

Optimisation des procédés de dessalement par congélation : Une Approche Expérimentale

Nardjess BAHBAH ^{#1}, Besma ALOUACHE ^{*2}, Hassiba ZEMMOURI ^{#3},
Mohamed DEGHILOUM ^{**4}

^{#1}Département de physique, ^{#3}Département de génie des procédés

[#]Ecole Nationale Supérieure des Technologies Avancées (ENSTA),

BP 474, Place des Martyrs, Bab El Oued, 16001-Alger, ALGERIE

^{*}Département de physique

nardjess.bahbah@ensta.edu.dz

hassiba.zemmouri@ensta.edu.dz

^{*}Université des sciences et de la technologie Houari-Boumediène (USTHB),

BP 32 Bab Ezzouar, 16111 - Alger, ALGERIE

balouache@usthb.dz

^{**}Direction Centrale Recherche & Développement

Boulevard 1er Novembre, 35000-Boumerdes, ALGERIE

deghiloum.mohamed@sonatrach.dz

Résumé — Le dessalement par congélation constitue une alternative durable et prometteuse aux méthodes conventionnelles de traitement de l'eau de mer. Ce procédé repose sur la formation sélective de glace à partir d'eau salée, la glace étant pratiquement exempte de sels dissous. Cependant, la maîtrise des conditions opératoires reste un défi, notamment en ce qui concerne la pureté de la glace produite, le rendement énergétique et la faisabilité à grande échelle. Le présent travail propose une optimisation du procédé de dessalement par congélation à travers une double approche expérimentale et de modélisation. Une série d'expériences paramétriques a été réalisée en faisant varier la température, le taux de refroidissement et la concentration saline. Parallèlement, un modèle thermodynamique et cinétique est en cours de développement pour prédire les conditions optimales de cristallisation. L'approche expérimentale combinée à la modélisation thermodynamique permet de mieux comprendre les mécanismes de séparation eau/sel lors de la formation de glace. Ces avancées offrent une base solide pour optimiser le procédé de dessalement par congélation et renforcer sa compétitivité face aux méthodes conventionnelles, favorisant ainsi l'industrialisation de cette technique en réduisant les coûts énergétiques et environnementaux.

Mots-clés — dessalement, congélation, eau de mer, pureté de la glace, séparation eau/sel, cristallisation, salinité.

I. INTRODUCTION

La raréfaction des ressources en eau douce constitue l'un des défis les plus préoccupants du XXI^e siècle. Ce phénomène, accentué par la croissance démographique, le changement climatique et la surexploitation des nappes phréatiques, touche particulièrement les régions arides, les zones côtières densément peuplées et les territoires insulaires. Dans ces contextes, l'accès à une eau potable de qualité devient une priorité stratégique, tant sur le plan sanitaire qu'économique. Le dessalement de l'eau de mer apparaît alors comme une solution incontournable pour répondre à la demande croissante et garantir la sécurité hydrique à long terme [1].

Parmi les technologies actuellement disponibles, les plus répandues sont l'osmose inverse et l'électrodialyse. Bien qu'efficaces, ces méthodes présentent de nombreuses limitations : elles nécessitent une consommation énergétique importante, engendrent des coûts d'exploitation élevés, et produisent des rejets salins concentrés ayant un impact écologique notable sur les milieux aquatiques [2]. Ces contraintes techniques et environnementales soulignent l'urgence de développer des procédés alternatifs, plus économes en énergie et respectueux de l'environnement.

Le dessalement par congélation représente justement une voie prometteuse. Ce procédé repose sur un principe physique simple : lors de la congélation de l'eau salée, les molécules d'eau s'organisent en un réseau cristallin de glace pure, tandis que les ions dissous, tels que le sodium et le chlorure, sont majoritairement exclus du

réseau et concentrés dans la saumure résiduelle [3]. Parmi les avantages notables de cette méthode figurent sa faible consommation énergétique à basse température, l'absence d'additifs chimiques, et la possibilité de produire une eau très pure après séparation et lavage de la glace.

Plusieurs études se sont penchées sur le potentiel de ce procédé. Les travaux de [3] et [4] ont montré que la qualité de la glace obtenue dépend fortement des conditions de congélation. Cependant, malgré ces avancées, le procédé reste peu maîtrisé à l'échelle industrielle [5]. En particulier, les effets combinés de la température de congélation, de la vitesse de refroidissement, et de la concentration saline initiale sur l'efficacité du dessalement restent mal documentés. Peu d'études paramétriques systématiques ont été menées pour établir les conditions optimales de fonctionnement.

C'est dans ce contexte que s'inscrit la présente recherche. L'objectif principal est de déterminer les conditions opératoires idéales permettant de maximiser la pureté de la glace formée et, par conséquent, l'efficacité globale du dessalement par congélation. Nous faisons l'hypothèse que des conditions de congélation modérées (température douce et vitesse de refroidissement contrôlée) favorisent la croissance de cristaux de grande taille, facilitant la ségrégation des sels.

Pour répondre à cet objectif, une approche expérimentale rigoureuse a été adoptée. Des essais de congélation sont réalisés sur des solutions salines simulées, en faisant varier de manière systématique la température, la durée de congélation, la concentration saline initiale, et l'agitation du milieu. Les propriétés de la glace obtenue sont ensuite analysées (pureté, conductivité), afin d'identifier les paramètres les plus influents.

Cette étude vise ainsi à combler une lacune importante dans la littérature scientifique en apportant des données expérimentales nouvelles et en proposant un cadre d'analyse thermodynamique et cinétique des phénomènes observés. À terme, les résultats obtenus pourraient contribuer à améliorer la viabilité technique et économique du dessalement par congélation, ouvrant la voie à des applications à plus grande échelle. Cette innovation technologique s'inscrit pleinement dans les efforts actuels pour promouvoir des solutions durables face aux défis mondiaux liés à l'eau.

II. MATÉRIEL ET MÉTHODES

A. Matériel expérimental

L'étude expérimentale a été menée à l'aide d'un dispositif simple mais rigoureux, conçu pour reproduire le procédé de dessalement par congélation dans des conditions contrôlées. Le matériel utilisé comprend:

- Des béchers gradués en verre borosilicaté (100 à 500 mL) pour contenir les solutions salines.
- Un bain réfrigérant à base de glace pilée et de sel, permettant d'atteindre et de maintenir des températures inférieures à 0 °C (jusqu'à -18 °C).
- Un thermomètre à lecture rapide (plage -20 °C à 50 °C) pour le suivi de la température.
- Une balance de précision ($\pm 0,01$ g) pour les mesures de masse avant et après congélation.
- Un conductimètre calibré pour la mesure de la salinité initiale et finale des solutions.
- Du matériel de séparation : papier filtre, tamis fin ou coton pour l'extraction de la glace.
- Un agitateur magnétique ou une tige en verre pour assurer une homogénéité dans les échantillons.

Les solutions utilisées sont préparées à partir d'eau distillée et de chlorure de sodium (NaCl) pur, avec des concentrations ajustées pour simuler différents niveaux de salinité, notamment celle de l'eau de mer (environ 35 g/L).

B. Méthodologie expérimentale

Des échantillons d'eau salée synthétique sont préparés en dissolvant du NaCl dans de l'eau distillée, à des concentrations de 2 %, 3,5 % et 5 %. La salinité de chaque solution est mesurée à l'aide d'un conductimètre afin d'établir les valeurs initiales de référence. Chaque solution est ensuite versée dans des béchers de 100 mL. Les échantillons sont soumis à des cycles de congélation à différentes températures contrôlées (-5 °C, -10 °C, -18 °C) et pour des durées variables (1h, 2h, 4h). La vitesse de congélation est modulée en jouant sur l'intensité du refroidissement, via l'ajustement du flux thermique ou la modification du bain de glace. Certaines séries d'échantillons sont également soumises à une agitation légère afin d'étudier l'impact de l'agitation sur la cristallisation de la glace.

Une fois la congélation partiellement achevée, la glace formée est extraite avec précaution par décantation, filtration à froid ou rinçage rapide à l'eau distillée pour éliminer les résidus de saumure. La glace ainsi isolée est ensuite fondue à température ambiante. La conductivité électrique de l'eau issue de la fonte est mesurée afin d'évaluer sa salinité résiduelle. Des tests ioniques complémentaires peuvent être réalisés pour quantifier plus finement la concentration en ions Na^+ et Cl^- . L'efficacité du dessalement est calculée selon la réduction de salinité observée entre la solution initiale et l'eau fondue.

Chaque expérience est répétée au moins trois fois pour garantir la reproductibilité des résultats. Une attention particulière est portée à la standardisation des conditions expérimentales, afin de limiter les biais et de confirmer la fiabilité des données recueillies.

III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les différentes séries d'essais ont permis de mettre en évidence l'influence de plusieurs paramètres clés sur la qualité de la glace obtenue et, par conséquent, sur l'efficacité du dessalement par congélation, notamment la température de congélation, la vitesse de refroidissement, et la salinité initiale des solutions.

A. Effet de la température (Fig.1)

Les résultats montrent que des températures modérées, autour de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, favorisent la formation de cristaux de glace de grande taille, ce qui permet une meilleure exclusion des ions salins de la matrice cristalline. La glace ainsi obtenue présente une faible conductivité, traduisant une faible teneur en sel et donc une efficacité de dessalement relativement élevée.

En revanche, lorsque la température de congélation est abaissée au-delà de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, le processus de solidification devient plus rapide. Il en résulte la formation de cristaux plus petits, piégeant une quantité plus importante de saumure. Cette congélation rapide limite donc la séparation efficace des sels, et la glace fondue présente une salinité plus élevée.

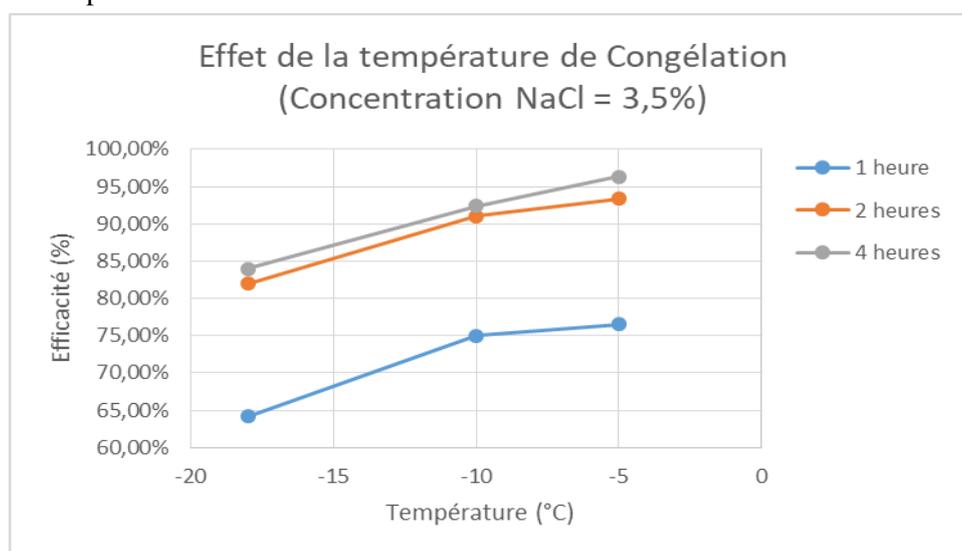


Fig.1 Effet de la température sur l'efficacité de dessalement

B. Influence de la vitesse de congélation (Fig.2)

L'étude met également en évidence l'importance de la vitesse de congélation dans le contrôle de la pureté de la glace. Un refroidissement progressif (4h) permet une croissance ordonnée des cristaux, favorisant l'exclusion des ions vers la phase liquide résiduelle. À l'inverse, un refroidissement trop brusque (1h), compromet cette séparation. Une vitesse modérée apparaît donc optimale pour maximiser l'efficacité du processus.

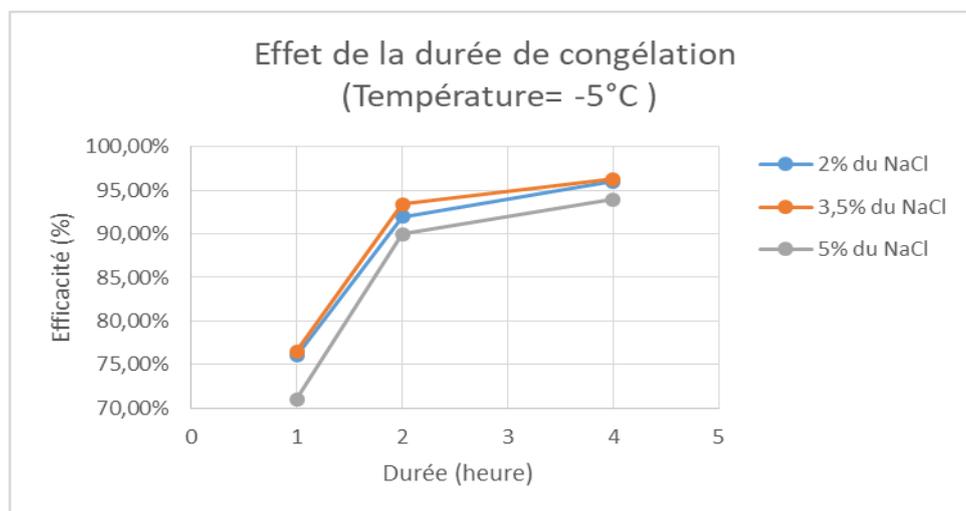


Fig.2 Effet de de la vitesse de congélation sur l'efficacité de dessalement

C. Impact de la salinité initiale (Fig.3)

L'augmentation de la concentration initiale en sel, jusqu'à environ 40 g/L, tend à améliorer le contraste de répartition entre la glace et la saumure, rendant la séparation plus marquée. Toutefois, au-delà de cette concentration, une saturation du système est observée, avec une diminution progressive de la pureté de la glace obtenue. Ce phénomène s'explique par la limitation de la diffusion des ions lors de la formation rapide de la matrice cristalline.

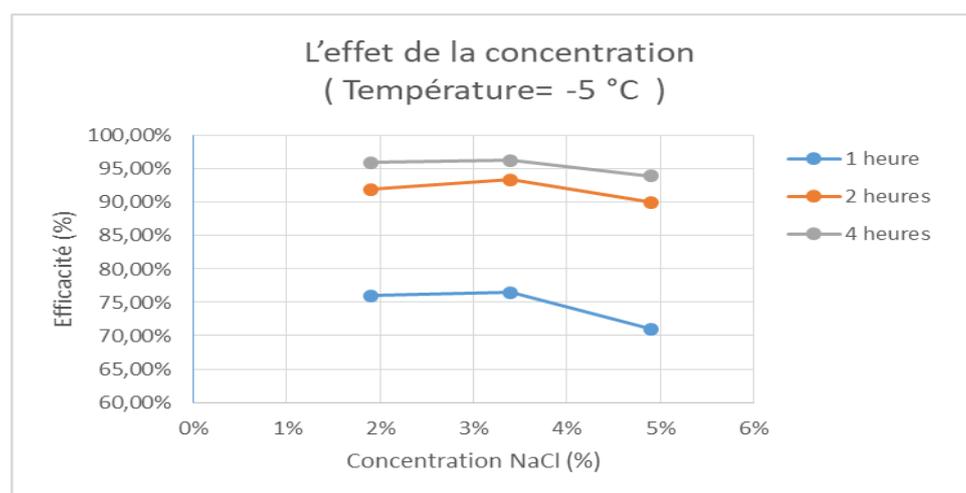


Fig.3 Effet de la salinité initiale sur l'efficacité de dessalement

IV. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude expérimentale a permis de confirmer l'efficacité du procédé de dessalement par congélation comme méthode alternative pour la production d'eau douce à partir de solutions salines. Les résultats obtenus mettent en évidence l'impact significatif de trois paramètres principaux : la température de congélation, la vitesse de refroidissement, et la concentration initiale en sel.

Il a été démontré que des températures modérées autour de -5°C , combinées à une vitesse de congélation contrôlée, favorisent la formation de cristaux de glace de grande taille, permettant une séparation efficace des sels. À l'inverse, des températures trop basses ou un refroidissement trop rapide entraînent une inclusion partielle des ions dans la glace, réduisant ainsi l'efficacité globale du dessalement.

Par ailleurs, l'étude a révélé qu'une augmentation modérée de la salinité initiale améliore temporairement la ségrégation des ions, avant d'atteindre une limite au-delà de laquelle la pureté de la glace diminue. Ces observations sont cohérentes avec les principes thermodynamiques de la cristallisation fractionnée.

L'ensemble des résultats obtenus valide le potentiel du dessalement par congélation dans un contexte de traitement d'eau à faible consommation énergétique, notamment dans des environnements froids ou en complément d'autres techniques. Des perspectives intéressantes résident dans l'intégration de ce procédé avec

des sources de froid renouvelables ou résiduelles, ainsi que dans l'optimisation numérique via la modélisation thermodynamique, qui fera l'objet de travaux futurs. Ces avancées offrent une base solide pour optimiser le procédé de dessalement par congélation et renforcer sa compétitivité face aux méthodes conventionnelles.

RÉFÉRENCES

- [1] Shannon, M. A., Bohn, P. W., Elimelech, M., Georgiadis, J. G., Marinas, B. J., & Mayes, A. M. (2008). Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature*, 452(7185), 301-310.
- [2] Elimelech, M., & Phillip, W. A. (2011). The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment. *Science*, 333(6043), 712-717.
- [3] Rahman, M. M., Al-Masri, D., & Al-Marzouqi, F. M. (2014). Freeze desalination: current status and future prospects. *Desalination*, 337, 34-45.
- [4] Hahn, I. (2009). Ice growth and solute entrapment in seawater desalination by freezing. *Cold Regions Science and Technology*, 59(3), 184-189.
- [5] Tsironi, I., Schlesinger, D., Späh, A., Eriksson, L., Segad, M., & Perakis, F. (2019). Brine rejection and hydrate formation upon freezing of NaCl aqueous solutions. arXiv preprint arXiv:1904.03682.