

Avant-propos

Hannelore DERLUYN^{1,2} et Marc PRAT³

¹ LFCR, CNRS, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Pau, France

² DMEX, CNRS, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Pau, France

³ IMFT, CNRS, Université de Toulouse, Toulouse, France

Les phénomènes de cristallisation de sels en milieu poreux se rencontrent dans d'importantes applications comme le problème de la salinisation des sols ou le stockage souterrain du CO₂ en aquifères salins ou encore la préservation et la conservation du patrimoine bâti. En lien avec cette dernière application, la cristallisation du sel dans les matériaux de construction ou les pierres poreuses de nombreux éléments de notre patrimoine architectural ou culturel est considérée comme une des plus sévères menaces à leur intégrité.

Les contraintes induites par la cristallisation dans les pores peuvent conduire en effet à de la fracturation, de l'écaillage ou encore de l'alvéolisation altérant très sérieusement l'esthétique des éléments concernés, voire leur stabilité structurelle. La cristallisation dans les sols peut également conduire à des désordres structuraux quand les phénomènes de gonflement induits viennent affecter les fondations ou les ouvrages de surface comme les routes ou les pistes et autres surfaces revêtues. Avec en ligne de mire ces applications, le présent ouvrage propose un aperçu sur l'état de l'art des connaissances scientifiques concernant la cristallisation du sel en milieu poreux.

Une caractéristique importante de ce domaine de recherche est son caractère interdisciplinaire. Pour le cas important par exemple où la cristallisation et les dommages induits résultent de l'évaporation de la solution contenue dans les pores du matériau, l'analyse fait intervenir outre le phénomène d'évaporation en milieu poreux lui-même, des phénomènes

physicochimiques comme la précipitation ou la dissolution, des phénomènes de transport du ou des soluté(s) à l'intérieur de l'espace poral, des phénomènes de capillarité et d'écoulements visqueux, des phénomènes thermiques et mécaniques (fracturation, gonflement, modification de la structure porale, etc.). À cette diversité vient s'ajouter la complexité supplémentaire que ces différents phénomènes sont généralement couplés entre eux si bien que les situations les plus complexes exigent une prise en compte satisfaisante de ces couplages.

Une conséquence immédiate est qu'en réalité différentes communautés de chercheurs s'intéressent à ce domaine de recherche. Chacun apportant ses méthodologies et centres d'intérêt, plusieurs lignes de force ont émergé au cours des années. Un premier volet concerne la thermodynamique avec une description de situations d'équilibre qui peuvent rapidement devenir très complexes lorsque plusieurs sels sont présents, ce qui est fréquent dans les applications, et en raison aussi des états métastables fréquemment rencontrés. La description des états d'équilibre, des diagrammes de phase, de l'impact du confinement, notamment dans les pores de taille submicronique jusqu'à seulement quelques nanomètres, peut occuper à elle seule une vie de chercheur. Si la thermodynamique est la clé pour décrire ces équilibres souvent subtils, elle ne suffit généralement pas à elle seule à appréhender une situation pratique de cristallisation en milieu poreux compte tenu de l'importance des phénomènes de transport. Très souvent, la cinétique de croissance d'une structure de sel en développement, qu'elle se développe à la surface du matériau poreux (efflorescence) ou en son sein (subflorescence), ne peut se décrire correctement que *via* une compréhension suffisante des phénomènes contrôlant le transport des ions au sein du matériau poreux comme au sein de la structure de sel elle-même, cette dernière étant souvent poreuse (cas du NaCl notamment). La thermodynamique est toujours très présente *via* la notion d'équilibre local sur les interfaces mais le recours aux méthodes de la mécanique des fluides et des phénomènes de transport en milieux poreux devient alors essentiel. Enfin, la poromécanique rentre en scène lorsqu'il s'agit d'analyser des situations conduisant à des fracturations et/ou des déformations. Comme en témoigne cet ouvrage, ce séquençage n'est en réalité qu'encore très imparfaitement réalisé. Par exemple, les travaux centrés sur le transport et les lois de croissance des efflorescences et subflorescences se sont surtout intéressés aux cas les plus simples où un seul sel est présent dans la solution. De même, certains aspects mis en avant par les études centrées sur le transport et la croissance des structures de sel ne sont pas pris en compte ou alors seulement de façon trop simplifiée dans les modèles les plus avancés de poromécanique.

Ces éléments indiquent que le domaine de la cristallisation de sel reste un domaine de recherche très ouvert où beaucoup reste à faire. Aussi ces spécificités du domaine de recherche se retrouvent dans les chapitres eux-mêmes qui se développent de façon relativement autonome.

Dans ce contexte, l'introduction reprend les éléments précédents en les précisant en lien avec la littérature. L'ouvrage se décompose ensuite en deux parties principales. Dans la première, l'objectif est de se concentrer sur les principes de base qu'il convient de maîtriser pour étudier les problèmes de cristallisation des sels dans les milieux poreux. Ainsi le [chapitre 1](#) est centré sur les propriétés thermodynamiques des solutions salines. La notion clé de pression de cristallisation fait l'objet du [chapitre 2](#). Les principaux résultats concernant les aspects transport de soluté en milieu poreux et croissance des structures de sel sont présentés au [chapitre 3](#). Un état de l'art concernant les théories de la poromécanique pour la prédiction des dommages liés au sel est proposé au [chapitre 4](#). Le [chapitre 5](#) présente des observations expérimentales dans les géomatériaux, principalement à partir des techniques modernes d'imagerie.

La seconde partie est à caractère plus applicatif et vient illustrer à la fois le caractère opérationnel des concepts fondamentaux des chapitres précédents mais aussi les développements encore à faire pour comprendre et modéliser certaines situations réelles. Ainsi, le [chapitre 6](#) présente des situations où la cristallisation dans le terrain sous-jacent a un impact considérable sur des ouvrages d'art, ponts ou tunnels. Il peut se voir aussi comme un chapitre de transition car une modélisation couplée thermohydrromécanique et chimique de la précipitation du sel et de la déformation des roches en contact avec les infrastuctures y est aussi présentée. Ce modèle conduit à de bons résultats par rapport aux observations de terrain. Le [chapitre 7](#) présente le domaine d'application très important de l'altération des milieux poreux due à la cristallisation des sels dans le contexte du patrimoine bâti depuis l'identification de l'origine des sels et des mécanismes de dégradation aux techniques de conservation et de restauration. Enfin, le [chapitre 8](#), en continuité avec le chapitre 7 et la problématique de la préservation du patrimoine bâti, met l'accent sur l'impact des conditions environnementales et de l'évolution des facteurs climatiques. À l'instar du chapitre 7, il illustre la complexité que l'on peut rencontrer dans des situations réelles lorsque plusieurs sels sont présents.

Ces chapitres ont été préparés par des spécialistes de chaque domaine concerné. Leur nom et affiliation sont indiqués en début de chapitre et en fin d'ouvrage. Nous les remercions très chaleureusement pour leur implication dans cet ouvrage.

Ce dernier s'adresse en priorité aux étudiants de niveau master et au-delà et aux chercheurs et ingénieurs intéressés par ce domaine de recherche et désireux d'avoir un aperçu synthétique de ses différentes facettes. Cependant, l'ouvrage peut intéresser un public plus large, que ce soit en direction des personnes plus directement concernées par les applications ou celles chargées d'enseignement, certaines parties pouvant se prêter à l'illustration de concepts de base au-delà de la problématique du sel elle-même.

Enfin, cet ouvrage n'aurait sans doute pas vu le jour sans une certaine structuration de la communauté des chercheurs travaillant sur la cristallisation des sels en milieu poreux, notamment *via* la série des workshops CRYSPOM « Crystallization in Porous Media » qui depuis 2008, à l'initiative de Noushine Shahidzadeh et du regretté Olivier Coussy, permet des échanges réguliers autour de cette thématique.

Comme cela est classique en recherche, la plupart des résultats présentés dans les différents chapitres n'auraient pas pu être obtenus sans la contribution de nombreuses personnes, à commencer bien sûr par les différents doctorants qui ont développé leur thèse sur ces sujets, et les échanges ou les collaborations avec de nombreux collègues. Il est impossible de les citer tous. Qu'ils trouvent ici une marque profonde de remerciement.

Introduction

Marc PRAT

IMFT, CNRS, Université de Toulouse, Toulouse, France

La cristallisation d'un sel en milieu poreux est étudiée en lien avec différentes applications. En premier lieu, à cause de son effet destructeur. Ce dernier est facilement observable lors de la visite de nombreux monuments et sites historiques. Comme noté dans l'ouvrage classique de Goudie et Viles (1997), c'est le cas par exemple du Sphinx en Égypte, des monuments de Pétra en Jordanie, de plusieurs cathédrales des régions méditerranéennes ou encore de la ville de Venise. Comme cela est illustré dans les chapitres 7 et 8 de l'ouvrage, l'attaque par les sels se traduit par différentes formes de dégradations comme la fissuration, l'écaillage, l'alvéolisation (figure I.1) et peut aller jusqu'à la pulvérisation du matériau. L'ensemble des processus liés à la cristallisation des sels conduisant à la dégradation des roches poreuses est désigné par le terme « haloclastie ». Ainsi l'haloclastie est considérée comme le phénomène majeur d'altération des monuments historiques autour de la Méditerranée.

Bien que l'haloclastie soit observée depuis l'Antiquité (Goudie et Viles 1997), ce n'est que depuis le XIX^e siècle que ces phénomènes ont commencé à être étudiés sérieusement. Par exemple, Brard (1828) a présenté une étude où la cristallisation du sel est étudiée comme un possible analogue à l'effet du gel sur les pierres poreuses tandis que les premières discussions visant à expliquer que la croissance d'un cristal en confinement génère des contraintes datent de 1853 avec le travail de Lavalley (Lavalley 1853). L'haloclastie a aussi été identifiée comme un phénomène important dans l'évolution des paysages contribuant à l'érosion non seulement sur la Terre mais possiblement aussi sur Mars (Malin 1974).

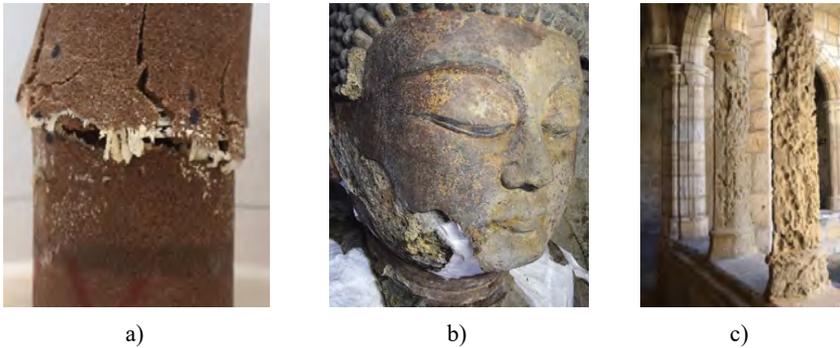


Figure I.1. Exemples de dommages dus à la cristallisation des sels : a) fissuration, b) écaillage (Motomachi Buddha, Oita, Japon) et c) alvéolisation (cathédrale de Santander, Espagne) (photos (a) et (c), © B. Leclère (Leclère 2021) ; photo (b), © H. Derluyn).

Comme pour bien d'autres phénomènes, l'approche scientifique de l'haloclastie et plus généralement de la cristallisation des sels en milieu poreux et des phénomènes associés s'est considérablement amplifiée au XX^e siècle. Parmi les travaux fondateurs souvent cités, on peut mentionner le travail de Correns (1949) avec une proposition d'expression de la pression de cristallisation, un concept central dans l'analyse de la génération de contraintes due à la cristallisation (voir le chapitre 2 du présent ouvrage). Cette formulation a depuis été revisitée et on peut se référer à (Steiger 2005) pour une présentation plus récente selon une approche purement d'équilibre thermodynamique. Des travaux plus récents, par exemple (Gagliardi et Pierre-Louis 2019), indiquent toutefois que la considération d'effets de non-équilibre peut être importante pour analyser la force exercée par un cristal dans un pore. Si le sujet de la génération de contrainte due à la cristallisation du sel dans les pores est bien entendu central (Scherer 1999 ; Coussy 2006 ; Noiriel *et al.* 2010 ; Scherer *et al.* 2014), en raison des phénomènes de dégradation des pierres poreuses qu'il induit, ainsi que des désordres importants qu'il peut causer sur des ouvrages d'art (voir le chapitre 6 du présent ouvrage), il ne constitue pas, loin de là, la seule motivation pour étudier l'impact de la présence d'un ou plusieurs sels en milieu poreux. Parmi les autres applications, on peut notamment citer :

- **la salinisation des sols** : la salinisation désigne l'accumulation des sels dans les sols à des niveaux toxiques pour la plupart des plantes. C'est une cause importante de désertification, d'érosion et de dégradation des sols. Elle rend les sols impropres à l'agriculture. En lien très probable avec le réchauffement climatique, le phénomène s'accélère (Litalien et Zeeb 2020) et menace des étendues toujours plus grandes de sols. L'irrigation est une des causes humaines majeures de salinisation. En cas d'irrigation trop abondante, le sol est humidifié en profondeur, ce qui instaure une continuité hydraulique permettant au

sel de remonter à la surface. Une bonne compréhension du transport du sel dissous en milieu poreux non saturé est donc un ingrédient clé pour comprendre et analyser ce phénomène ;

– **l'évaporation des sols** : le phénomène d'évaporation en présence de sel dissous conduit souvent à la formation d'une croûte de sel à la surface du sol. Selon ces conditions de formation, la formation de cette croûte peut sévèrement réduire l'évaporation (Fujimaki *et al.* 2010) et donc affecter les échanges sol-atmosphère. En dépit d'avancées (voir le chapitre 3 du présent ouvrage), la compréhension détaillée et la modélisation de ce phénomène restent des questions ouvertes ;

– **le soulèvement des sols** : lorsque la cristallisation se produit en profondeur, les couches de sol situées au-dessus peuvent se soulever en raison de la génération de contrainte due à la cristallisation. Ce mécanisme est illustré sur la figure I.2. On retrouve ici un effet mécanique mais plutôt dans le contexte des milieux granulaires que pour des milieux consolidés comme les roches poreuses. Ce phénomène de soulèvement peut conduire à des désordres importants en surface ((Feng *et al.* 2020), voir aussi le chapitre 6). Bien que clairement identifié (Hird et Bolton 2016), il est encore insuffisamment décrit avec aussi un manque de modèle prédictif ;

– **le stockage souterrain du CO₂** : le captage et stockage du carbone (CSC) dans des formations géologiques est une technique visant à limiter l'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Parmi les enjeux importants liés à cette technique figurent notamment les conditions d'injectivité des puits pour maintenir un niveau élevé d'injection (Peysson *et al.* 2014). Lorsque cette injection se fait en aquifère salin, la précipitation de sel peut se produire au voisinage du puits, entraînant l'obstruction des pores, la baisse de la perméabilité et finalement la dégradation des conditions d'injection. Une meilleure compréhension de ces phénomènes est donc de nature à améliorer la mise en œuvre de cette technique ;

– **l'imprégnation par une solution saline** : avec la pandémie de la Covid-19, il a été montré que les masques individuels sont des outils essentiels pour se protéger contre les particules virales en suspension dans l'air. Dans ce contexte, il a été montré qu'une solution saline hypertonique réduit efficacement la charge virale infectieuse sur les masques traités (Tatzber *et al.* 2021). La méthode consiste à imprégner le masque avec une solution saline de NaCl puis de le sécher. On peut se référer à (Börnhorst *et al.* 2016) pour une discussion de l'imprégnation d'un milieu poreux par une solution saline en lien avec d'autres contextes ;

– **l'utilisation de la cristallisation comme méthode bon marché pour la récupération de métaux** : une méthode simple pour récupérer des métaux dans des résidus miniers consiste à les imbiber avec une solution saline et les soumettre à l'évaporation (Cala-Rivera *et al.* 2018). Dans cette situation, comme expliqué au chapitre 3, un écoulement est induit vers la surface dans le milieu poreux. Cet écoulement transporte les espèces en solution

vers la surface où le sel cristallise. Les métaux se retrouvent piégés dans l'efflorescence, qu'il suffit alors d'extraire et de dissoudre pour récupérer les métaux en question ;

– la conservation et la restauration du patrimoine bâti : compte tenu des dommages que peut causer la cristallisation, différentes techniques ont été développées pour limiter le risque de dégradations ou restaurer les zones atteintes, que ce soit pour les constructions récentes comme pour les éléments anciens de notre patrimoine bâti ou culturel (fresques, peintures, sculptures, etc.). Ces aspects sont discutés dans le chapitre 7 ;

– la conception des évaporateurs des unités de distillation : dessaler l'eau de mer est une solution importante pour répondre à la demande croissante en eau potable mais aussi potentiellement dans le contexte de la transition énergétique et la production d'hydrogène par électrolyse qui fait aussi appel à la ressource eau. Dans ce contexte, le dessalement solaire-thermique de l'eau est une solution intéressante, qui peut générer de l'eau propre sans dépendre de manière significative d'énergie fossile. Dans les dispositifs conçus à cet effet (Wang *et al.* 2020), on retrouve des milieux (nano)poreux, de l'évaporation et une solution saline, des ingrédients communs aux applications déjà mentionnées.

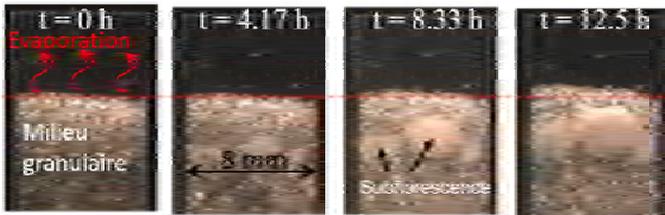


Figure 1.2. Séchage d'une solution de NaCl dans une cellule Hele-Shaw remplie de billes de verre. Le processus conduit à la formation de subflorescence entraînant le déplacement vers le haut des billes et le soulèvement de la surface (Diouf 2018)

L'évocation de ces différentes applications illustre le caractère multidisciplinaire du champ de recherche qui fait l'objet du présent ouvrage. Ainsi différentes communautés de chercheurs contribuent à son développement avec l'implication de spécialistes de géophysique, géomorphologie, hydrologie souterraine ou de surface, physicochimie, physique, chimie, thermodynamique, génie civil, transfert en milieux poreux, poromécanique, ingénierie ou encore relevant plus directement des applications.

Si chaque spécialiste peut trouver des motifs d'intérêt propres dans ce domaine de recherche, il est cependant clair que l'analyse des situations les plus complexes exige un certain niveau d'interdisciplinarité. Considérons, à titre d'exemple, le scénario très classique où la cristallisation résulte de l'évaporation d'une solution saline contenue dans un

milieu poreux. Dans ce scénario, l'évaporation induit une augmentation de la concentration en sel dans la solution au sein du milieu poreux par effet advectif et/ou de diminution de volume (voir le chapitre 3) jusqu'à atteindre une concentration suffisante pour que la cristallisation se déclenche et de la subflorescence et/ou de l'efflorescence se développe. Comme schématisé sur la figure I.3, l'analyse de ce type de situation implique de s'intéresser aux transports des sels dissous dans un milieu poreux soumis à l'évaporation et souvent non saturé (cas du séchage par exemple), aux aspects physicochimiques qui regroupent ici les équilibres thermodynamiques souvent complexes caractérisant les solutions (chapitres 1, 7 et 8), les phénomènes de précipitation-dissolution, la dépendance des propriétés (viscosité, tension de surface, mouillabilité, etc.) avec la concentration en sel, etc. Lorsque de surcroît la cristallisation a des conséquences mécaniques notables (fissuration, déplacements des grains, etc.), les phénomènes précédents deviennent couplés à la mécanique, qui est souvent abordée dans le cadre de la poromécanique macroscopique (chapitres 4 et 6) mais avec aussi des travaux à l'échelle des pores (chapitre 2).

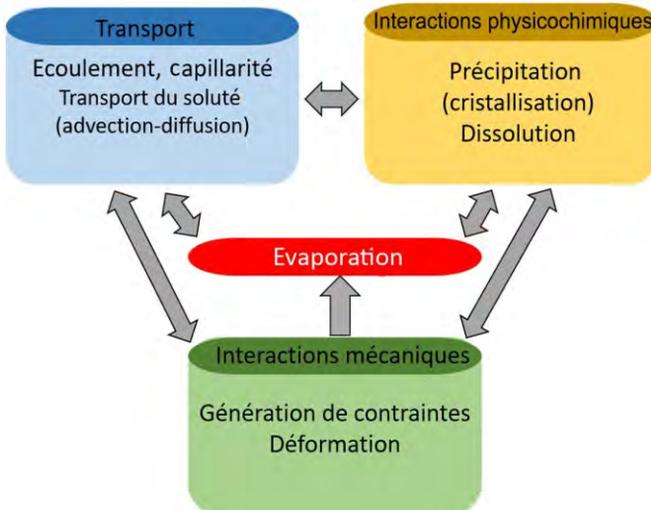


Figure I.3. *Évaporation d'une solution saline en milieu poreux : schéma simplifié des processus couplés à considérer*

En effet, comme cela est classique concernant les milieux poreux, la cristallisation de sel en milieu poreux et les phénomènes associés peuvent s'étudier à différentes échelles, depuis l'échelle du pore jusqu'à l'échelle des formations souterraines en passant par l'échelle du réseau de pores et l'échelle de Darcy (échelle de la carotte). La situation actuelle est toutefois loin d'avoir atteint le niveau de développement où le modèle à une

échelle donnée, par exemple l'échelle de Darcy, est déduit de façon rigoureuse, c'est-à-dire par des méthodes de changement d'échelle, de modèles à l'échelle inférieure, l'échelle des pores ici. Même s'il existe des travaux allant dans ce sens, la situation présente est plutôt que les travaux se développent à chaque échelle de façon assez indépendante. Pour ne donner qu'un seul exemple, plusieurs travaux ont été dédiés ces dernières années à la pression de cristallisation à partir d'expériences à l'échelle d'un pore ou d'un canal (chapitre 2). D'un autre côté, le concept de pression de cristallisation est central aussi dans les modèles poromécaniques (chapitre 4). En revanche, la façon dont une subflorescence en cours de croissance au sein du réseau poral génère des contraintes n'a pas encore été vraiment analysée. En d'autres termes, le maillon intermédiaire n'est pas compris, ce qui introduit nécessairement un certain flou sur le domaine réel d'applicabilité des modèles poromécaniques développés jusqu'ici.

Même s'il existe des travaux de modélisation où l'ensemble des phénomènes mentionnés sur la figure I.3 est pris en compte (Koniarczyk et Gawin 2012 ; Derluyn *et al.* 2014), beaucoup de phénomènes restent en fait mal compris ou mal décrits. Pour n'en citer qu'un, on peut mentionner l'effet de la formation des croûtes de sel sur l'évaporation, qui peut, suivant les conditions, sévèrement réduire l'évaporation ou au contraire ne pas avoir d'impact significatif. Un modèle purement phénoménologique a été par exemple proposé pour prendre en compte l'impact de la croûte sur l'évaporation lorsque celle-ci la réduit fortement (Grementieri *et al.* 2017). L'analyse physique détaillée des mécanismes conduisant à cet impact reste cependant une question très largement ouverte. Un travail récent suggère par exemple qu'il est dû à la formation de pores submicroniques en surface de la croûte et à l'effet Kelvin (Licsandru *et al.* 2022).

Ceci explique aussi, au-delà des applications, que les travaux continuent à se développer non seulement en tentant d'intégrer l'ensemble des phénomènes mais aussi de façon spécifique. L'ouvrage par sa structuration thématique reflète fort bien les différentes lignes de recherche qui sont actuellement suivies.

D'un point de vue plus méthodologique, l'évolution des travaux suit une tendance assez générale dans l'étude des milieux poreux avec l'usage de plus en plus fréquent des techniques modernes d'imagerie (chapitre 5). L'accès à ces techniques (microtomographie aux rayons X, radiographie aux neutrons, etc.) renouvelle les questionnements avec la possibilité de considérer dans les travaux toute la complexité, notamment géométrique, des milieux réels à l'échelle de leur microstructure. Néanmoins, compte tenu de la complexité et de la diversité des phénomènes associés à la cristallisation en milieux poreux, la mise en œuvre d'approches très diverses, expérimentales et numériques, y compris sur systèmes modèles pouvant aller jusqu'à un simple tube capillaire, reste complètement d'actualité. Sur ce point aussi, l'ouvrage en fait état.

Enfin, il est à noter que des solutions salines simples, le plus souvent constituées d'un seul sel, sont considérées dans la majorité des travaux académiques. Ceci est naturel dans une logique de complexité croissante ou les situations les plus simples doivent être d'abord comprises. Comme cela est illustré dans les chapitres 7 et 8, la situation de terrain peut être beaucoup plus complexe avec la présence de nombreux sels. Même dans le cas des solutions simples, le sel considéré entraîne des spécificités. Par exemple, le chlorure de sodium ne présente qu'une forme cristalline, anhydre qui plus est, dans les conditions de température habituelles dans les applications alors que le sulfate de sodium par exemple peut présenter plusieurs formes cristallines. Ces spécificités ont des conséquences importantes qui impliquent de clairement distinguer ce qui peut être générique, c'est-à-dire commun à tous les sels, de ce qui est spécifique. Ainsi, d'un point de vue applicatif, il est bien établi par exemple que le sulfate de sodium présente une menace plus grande que le chlorure de sodium en ce qui concerne l'effet destructeur lié aux sels.

En résumé, l'étude de la cristallisation des sels en milieu poreux intéresse des spécialistes de disciplines très diverses que ce soit en lien avec les applications qu'en raison des nombreuses facettes que ce domaine de recherche présente. Il est riche en questions ouvertes et si beaucoup d'avancées, comme en témoigne cet ouvrage, ont pu être réalisées au cours des dernières décennies, beaucoup reste à faire, notamment en ce qui concerne les modèles prédictifs, en particulier en lien avec les situations de terrain. Néanmoins cet ouvrage témoigne du degré de maturité atteint, qui s'il ne permet pas d'apporter toujours des réponses aux questionnements pratiques, propose un ensemble très cohérent de connaissances permettant aussi d'analyser de façon convaincante des situations très concrètes comme en témoigne par exemple le chapitre 6.

Bibliographie

- Börnhorst, M., Walzel, P., Rahimi, A., Kharaghani, A., Tsotsas, E., Nestle, N., Besser, A., Kleine Jäger, F., Metzger, T. (2016). Influence of pore structure and impregnation–drying conditions on the solid distribution in porous support materials. *Drying Technology*, 34(16), 1964–1978.
- Brard, C.-P. (1828). Sur le Procédé pour reconnaître, immédiatement, les pierres qui ne peuvent pas résister à la gelée et que l'on désigne ordinairement par les noms de pierres gelives ou pierres gelisses. *Annales de chimie et de Physique*, 38, 160–192.
- Cala-Rivera, V., Arranz-González, J.C., Rodríguez-Gómez, V., Fernández-Naranjo, F.J., Vadillo-Fernández, L. (2018). A preliminary study of the formation of efflorescent sulfate salts in abandoned mining areas with a view to their harvesting and subsequent recovery of copper. *Minerals Engineering*, 129, 37–40.

- Correns, C.W. (1949). Growth and dissolution of crystals under linear pressure. *Discussions of the Faraday Soc.*, 5, 267–271.
- Coussy, O. (2006). Deformation and stress from in-pore drying-induced crystallization of salt. *J. Mech. Phys. Solids.*, 54, 1517–1547.
- Derluyn, H., Moonen, P., Carmeliet, J. (2014). Deformation and damage due to drying-induced salt crystallization in porous limestone. *J. Mech. Phys. Solids*, 63, 242–255.
- Diouf, B. (2018). Évaporation avec cristallisation de sel en milieu granulaire : localisation des cristaux et déplacements mécaniques induits. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Toulouse.
- Grementieri, L., Molari, L., Derluyn, H., Desarnaud, J., Cnudde, V., Shahidzadeh, N., de Miranda, S. (2017). Numerical simulation of salt transport and crystallization in drying Prague sandstone using an experimentally consistent multiphase model. *Building and Environment*, 123, 289–298.
- Feng, R., Wu, L., Wang, B. (2020). Numerical Simulation for Temperature Field and Salt Heave Influential Depth Estimation in Sulfate Saline Soil Highway Foundations. *International Journal of Geomechanics*, 20(10).
- Fujimaki, H., Shimano, T., Inoue, M., Nakane, K. (2006). Effect of a salt crust on evaporation from a bare saline soil. *Vadose Zone Journal*, 5(4), 1246–1256.
- Gagliardi, L., Pierre-Louis, O. (2019). The nonequilibrium crystallization force. *Europhysics Letters*, 127(5), 59002.
- Goudie, A., Viles, H. (1997). *Salt weathering hazards*. Wiley, New York.
- Hird, R., Bolton, M.D. (2016). Migration of sodium chloride in dry porous materials. *Proc. R. Soc. A*, 472, 20150710.
- Koniorczyk, M., Gawin, D. (2012). Modelling of salt crystallization in building materials with microstructure–Poromechanical approach. *Construction and Building Materials*, 36, 860–873.
- Lavalle, J. (1853). Recherche sur la formation lente des cristaux. *Compt. Rend. Acad. Sci*, 36, 493–495.
- Leclère, B. (2021). Damage induced by crystallisation in confined reservoir conditions. Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Pau.
- Licsandru, G., Noiriél, C., Geoffroy, S., Abou Chakra, A., Duru, P., Prat, M. (2022). Detachment mechanism and reduced evaporation of an evaporative NaCl salt crust. Rapport.
- Litalien, A., Zeeb, B. (2020). Curing the earth: A review of anthropogenic soil salinization and plant-based strategies for sustainable mitigation. *Science of the Total Environment*, 698(1), 134235.

- Malin, M.C. (1974). Salt weathering on Mars. *J. of Geophysical Research*, 79(26), 3888–3894.
- Noiriel, C., Renard, F., Doan, M.L., Gratier, J.P. (2010). Intense fracturing and fracture sealing induced by mineral growth in porous rocks. *Chemical Geology*, 269, 197–209.
- Peysson, Y., André, L., Azaroual, M. (2014). Well injectivity during CO₂ storage operations in deep saline aquifers—Part 1: Experimental investigation of drying effects, salt precipitation and capillary forces. *Int. J. of Greenhouse Gas Control*, 22, 291–300.
- Scherer, G.W. (1999). Crystallization in pores. *Cem. Concr. Res.*, 29, 1347–58.
- Scherer, G.W., Flatt, R.J., Caruso, F., Aguilar Sanchez, A.M. (2014). Chemomechanics of salt damage in stone, *Nature Com.*, 5, 1–16.
- Steiger, M. (2005) Crystal growth in porous materials—I: the crystallization pressure of large crystals. *J. Cryst. Growth*, 282(3/4), 455–469.
- Tatzber, F., Wonisch, W., Balka, G., Marosi, A., Rusvai, M. *et al.* (2021). Coating with Hypertonic Saline Improves Virus Protection of Filtering Facepiece Manifold—Benefit of Salt Impregnation in Times of Pandemic. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 18(14), 7406.
- Wang, X., Hsieh, M.L., Bur, J.A., Lin, S.Y., Narayanan, S. (2020). Capillary-driven solar-thermal water desalination using a porous selective absorber. *Mater. Today Energy*, 17, 100453.