phases. Toutefois, le temps requis pour que deux liquides se mélangent est variable. Donc, une batterie ayant des liquides miscibles pourrait fonctionner dans le cas où ce temps de mélange serait suffisamment élevé. [\[0\]](#)

3.2.2.5. Risques, impacts sur la santé et environnement

Après avoir pris en compte tous les aspects précédents, nous avons pensé à considérer les risques et dangers envers la santé et l'environnement des composants choisis. En effet, en vue de la mise en place d'un tel produit sur le marché, il est essentiel de prendre en compte les éventuels impacts sur l'Homme et sur l'environnement. Nous avons d'abord pu voir que deux principaux critères éliminatoires sont apparus pour certains de nos composants, à savoir :

- Réactif (explosif ou inflammable) au contact de l'air ou de l'eau
- Polluant.

En effet, une telle dangerosité nous a paru trop importante pour envisager la production et la mise en circulation d'une batterie contenant un tel composant. De plus, en vue des enjeux environnementaux actuels, l'aspect polluant a également été mis dans la catégorie éliminatoire. Comme exemple, nous pouvons citer l'élément chimique césium (Cs), pour lequel la réaction avec l'eau et le dioxyde de carbone est explosive ou encore le rubidium (Rb) qui réagit violemment et s'enflamme avec l'eau.

Certains éléments ayant été utilisés pour former des couples ont tout de même des risques à prendre en considération :

- CMR (cancérogène, mutagène, toxique pour la reproduction)
- Mauvaise conductivité électrique

C'est le cas, par exemple, du lithium, utilisé habituellement pour faire des batteries, qui est en élément corrosif pouvant provoquer des irritations aux yeux ou des brûlures sur la peau. Même si certains métaux liquides comme celui-ci peuvent représenter un danger pour l'homme, les batteries ne sont pas destinées à être régulièrement au contact des hommes. Nous pouvons donc les utiliser quand-même. [\[22\]](#)

3.3. Instabilités

Plusieurs phénomènes perturbent le fonctionnement des batteries à métaux liquides et peuvent provoquer une dégradation rapide de celle-ci voire causer un court-circuit. Ces instabilités sont notamment liées à des réactions chimiques ou des phénomènes liés à la mécanique des fluides.

3.3.1. Instabilité de Métal Pad Roll

Un des phénomènes les plus problématiques est appelé l'instabilité de Métal Pad Roll ou instabilité de ballottement. Cette instabilité est le résultat d'une perturbation qui entraîne l'inclinaison des interfaces. Cette inclinaison engendre un mouvement de courant horizontal qui induit un champ électromagnétique à l'origine d'une force de Lorentz qui provoque la propagation de la perturbation. Ceci crée donc une vague circulaire ou roulement au sein de la batterie qui peut se répéter due à un effet de résonance. Le problème de ce phénomène est que s'il est trop important il peut générer un court-circuit en mettant en contact l'anode et la cathode. Les premières études sur l'instabilité de Métal Pad Roll ont été effectuées dans l'industrie de l'aluminium où celle-ci menaçait de court-circuiter les cellules de réduction de l'aluminium. Ces cellules sont utilisées pour l'électrolyse de l'aluminium, elles sont donc composées de deux couches de liquide et forment un système similaire à celui des batteries à métaux liquides. Les études sur ces cellules ont permis de déterminer un critère d'instabilité pour des cellules composées de deux couches de liquides différents.

$$\text{eq 1. } \beta = \frac{I B_z}{\Delta \rho g H_1 H_2}$$

Ce critère d'instabilité noté β dépend de la taille des deux couches de liquide H_1 et H_2 du champ magnétique vertical, noté B_z , du courant qui traverse la pile et de la différence de masse volumique entre les deux fluides $\Delta\rho$.

Si ce critère est supérieur au critère de référence noté β_c qui dépend de la géométrie de la batterie mais également de la dissipation par effet Joule qui se produit dans la batterie, c'est à dire si $\beta > \beta_c$, alors l'instabilité de ballottement se produit. Un autre modèle plus précis, capable de prédire l'instabilité de Métal Pad Roll dans une batterie à métaux liquides, autrement dit adapté à un système à trois couches liquides, est actuellement en train d'être développé par notre référent. De plus, de nombreux modèles de simulation ont déjà été développés afin de modéliser l'instabilité et la déformation de l'électrolyte qu'elle occasionne en fonction de la composition de la batterie, ce qui peut permettre d'anticiper l'instabilité. Enfin, augmenter la taille de l'électrolyte afin de limiter l'impact de la déformation de son interface semble être une solution pratique et envisageable, cependant cela pourrait favoriser une autre instabilité: l'instabilité de convection thermique. [9] [17]

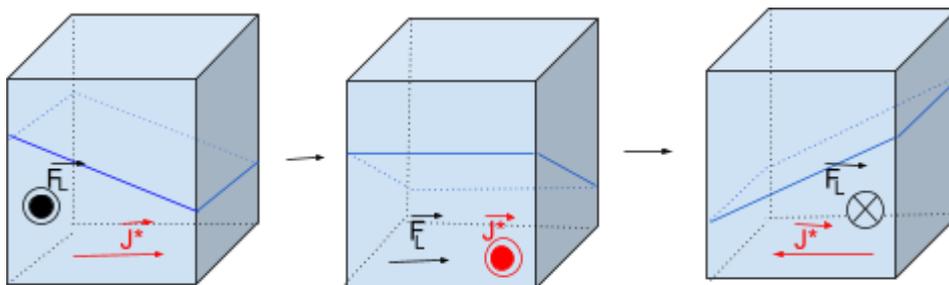


Figure 6: Propagation de la perturbation liée à l'instabilité de Métal Pad Roll

3.3.2. Convection thermique

La convection thermique est un transfert d'énergie thermique qui s'accompagne d'un transport de la matière à l'état de fluide et donc qui induit un écoulement ou un flux au sein du liquide. La convection thermique est due à une non-uniformité de la température du système. Dans le cadre d'une batterie à métaux liquide, il existe deux facteurs responsables de cette non-uniformité. Dans un premier temps, nous retrouvons le chauffage de la batterie.

Afin de la maintenir à sa température de fonctionnement qui est souvent très élevée, la batterie à métaux liquides doit être chauffée, en général par ses parois, notamment par le bas. Ceci crée une différence de température entre les couches basses de la cathode qui auront une température plus élevée que les couches supérieures de la cathode. En général, plus la température d'un fluide est élevée, plus celui-ci est léger, les couches de liquide inférieures vont donc remonter tandis que les couches supérieures moins chaudes et donc plus lourdes vont descendre. Finalement, ceci crée un mouvement circulaire, vertical et continu au sein de la cathode. L'autre facteur à l'origine de ce phénomène de convection est l'effet Joule. L'électrolyte est la phase la plus vulnérable face à ce phénomène. En effet, l'électrolyte étant généralement un sel fondu, il possède une résistance bien plus importante que les métaux qui constituent l'anode et la cathode. Le passage du courant dans l'électrolyte induit donc un effet Joule important qui se traduit par un dégagement de chaleur du centre de l'électrolyte vers l'extérieur. Pareillement, un flux circulaire va se créer dans l'électrolyte si celui-ci est trop important, pouvant ainsi engendrer un court-circuit. [\[18\]](#) [\[19\]](#) [\[20\]](#)

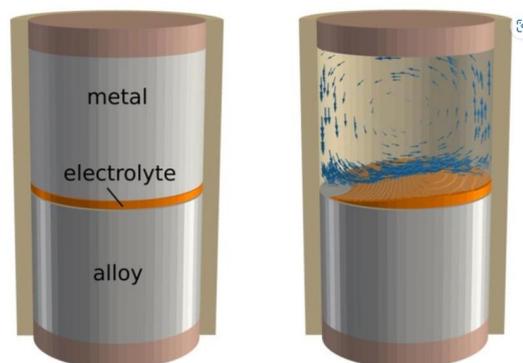


Figure 7: Court-circuit généré par un flux circulaire

3.3.3. Instabilité de Tayler

L'instabilité de Tayler survient lorsque le courant traversant la batterie est trop important et excède une certaine valeur critique. On observe alors la création de champs d'écoulement, successivement contrarotatifs et normaux à la section de la batterie (cf. Figure 8). Ces vortex apparaissent tout d'abord dans la couche de métal supérieure de la batterie.

Ils vont alors déformer l'électrolyte. Si cette déformation est trop importante, cela peut générer un court-circuit.

Ce phénomène est d'autant plus important sachant que l'électrolyte doit être fait le plus fin possible pour limiter les effets joules et maintenir une tension de cellule raisonnable. Mais comment cette instabilité survient-elle ? Le courant traversant la batterie induit un champ magnétique qui induit lui-même des forces de Lorentz orientées vers le centre du système (supposé cylindrique) . Si cette force de Lorentz dépasse une certaine valeur, alors l'instabilité se crée. L'instabilité de Taylor est un phénomène prévisible que l'on peut aujourd'hui anticiper. Elle ne dépend pas seulement de l'intensité du courant mais également du champ magnétique induit par celui-ci que l'on note B, de la conductivité des composants de la batterie σ , de leur viscosité ν , de leur masse volumique ρ , de la perméabilité magnétique du vide μ_0 ainsi que de la géométrie de la pile, notamment du rayon de l'enceinte cylindrique R. Des études montrent que l'instabilité de Taylor a lieu si le produit du nombre d'Alven-Reynold **eq 1.** et du nombre de Lundquist **eq 2.** excède 10^3 .

eq 1. $Re_A = \nu^{-1} R v_a$ avec v_a la vitesse d'Alfven $v_a = B(\mu_0 \rho)^{-1/2}$,

eq 2. $S = \mu_0 \sigma R v_a$

Cependant, des chercheurs ont également déterminé de façon plus simple que le paramètre clé pour prévoir cette instabilité est le nombre de Hartmann **eq 3.**

eq 3. $H_A = B R(\sigma/\rho\nu)^{1/2}$ avec $B = B\phi(R)$.

En effet, si celui-ci dépasse une valeur de 25 alors l'instabilité de Taylor aura lieu. Afin de limiter cette instabilité, une des solutions serait de créer un alésage au centre de la batterie pour faire passer le courant ce qui modifierait la composante radiale du champ magnétique et donc nous éloignerait des conditions propices à la formation de l'instabilité . [\[13\]](#) [\[14\]](#) [\[15\]](#)

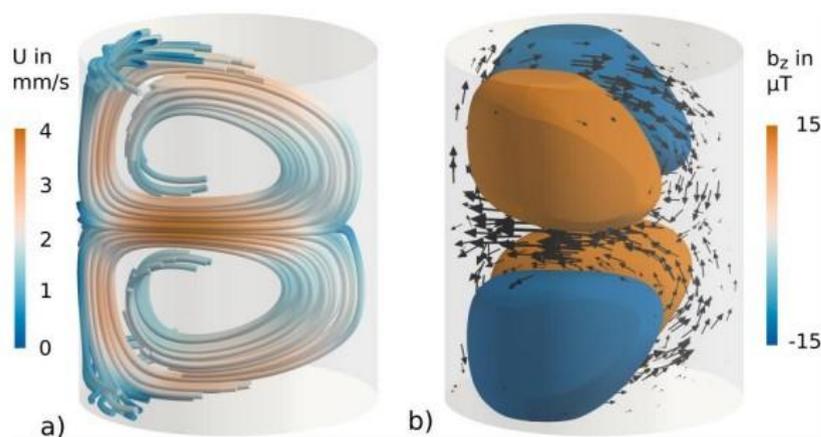


Figure 8: Vortex contrarotatifs générés par l'instabilité de Taylor

3.3.4. Convection solutale

La convection solutale est définie comme l'ensemble des mouvements internes dans un fluide qui impliquent un changement des propriétés physiques de manière non homogène.

La convection solutale apparaît au niveau de l'électrode positive d'une batterie à métaux liquides lors de sa charge. Ce phénomène entraîne des gradients de masse volumique et de concentration (distribution de la masse volumique), ainsi qu'une différence dans l'écoulement (le mouvement) des fluides. A première vue, l'intensité du phénomène de convection solutale ne dépendrait pas de la géométrie ni de la nature du mélange du fluide, mais plutôt de la concentration du mélange, de sa fraction massique et de la géométrie de la cavité dans laquelle est placé le liquide. [\[10\]](#) [\[11\]](#) [\[12\]](#)

3.4. Résultats

Ainsi, l'étude des critères choisis nous a permis de proposer une liste des couples cathode/électrode les plus prometteurs (voir tableau ci-dessous). Ces couples ont une différence d'électronégativité importante dont la majorité est supérieure à 1 ou proche de 1 ce qui prédit une tension aux bornes de la batterie relativement importante. Les couples ayant les différences d'électronégativité les plus importantes sont Ba/Pb, Li/Pb et Ca/Pb. En termes de conductivité l'aluminium, le sodium et le cadmium constituent les électrodes les plus performantes. Ainsi, les couples Ca/Al ou encore Li/Cd semblent particulièrement intéressants. Enfin, en ce qui concerne la viscosité des électrodes, le cadmium, le plomb et le mercure sont les meilleurs candidats. Ainsi certains couples, notamment, Ba/Sb et Ba/Pb qui ont des viscosités relativement élevées semblent plus intéressants pour lutter contre les instabilités.

Nous avons ensuite établi une liste de 32 électrolytes que nous avons testé pour chaque cathode/Anode. Nous avons ainsi obtenu une liste d'électrolytes pour chaque couple dans le tableau ci-dessous. Malheureusement, il est difficile de déterminer la viscosité d'un sel fondu qui est généralement une molécule polyatomique, de même pour la conductivité car elle dépend de la concentration de l'élément étudié. Cependant, pour affiner notre choix nous pouvons nous reporter sur la température de fonctionnement de la batterie. En effet, l'idéal serait une batterie nécessitant le moins de consommation possible, soit une faible température de fonctionnement, si possible à température ambiante. Nous avons ainsi repéré les électrolytes permettant une température de fonctionnement optimale de la batterie. Ainsi, parmi notre sélection, la batterie pouvant fonctionner à la plus faible température serait le triplet Na/CaBr₂/Hg avec une température de 180°C. Cependant le mercure étant hautement toxique et polluant, la batterie Li/CaBr₂/Cd ou encore Li/ CaBr₂/Pb seraient bien plus envisageables et elles pourraient fonctionner respectivement à une température de 321.07 °C et 327.5°C.

Couples	ΔX	Tmin en°C	Electrolytes possibles
Na/Hg	1.07	180	NaNO ₃ , LiNO ₃ , KNO ₃ , CaBr ₂
Na/Sb	1	725	KCl, NaCl, LiF, LiCl, Lil, NaBr, NaI, KF, KBr, KI, RbF, RbCl, RbI, MgCl ₂ , Mgl ₂ , CaCl ₂ , CaBr ₂ , Cal ₂ , SrCl ₂ , SrBr ₂ , Srl ₂ ,
Ba/Sb	1.04	725	Lil, NaI, Mgl ₂ , SrF ₂ , SrBr ₂ , Srl ₂ , BaCl ₂
Ba/Pb	1.44	725	Mgl ₂ , SrF ₂ , SrBr ₂ , Srl ₂ , BaF ₂ , BaBr ₂ , BaCl ₂ , Bal ₂
Li/Pb	1.35	327.5	KCl, NaCl, NaNO ₃ , LiNO ₃ , KNO ₃ , LiF, LiCl, Lil, NaF, NaI, KF, KBr, KI, RbF, RbCl, RbI, MgCl ₂ , Mgl ₂ , CaCl ₂ , CaBr ₂ , Cal ₂ , SrCl ₂ , SrBr ₂ , Srl ₂ , BaBr ₂ , BaCl ₂ , Bal ₂
Li/Sb	0.95	630.7 4	KCl, NaCl, LiF, LiCl, Lil, NaF, NaI, KF, KBr, KI, RbF, RbCl, RbI, MgCl ₂ , Mgl ₂ , CaCl ₂ , CaBr ₂ , Cal ₂ , SrCl ₂ , SrBr ₂ , Srl ₂ , BaBr ₂ , BaCl ₂
Li/Cd	0.71	321.0 7	NaNO ₃ , LiNO ₃ , KNO ₃ , LiCl, Lil, NaBr, NaI, KI, RbCl, RbI, MgCl ₂ , Mgl ₂ , CaBr ₂ , SrBr ₂ , Srl ₂ , Bal ₂
Ca/Sb	0.93	839	KCl, NaCl, LiF, LiCl, Lil, NaF, NaI, KF, KBr, KI, RbF, RbCl, RbI, MgCl ₂ , Mgl ₂ , CaF ₂ , CaCl ₂ , CaBr ₂ , Cal ₂ , SrF ₂ , SrCl ₂ , SrBr ₂ , Srl ₂ , BaCl ₂
Ca/ Al	0.61	839	KCl, NaCl, LiF, LiCl, NaF, KF, MgCl ₂ , Cal ₂ .
Ca/Pb	1.33	839	KCl, NaCl, LiF, LiCl, Lil, NaF, NaI, KF, KBr, KI, RbF, RbCl, RbI, MgCl ₂ , Mgl ₂ , CaF ₂ , CaCl ₂ , CaBr ₂ , Cal ₂ , SrF ₂ , SrCl ₂ , SrBr ₂ , Srl ₂ , BaF ₂ , BaBr ₂ , BaCl ₂ , Bal ₂

— Valeur la plus intéressante

— Valeur la moins intéressante

— Electrolytes permettant une température minimale de fonctionnement

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Pour conclure, ce projet nous a tout d'abord permis d'approcher une nouvelle technologie encore peu développée mais possédant un fort potentiel dans le domaine énergétique. En effet, elle pourrait-être la solution au problème du stockage des énergies renouvelables qui fait partie des enjeux de demain auxquels nous devons répondre en tant qu'ingénieurs. A l'issue de ce projet, nous avons déterminé différentes possibilités de batteries à métaux liquides envisageables et prometteuses en fonction des conditions de fonctionnement de celles-ci. Puis nous avons affiné notre sélection en fonction de critères dits "secondaires" pour déterminer les combinaisons de métaux et électrolytes les plus optimales.

On peut voir que les résultats sont variés et chaque combinaison possède des qualités différentes, ce qui rend la sélection difficile. De plus, les combinaisons obtenues sont nombreuses, sachant qu'elles n'englobent pas toutes les possibilités qui peuvent s'appliquer à cette technologie. En effet, pour simplifier la recherche, nous avons exclu les alliages de métaux pour les électrodes ou encore les liquides ioniques pour les électrolytes, qui sont des possibilités très intéressantes à étudier. Enfin, certains critères secondaires très pertinents n'ont pas pu être pris en compte dans la sélection des combinaisons car ils ne sont pas répertoriés et nécessitent donc des études expérimentales (viscosité) ou parce qu'ils dépendent de la géométrie du système (conductivité). Étant donné le nombre de paramètres à prendre en compte, on peut conclure que la batterie à métaux liquide la plus optimale serait celle ayant le meilleur équilibre entre ces différents paramètres.

Concernant la poursuite de ce projet, certains aspects allant au-delà de nos capacités comme vu précédemment, pourraient être pris en compte dans le but de proposer une batterie à métaux liquides avec une performance maximale. En effet, nous avons notamment pu faire des recherches sur deux instabilités : l'écoulement vortex et l'instabilité de Marangoni. Le vortex est un terme utilisé pour désigner un mouvement rotationnel de fluide ou de particules orienté autour d'un axe. Bien qu'il ne soit pas évident de savoir si cette instabilité peut s'appliquer aux batteries à métaux liquides non faites d'alliages de métaux pour les électrodes, elle s'est avérée très pertinente. Effectivement, lors de la décharge de la batterie, le métal de l'anode est transféré de l'électrode négative à l'électrode positive où il s'allie avec le métal de la cathode. Cet alliage étant un processus lent, une phase intermétallique solide se forme au-dessus de l'électrode positive, et diminue le potentiel de la batterie dépendant directement de la concentration à l'interface. Ainsi, des simulations numériques ont été réalisées dans le but d'étudier l'impact du mécanisme d'écoulement électro-vortex sur l'homogénéité de l'électrode positive. Les résultats ont pu montrer qu'en effet, le flux électro-vortex est suffisamment puissant pour retarder la formation de phases intermétalliques. [\[23\]](#) [\[24\]](#) [\[25\]](#)

Finalement, à titre personnel, ce travail de recherche sur les des batteries à métaux liquides nous a permis d'une part d'acquérir de nouvelles connaissances scientifiques sur de nombreux éléments chimiques, mais également sur certains phénomènes d'écoulement en mécanique des fluides grâce à l'étude des instabilités. Bien que le manque de documentation sur le sujet (particulièrement en français), ai rendu l'exercice plus difficile, ce travail de recherche nous a permis d'exploiter nos propres connaissances scientifiques pour mieux appréhender ces nouvelles notions. En effet, de nombreux aspects de notre projet sont liés à notre programme scolaire, notamment en chimie qui est la spécialité commune à tous les membres du groupe. Enfin, ce projet nous a permis de développer notre capacité à travailler en groupe, notamment sur un projet de longue durée, en mettant en valeur les capacités et compétences de chacun, tout en se répartissant les tâches en fonction des dates limites de rendu. Ce sont des compétences indispensables pour un futur ingénieur.

5. BIBLIOGRAPHIE

Crédit d'illustrations

- Figure 1: (image page de couverture) : [Liquid Metal Batteries: Past, Present, and Future](#)
- Figure 2: [Liquid Metal Batteries: Past, Present, and Future](#)
- Figure 3: [Liquid Metal Batteries: Past, Present, and Future](#)
- Figure 4: *Illustration réalisée par nos soins*
- Figure 5: *Graphique réalisé par nos soins*
- Figure 6: *Illustration réalisée par nos soins*
- Figure 7:
https://www.researchgate.net/figure/Sketch-of-a-liquid-metal-battery-with-typical-inventory-The-electrolyte-which-separates_fig1_306043495
- Figure 8:
https://www.researchgate.net/figure/Sketch-of-a-liquid-metal-battery-with-typical-inventory-The-electrolyte-which-separates_fig1_306043495

[0] Informations fournies par notre enseignant responsable

[1] lien internet : (Valide à la date du 08/06/2023)

<https://culturesciences.chimie.ens.fr/thematiques/chimie-physique/electrochimie/stockage-de-l-energie-evolution-des-batteries-12>

[2] lien internet : (Valide à la date du 08/06/2023)

<https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr/sti/files/ressources/pedagogiques/6107/6107-annexe-principe-de-fonctionnement-et-constituants-dune-batterie-ensps.pdf>

[3] lien internet : (Valide à la date du 08/06/2023)

<https://www.chargebox.fr/post/comment-fonctionne-les-batteries-de-telephone>

[4] lien internet : (Valide à la date du 08/06/2023) [Batteries à métal liquide pour le stockage des énergies renouvelables](#)

[5] lien internet : (Valide à la date du 08/06/2023) [Liquid Metal Batteries: Past, Present, and Future](#)

[6] lien internet : (Valide à la date du 08/06/2023) <https://www.go2roues.com/actualites/batterie-metal-liquide/>

[7] lien internet : (Valide à la date du 08/06/2023) <https://www.mdpi.com/2673-8392/2/4/128>

[8] lien internet : (Valide à la date du 08/06/2023)

<https://new.societechimiquedefrance.fr/wp-content/uploads/2021/07/Alloin-HD.pdf>

[9] lien internet : (Valide à la date du 08/06/2023) [Herreman et al JFM 2019.pdf \(tamu.edu\)](#)

[10] lien internet : (Valide à la date du 08/06/2023) <https://www.hzdr.de/db/Cms?pNid=226&pOid=58996>

[11] lien internet : (Valide à la date du 08/06/2023)

<https://docplayer.fr/79934803-Simulation-numerique-de-la-convection-solutale-dans-un-milieu-confine.html>

[12] lien internet : (Valide à la date du 08/06/2023) <https://arxiv.org/pdf/2202.03320.pdf>

[13] lien internet : (Valide à la date du 08/06/2023) [pdf \(iop.org\)](#)

- [14] lien internet : (Valide à la date du 08/06/2023) [The Tayler Instability - Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, HZDR](#)
- [15] lien internet : (Valide à la date du 08/06/2023) https://www.researchgate.net/publication/233898902_Numerical_simulation_of_the_Tayler_instability_in_liquid_metals
- [16] lien internet : (Valide à la date du 08/06/2023) <http://www.universalis-edu.com.ezproxy.normandie-univ.fr/encyclopedie/electrolytes/>
- [17] lien internet : (Valide à la date du 08/06/2023) <https://youtu.be/KqrRoMvVaQY>
- [18] lien internet : (Valide à la date du 08/06/2023) [\(PDF\) Thermal convection in a liquid metal battery \(researchgate.net\)](#)
- [19] lien internet : (Valide à la date du 08/06/2023) [Thermal Effects in Liquid Metal Batteries - Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, HZDR](#)
- [20] lien internet : (Valide à la date du 08/06/2023) [poster_julien_commenge.pdf \(universite-paris-saclay.fr\)](#)
- [21] David R. LIDE, " Handbook of Chemistry and Physics ", CRC Press, 83ème édition, 2002-2003.
- [22] lien internet : (Valide à la date du 09/06/2023) <https://www.elementschimiques.fr/?fr/elements/z/49>
- [23] lien internet : (Valide à la date du 16/06/2023) Ecoulement électro-vortex <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666248520300044#bib16>
- [24] lien internet : (Valide à la date du 16/06/2023) Ecoulement électro-vortex 2 <https://www.semanticscholar.org/paper/Electro-vortex-flow-vs.-buoyancy-in-liquid-metal-Herreman-B%C3%A9nard/79ca05d5d7690799e4bc0c52fdc66dd004a12706>
- [25] lien internet : (Valide à la date du 16/06/2023) Vortex et écoulement <https://foils.wordpress.com/2010/09/03/vortex-et-ecoulement/>

6. ANNEXES

Capture du tableur utilisé pour l'étude de l'électrochimie des batteries à métaux liquides

Élément	Tfus (°C)	Téb (°C)	ρ (g/cm ³)	σ (MS/m)	χ	Viscosité (Tfus)	Problème(s) majeurs : toxicité...
Li	180,54	1347	0,534	10,8	0,98	0,784	Corrosif (lésions yeux, brulure peau)
Cs	28,4	678,4	1,879	4,89	0,79	0,395	Réaction explosive avec l'eau et l'air
Rb	38,89	688	1,532	7,79	0,82	0,59	S'enflamme spontanément au contact de l'air et réagit violemment avec l'eau
K	63,65	774	0,856	13,9	0,82	0,57	OK
Ba	725	1897	3,62	10	0,89	1,752	OK mais légèrement toxique et inflammable
Sr	789	1384	2,63	7,62	0,95	2,03	OK, inflammable
Ca	839	1484	1,54	29,8	1	1,84	OK
Na	97,81	882,9	0,97	21	0,93	0,58	OK
Mg	648,8	1090	1,738	22,6	1,31	1,32	OK
Al	660,4	2467	2,7	37,7	1,61	1,235	OK
Cd	321,07	767	8,65 à 8,9	13,8	1,69	2,842	CMR +++ (toxique+cancérogène)
Sb	630,74	1750	4,6	2,88	1,93	1,48	mauvaise conductivité, corrosif
Tl	303,5	1457	4,507	6,17	1,62	2,63	Hautement toxique... mais très bonne affinité électronique
As	817	613	5,727	3,45	2,18	pas de donnée trouvée	Ok mais cancérigène + Toxique par inhalation
In	156,61	2080	7,3	11,6	1,78	1,9	OK mais toxique
Sn	231,96	2270	5,75 à 7,28	9,16	1,96	1,81	OK
Pb	327,5	1740	11,34	4,81	2,33	2,47	OK mais peut être problématique
Ga	29,78	2204	5,1	6,78	1,81	1,95	OK SUPER (bas point de fusion)
Te	449,5	987,8	127,6	200x10 ⁻⁶ (-6)	2,1	2,24	OK
Bi	271,3	1560	9,81	0,887	2,02	1,85	OK ++
Hg	-38,87	356,58	13,5939	1,04	2	2,02	Ok toxique, CMR, pollu

Electrolyte	Tfus (°C)	Téb (°C)	ρ (g/cm ³)
KCl	770	1420	1,984
NaCl	801	1465	2,16
NaNO ₃	306,5	380	1,9
LiNO ₃	253	600	1,781
KNO ₃	334	400	1,865
NaK	225	785	1,870 (at 625 K)
LiF	848,2	1676	2,635
LiCl	613	1360	2,068
LiI	469	1171	4,06
NaF	993	1704	2,558
NaBr	755	1390	3,21
NaI	660	1304	3,67
KF	858	1502	2,48
KBr	734	1435	2,75
KI	723	1325	3,13
RbF	795	1408	3,557
RbCl	718	1390	2,8 (à 25°C)
RbI	646,85	1304	3,11
MgCl ₂	712	1412	2,32
MgI ₂	637	1014	4,43
CaF ₂	1418	2533	3,18
CaCl ₂	772	1935	2,15
CaBr ₂	180	1935	3,33
CaI ₂	842	1484	1,54
SrF ₂	1477	2460	4,24
SrCl ₂	874	1250	3,052
SrBr ₂	643	2146	4,216

Électrolyte choisie	Anode/Cathode	Tmin (max (Tfus)) (°C)	Tmax (min (Téb)) (°C)	Critères Principaux		Envisagable ?	ΔX	Problème(s) majeur(s) concernant les électrodes
				Tmin < Tmax ?	Électrolyte compris entre Anode/Cathode ?			
KCl	Na / Hg	770	356,58	Non	Oui	Non		Hg : toxique, CMR et pollue
NaCl	Na / Hg	801	356,58	Non	Oui	Non		
NaNO3	Na / Hg	306,5	356,58	Oui	Oui	Oui		
LiNO3	Na / Hg	253	356,58	Oui	Oui	Oui		
KNO3	Na / Hg	334	356,58	Oui	Oui	Oui		
NaK	Na / Hg	225	356,58	Oui	Oui	Oui		
LiF	Na / Hg	848,2	356,58	Non	Oui	Non		
LiCl	Na / Hg	613	356,58	Non	Oui	Non		
LiI	Na / Hg	469	356,58	Non	Oui	Non		
NaF	Na / Hg	993	356,58	Non	Oui	Non		
NaBr	Na / Hg	755	356,58	Non	Oui	Non		
NaI	Na / Hg	660	356,58	Non	Oui	Non		
KF	Na / Hg	858	356,58	Non	Oui	Non		
KBr	Na / Hg	734	356,58	Non	Oui	Non		
KI	Na / Hg	723	356,58	Non	Oui	Non		
RbF	Na / Hg	795	356,58	Non	Oui	Non		
RbCl	Na / Hg	718	356,58	Non	Oui	Non		
RbI	Na / Hg	646,85	356,58	Non	Oui	Non		
MgCl2	Na / Hg	712	356,58	Non	Oui	Non		
MgI2	Na / Hg	637	356,58	Non	Oui	Non		
CaF2	Na / Hg	1418	356,58	Non	Oui	Non		
CaCl2	Na / Hg	772	356,58	Non	Oui	Non		
CaBr2	Na / Hg	180	356,58	Oui	Oui	Oui		
CaI2	Na / Hg	842	356,58	Non	Oui	Non		
SrF2	Na / Hg	1477	356,58	Non	Oui	Non		
SrCl2	Na / Hg	874	356,58	Non	Oui	Non		
SrBr2	Na / Hg	643	356,58	Non	Oui	Non		
SrI2	Na / Hg	538	356,58	Non	Oui	Non		
BaF2	Na / Hg	1368	356,58	Non	Oui	Non		
BaCl2	Na / Hg	960	356,58	Non	Oui	Non		
BaBr2	Na / Hg	857	356,58	Non	Oui	Non		
BaI2	Na / Hg	711	356,58	Non	Oui	Non		
KCl	Ca/Al	839	1420	Oui	Oui	Oui	0,61	OK
NaCl	Ca/Al	839	1465	Oui	Oui	Oui	0,61	
NaNO3	Ca/Al	839	380	Non	Oui	Non		
LiNO3	Ca/Al	839	600	Non	Oui	Non		
KNO3	Ca/Al	839	400	Non	Oui	Non		
NaK	Ca/Al	839	785	Non	Oui	Non		
LiF	Ca/Al	848,2	1484	Oui	Oui	Oui	0,61	
LiCl	Ca/Al	839	1360	Oui	Oui	Oui	0,61	
LiI	Ca/Al	839	1171	Oui	Non	Non		
NaF	Ca/Al	993	1484	Oui	Oui	Oui	0,61	
NaBr	Ca/Al	839	1390	Oui	Non	Non		
NaI	Ca/Al	839	1304	Oui	Non	Non		
KF	Ca/Al	858	1484	Oui	Oui	Oui	0,61	
KBr	Ca/Al	839	1435	Oui	Non	Non		
KI	Ca/Al	839	1325	Oui	Non	Non		
RbF	Ca/Al	839	1408	Oui	Non	Non		
RbCl	Ca/Al	839	1390	Oui	Non	Non		
RbI	Ca/Al	839	1304	Oui	Non	Non		
MgCl2	Ca/Al	839	1412	Oui	Oui	Oui	0,61	
MgI2	Ca/Al	839	1014	Oui	Non	Non		
CaF2	Ca/Al	1418	1484	Oui	Non	Non		
CaCl2	Ca/Al	839	1484	Oui	Oui	Oui	0,61	
CaBr2	Ca/Al	839	1484	Oui	Non	Non		
CaI2	Ca/Al	842	1484	Oui	Oui	Oui	0,61	
SrF2	Ca/Al	1477	1484	Oui	Non	Non		
SrCl2	Ca/Al	874	1250	Oui	Non	Non		
SrBr2	Ca/Al	839	1484	Oui	Non	Non		
SrI2	Ca/Al	839	1484	Oui	Non	Non		
BaF2	Ca/Al	1368	1484	Oui	Non	Non		
BaCl2	Ca/Al	960	1484	Oui	Non	Non		
BaBr2	Ca/Al	857	1484	Oui	Non	Non		
BaI2	Ca/Al	839	1484	Oui	Non	Non		

KCl	Li/Cd	770	767	Non	Oui	Non		Cd : très toxique et CMR Li : Corrosif
NaCl	Li/Cd	801	678,4	Non	Oui	Non		
NaNO3	Li/Cd	321,07	688	Oui	Oui	Oui	0,71	
LiNO3	Li/Cd	321,07	767	Oui	Oui	Oui	0,71	
KNO3	Li/Cd	334	767	Oui	Oui	Oui	0,71	
NaK	Li/Cd	321,07	767	Oui	Oui	Oui	0,71	
LiF	Li/Cd	848,2	767	Non	Oui	Non		
LiCl	Li/Cd	613	767	Oui	Oui	Oui	0,71	
LiI	Li/Cd	469	767	Oui	Oui	Oui	0,71	
NaF	Li/Cd	993	767	Non	Oui	Non		
NaBr	Li/Cd	755	767	Oui	Oui	Oui	0,71	
NaI	Li/Cd	660	767	Oui	Oui	Oui	0,71	
KF	Li/Cd	858	767	Non	Oui	Non		
KBr	Li/Cd	734	613	Non	Oui	Non		
KI	Li/Cd	723	767	Oui	Oui	Oui	0,71	
RbF	Li/Cd	795	767	Non	Oui	Non		
RbCl	Li/Cd	718	767	Oui	Oui	Oui	0,71	
RbI	Li/Cd	646,85	767	Oui	Oui	Oui	0,71	
MgCl2	Li/Cd	712	767	Oui	Oui	Oui	0,71	
MgI2	Li/Cd	637	767	Oui	Oui	Oui	0,71	
CaF2	Li/Cd	1418	356,58	Non	Oui	Non		
CaCl2	Li/Cd	772	767	Non	Oui	Non		
CaBr2	Li/Cd	321,07	767	Oui	Oui	Oui	0,71	
CaI2	Li/Cd	842	767	Non	Oui	Non		
SrF2	Li/Cd	1477	767	Non	Oui	Non		
SrCl2	Li/Cd	874	767	Non	Oui	Non		
SrBr2	Li/Cd	643	767	Oui	Oui	Oui	0,71	
SrI2	Li/Cd	538	767	Oui	Oui	Oui	0,71	
BaF2	Li/Cd	1368	767	Non	Oui	Non		
BaCl2	Li/Cd	960	767	Non	Oui	Non		
BaBr2	Li/Cd	857	767	Non	Oui	Non		
BaI2	Li/Cd	711	767	Oui	Oui	Oui	0,71	
KCl	Li/Pb	770	1347	Oui	Oui	Oui	1,35	Li : Corrosif Pb : Ok
NaCl	Li/Pb	801	1347	Oui	Oui	Oui	1,35	
NaNO3	Li/Pb	327,5	380	Oui	Oui	Oui	1,35	
LiNO3	Li/Pb	327,5	600	Oui	Oui	Oui	1,35	
KNO3	Li/Pb	334	400	Oui	Oui	Oui	1,35	
NaK	Li/Pb	327,5	785	Oui	Oui	Oui	1,35	
LiF	Li/Pb	848,2	1347	Oui	Oui	Oui	1,35	
LiCl	Li/Pb	613	1347	Oui	Oui	Oui	1,35	
LiI	Li/Pb	469	1171	Oui	Oui	Oui	1,35	
NaF	Li/Pb	993	1347	Oui	Oui	Oui	1,35	
NaBr	Li/Pb	755	1347	Oui	Oui	Oui	1,35	
NaI	Li/Pb	660	1304	Oui	Oui	Oui	1,35	
KF	Li/Pb	858	1347	Oui	Oui	Oui	1,35	
KBr	Li/Pb	734	1347	Oui	Oui	Oui	1,35	
KI	Li/Pb	723	1325	Oui	Oui	Oui	1,35	
RbF	Li/Pb	795	1347	Oui	Oui	Oui	1,35	
RbCl	Li/Pb	718	1347	Oui	Oui	Oui	1,35	
RbI	Li/Pb	646,85	1304	Oui	Oui	Oui	1,35	
MgCl2	Li/Pb	712	1347	Oui	Oui	Oui	1,35	
MgI2	Li/Pb	637	1014	Oui	Oui	Oui	1,35	
CaF2	Li/Pb	1418	1347	Non	Oui	Non		
CaCl2	Li/Pb	772	1347	Oui	Oui	Oui	1,35	
CaBr2	Li/Pb	327,5	1347	Oui	Oui	Oui	1,35	
CaI2	Li/Pb	842	1347	Oui	Oui	Oui	1,35	
SrF2	Li/Pb	1477	1347	Non	Oui	Non		
SrCl2	Li/Pb	874	1250	Oui	Oui	Oui	1,35	
SrBr2	Li/Pb	643	1347	Oui	Oui	Oui	1,35	
SrI2	Li/Pb	538	1347	Oui	Oui	Oui	1,35	
BaF2	Li/Pb	1368	1347	Non	Oui	Non		
BaCl2	Li/Pb	960	1347	Oui	Oui	Oui	1,35	
BaBr2	Li/Pb	857	1347	Oui	Oui	Oui	1,35	
BaI2	Li/Pb	711	1347	Oui	Oui	Oui	1,35	

KCl	Ca/Pb	839	1420	Oui	Oui	Oui	1,33	Ok
NaCl	Ca/Pb	839	1465	Oui	Oui	Oui	1,33	
NaNO3	Ca/Pb	839	380	Non	Oui	Non		
LiNO3	Ca/Pb	839	600	Non	Oui	Non		
KNO3	Ca/Pb	839	400	Non	Oui	Non		
NaK	Ca/Pb	839	785	Non	Oui	Non		
LiF	Ca/Pb	848,2	1484	Oui	Oui	Oui	1,33	
LiCl	Ca/Pb	839	1360	Oui	Oui	Oui	1,33	
LiI	Ca/Pb	839	1171	Oui	Oui	Oui	1,33	
NaF	Ca/Pb	993	1484	Oui	Oui	Oui	1,33	
NaBr	Ca/Pb	839	1390	Oui	Oui	Oui	1,33	
NaI	Ca/Pb	839	1304	Oui	Oui	Oui	1,33	
KF	Ca/Pb	858	1484	Oui	Oui	Oui	1,33	
KBr	Ca/Pb	839	1435	Oui	Oui	Oui	1,33	
KI	Ca/Pb	839	1325	Oui	Oui	Oui	1,33	
RbF	Ca/Pb	839	1408	Oui	Oui	Oui	1,33	
RbCl	Ca/Pb	839	1390	Oui	Oui	Oui	1,33	
RbI	Ca/Pb	839	1304	Oui	Oui	Oui	1,33	
MgCl2	Ca/Pb	839	1412	Oui	Oui	Oui	1,33	
MgI2	Ca/Pb	839	1014	Oui	Oui	Oui	1,33	
CaF2	Ca/Pb	1418	1484	Oui	Oui	Oui		
CaCl2	Ca/Pb	839	1484	Oui	Oui	Oui	1,33	
CaBr2	Ca/Pb	839	1484	Oui	Oui	Oui	1,33	
CaI2	Ca/Pb	842	1484	Oui	Oui	Oui	1,33	
SrF2	Ca/Pb	1477	1484	Oui	Oui	Oui	1,33	
SrCl2	Ca/Pb	874	1250	Oui	Oui	Oui	1,33	
SrBr2	Ca/Pb	839	1484	Oui	Oui	Oui	1,33	
SrI2	Ca/Pb	839	1484	Oui	Oui	Oui	1,33	
BaF2	Ca/Pb	1368	1484	Oui	Oui	Oui	1,33	
BaCl2	Ca/Pb	960	1484	Oui	Oui	Oui	1,33	
BaBr2	Ca/Pb	857	1484	Oui	Oui	Oui	1,33	
BaI2	Ca/Pb	839	1484	Oui	Oui	Oui	1,33	
KCl	Ca/Sb	839	1420	Oui	Oui	Oui	0,93	mauvaise conductivité Ca : Ok
NaCl	Ca/Sb	839	1465	Oui	Oui	Oui	0,93	
NaNO3	Ca/Sb	839	380	Non	Oui	Non		
LiNO3	Ca/Sb	839	600	Non	Oui	Non		
KNO3	Ca/Sb	839	400	Non	Oui	Non		
NaK	Ca/Sb	839	785	Non	Oui	Non		
LiF	Ca/Sb	848,2	1484	Oui	Oui	Oui	0,93	
LiCl	Ca/Sb	839	1360	Oui	Oui	Oui	0,93	
LiI	Ca/Sb	839	1171	Oui	Oui	Oui	0,93	
NaF	Ca/Sb	993	1484	Oui	Oui	Oui	0,93	
NaBr	Ca/Sb	839	1390	Oui	Oui	Oui	0,93	
NaI	Ca/Sb	839	1304	Oui	Oui	Oui	0,93	
KF	Ca/Sb	858	1484	Oui	Oui	Oui	0,93	
KBr	Ca/Sb	839	1435	Oui	Oui	Oui	0,93	
KI	Ca/Sb	839	1325	Oui	Oui	Oui	0,93	
RbF	Ca/Sb	839	1408	Oui	Oui	Oui	0,93	
RbCl	Ca/Sb	839	1390	Oui	Oui	Oui	0,93	
RbI	Ca/Sb	839	1304	Oui	Oui	Oui	0,93	
MgCl2	Ca/Sb	839	1412	Oui	Oui	Oui	0,93	
MgI2	Ca/Sb	839	1014	Oui	Oui	Oui	0,93	
CaF2	Ca/Sb	1418	1484	Oui	Oui	Oui		
CaCl2	Ca/Sb	839	1484	Oui	Oui	Oui	0,93	
CaBr2	Ca/Sb	839	1484	Oui	Oui	Oui	0,93	
CaI2	Ca/Sb	842	1484	Oui	Oui	Oui	0,93	
SrF2	Ca/Sb	1477	1484	Oui	Oui	Oui	0,93	
SrCl2	Ca/Sb	874	1250	Oui	Oui	Oui	0,93	
SrBr2	Ca/Sb	839	1484	Oui	Oui	Oui	0,93	
SrI2	Ca/Sb	839	1484	Oui	Oui	Oui	0,93	
BaF2	Ca/Sb	1368	1484	Oui	Non	Non		
BaCl2	Ca/Sb	960	1484	Oui	Oui	Oui	0,93	
BaBr2	Ca/Sb	857	1484	Oui	Non	Non		
BaI2	Ca/Sb	839	1484	Oui	Non	Non		

KCl	Ba/Pb	770	1420	Oui	Non	Non	
NaCl	Ba/Pb	801	1465	Oui	Non	Non	
NaNO3	Ba/Pb	725	380	Non	Non	Non	
LiNO3	Ba/Pb	725	600	Non	Non	Non	
KNO3	Ba/Pb	725	400	Non	Non	Non	
NaK	Ba/Pb	725	785	Oui	Non	Non	
LiF	Ba/Pb	848,2	1676	Oui	Non	Non	
LiCl	Ba/Pb	725	1360	Oui	Non	Non	
LiI	Ba/Pb	725	1171	Oui	Non	Non	
NaF	Ba/Pb	993	1704	Oui	Non	Non	
NaBr	Ba/Pb	755	1390	Oui	Non	Non	
NaI	Ba/Pb	725	1304	Oui	Non	Non	
KF	Ba/Pb	858	1502	Oui	Non	Non	
KBr	Ba/Pb	734	1435	Oui	Non	Non	
KI	Ba/Pb	725	1325	Oui	Non	Non	
RbF	Ba/Pb	795	1408	Oui	Non	Non	
RbCl	Ba/Pb	725	1390	Oui	Non	Non	
RbI	Ba/Pb	725	1304	Oui	Non	Non	
MgCl2	Ba/Pb	725	1412	Oui	Non	Non	
MgI2	Ba/Pb	725	1014	Oui	Oui	Oui	1,44
CaF2	Ba/Pb	1418	1740	Oui	Non	Non	
CaCl2	Ba/Pb	772	1740	Oui	Non	Non	
CaBr2	Ba/Pb	725	1740	Oui	Non	Non	
CaI2	Ba/Pb	842	1484	Oui	Non	Non	
SrF2	Ba/Pb	1477	1740	Oui	Oui	Oui	1,44
SrCl2	Ba/Pb	874	1250	Oui	Non	Non	
SrBr2	Ba/Pb	725	1740	Oui	Oui	Oui	1,44
SrI2	Ba/Pb	725	1740	Oui	Oui	Oui	1,44
BaF2	Ba/Pb	1368	1740	Oui	Oui	Oui	1,44
BaCl2	Ba/Pb	960	1560	Oui	Oui	Oui	1,44
BaBr2	Ba/Pb	857	1740	Oui	Oui	Oui	1,44
BaI2	Ba/Pb	725	1740	Oui	Oui	Oui	1,44
légèrement toxique Pb : Ok							
KCl	Ba/Sb	770	1420	Oui	Non	Non	
NaCl	Ba/Sb	801	1465	Oui	Non	Non	
NaNO3	Ba/Sb	725	380	Non	Non	Non	
LiNO3	Ba/Sb	725	600	Non	Non	Non	
KNO3	Ba/Sb	725	400	Non	Non	Non	
NaK	Ba/Sb	725	785	Oui	Non	Non	
LiF	Ba/Sb	848,2	1676	Oui	Non	Non	
LiCl	Ba/Sb	725	1360	Oui	Non	Non	
LiI	Ba/Sb	725	1171	Oui	Oui	Oui	1,04
NaF	Ba/Sb	993	1704	Oui	Non	Non	
NaBr	Ba/Sb	755	1390	Oui	Non	Non	
NaI	Ba/Sb	725	1304	Oui	Oui	Oui	1,04
KF	Ba/Sb	858	1502	Oui	Non	Non	
KBr	Ba/Sb	734	1435	Oui	Non	Non	
KI	Ba/Sb	725	1325	Oui	Non	Non	
RbF	Ba/Sb	795	1408	Oui	Non	Non	
RbCl	Ba/Sb	725	1390	Oui	Non	Non	
RbI	Ba/Sb	725	1304	Oui	Non	Non	
MgCl2	Ba/Sb	725	1412	Oui	Non	Non	
MgI2	Ba/Sb	725	1014	Oui	Oui	Oui	1,04
CaF2	Ba/Sb	1418	1740	Oui	Non	Non	
CaCl2	Ba/Sb	772	1740	Oui	Non	Non	
CaBr2	Ba/Sb	725	1740	Oui	Non	Non	
CaI2	Ba/Sb	842	1484	Oui	Non	Non	
SrF2	Ba/Sb	1477	1740	Oui	Oui	Oui	1,04
SrCl2	Ba/Sb	874	1250	Oui	Non	Non	
SrBr2	Ba/Sb	725	1740	Oui	Oui	Oui	1,04
SrI2	Ba/Sb	725	1740	Oui	Oui	Oui	1,04
BaF2	Ba/Sb	1368	1740	Oui	Non	Non	
BaCl2	Ba/Sb	960	1560	Oui	Oui	Oui	1,04
BaBr2	Ba/Sb	857	1740	Oui	Non	Non	
BaI2	Ba/Sb	725	1740	Oui	Non	Non	
légèrement toxique Sb : mauvaise conductivité							

KCl	Li/Sb	770	1347	Oui	Oui	Oui	0,95	uvaise conductivité Li : Corrosif
NaCl	Li/Sb	801	1347	Oui	Oui	Oui	0,95	
NaNO3	Li/Sb	630,74	380	Non	Oui	Non		
LiNO3	Li/Sb	630,74	600	Non	Oui	Non		
KNO3	Li/Sb	630,74	400	Non	Oui	Non		
NaK	Li/Sb	630,74	785	Oui	Oui	Oui	0,95	
LiF	Li/Sb	848,2	1347	Oui	Oui	Oui	0,95	
LiCl	Li/Sb	630,74	1347	Oui	Oui	Oui	0,95	
LiI	Li/Sb	630,74	1171	Oui	Oui	Oui	0,95	
NaF	Li/Sb	993	1347	Oui	Oui	Oui	0,95	
NaBr	Li/Sb	755	1347	Oui	Oui	Oui	0,95	
NaI	Li/Sb	660	1304	Oui	Oui	Oui	0,95	
KF	Li/Sb	858	1347	Oui	Oui	Oui	0,95	
KBr	Li/Sb	734	1347	Oui	Oui	Oui	0,95	
KI	Li/Sb	723	1325	Oui	Oui	Oui	0,95	
RbF	Li/Sb	795	1347	Oui	Oui	Oui	0,95	
RbCl	Li/Sb	718	1347	Oui	Oui	Oui	0,95	
RbI	Li/Sb	646,85	1304	Oui	Oui	Oui	0,95	
MgCl2	Li/Sb	712	1347	Oui	Oui	Oui	0,95	
MgI2	Li/Sb	637	1014	Oui	Oui	Oui	0,95	
CaF2	Li/Sb	1418	1347	Non	Oui	Non		
CaCl2	Li/Sb	772	1347	Oui	Oui	Oui	0,95	
CaBr2	Li/Sb	630,74	1347	Oui	Oui	Oui	0,95	
CaI2	Li/Sb	842	1347	Oui	Oui	Oui	0,95	
SrF2	Li/Sb	1477	1347	Non	Oui	Non		
SrCl2	Li/Sb	874	1250	Oui	Oui	Oui	0,95	
SrBr2	Li/Sb	643	1347	Oui	Oui	Oui	0,95	
SrI2	Li/Sb	630,74	1347	Oui	Oui	Oui	0,95	
BaF2	Li/Sb	1368	1347	Non	Non	Non		
BaCl2	Li/Sb	960	1347	Oui	Oui	Oui	0,95	
BaBr2	Li/Sb	857	1347	Oui	Non	Non		
BaI2	Li/Sb	711	1347	Oui	Non	Non		
KCl	Na/Sb	770	882,9	Oui	Oui	Oui	1	uvaise conductivité Na : Ok
NaCl	Na/Sb	801	882,9	Oui	Oui	Oui	1	
NaNO3	Na/Sb	630,74	380	Non	Oui	Non	1	
LiNO3	Na/Sb	630,74	600	Non	Oui	Non	1	
KNO3	Na/Sb	630,74	400	Non	Oui	Non	1	
NaK	Na/Sb	630,74	785	Oui	Oui	Oui	1	
LiF	Na/Sb	848,2	882,9	Oui	Oui	Oui	1	
LiCl	Na/Sb	630,74	882,9	Oui	Oui	Oui	1	
LiI	Na/Sb	630,74	882,9	Oui	Oui	Oui	1	
NaF	Na/Sb	993	882,9	Non	Oui	Non		
NaBr	Na/Sb	755	882,9	Oui	Oui	Oui	1	
NaI	Na/Sb	660	882,9	Oui	Oui	Oui	1	
KF	Na/Sb	858	882,9	Oui	Oui	Oui	1	
KBr	Na/Sb	734	882,9	Oui	Oui	Oui	1	
KI	Na/Sb	723	882,9	Oui	Oui	Oui	1	
RbF	Na/Sb	795	882,9	Oui	Oui	Oui	1	
RbCl	Na/Sb	718	882,9	Oui	Oui	Oui	1	
RbI	Na/Sb	646,85	882,9	Oui	Oui	Oui	1	
MgCl2	Na/Sb	712	882,9	Oui	Oui	Oui	1	
MgI2	Na/Sb	637	882,9	Oui	Oui	Oui	1	
CaF2	Na/Sb	1418	882,9	Non	Oui	Non		
CaCl2	Na/Sb	772	882,9	Oui	Oui	Oui	1	
CaBr2	Na/Sb	630,74	882,9	Oui	Oui	Oui	1	
CaI2	Na/Sb	842	882,9	Oui	Oui	Oui	1	
SrF2	Na/Sb	1477	882,9	Non	Oui	Non		
SrCl2	Na/Sb	874	882,9	Oui	Oui	Oui	1	
SrBr2	Na/Sb	643	882,9	Oui	Oui	Oui	1	
SrI2	Na/Sb	630,74	882,9	Oui	Oui	Oui	1	
BaF2	Na/Sb	1368	882,9	Non	Non	Non		
BaCl2	Na/Sb	960	882,9	Non	Oui	Non		
BaBr2	Na/Sb	857	882,9	Oui	Non	Non		
BaI2	Na/Sb	711	882,9	Oui	Non	Non		