

LA CHAUX, PUIITS DE CARBONE NATUREL

Exemples de carbonatation
dans les applications de la chaux



www.eula.eu

SOMMAIRE

INTRODUCTION	3
LA CHAUX ET SES APPLICATIONS	4
LE CYCLE DE VIE DE LA CHAUX	6
DÉCOUVRIR LES AVANTAGES DE LA CARBONATATION	8
EXEMPLES DE CARBONATATION DANS LES APPLICATIONS DE LA CHAUX	11
CONCLUSION	14
ANNEXES	15
Acier	
Mortiers à la chaux	
Blocs de chaux/chanvre	
Eau potable	
Traitement des gaz de combustion	
Pâte à papier et papier	
Aluminium	
DÉFINITIONS	30
À PROPOS D'EULA	32

INTRODUCTION

Chaque année, l'Europe produit plus de 20 millions de tonnes de chaux, sous diverses formes. Matériau abondant et multifonctionnel, la chaux est nécessaire à de nombreux processus, de la production de fer et d'acier à l'épuration des eaux. Elle agit comme agent purificateur et capte la pollution dans les environnements industriels, mais elle est également utile pour la transformation des aliments et l'amélioration des sols. La chaux est donc essentielle pour notre Société.

La production de chaux exige de chauffer le calcaire (CaCO_3) pour le transformer en chaux vive de haute pureté (CaO), libérant du dioxyde de carbone (CO_2) dans le cadre de la réaction chimique de calcination (CO_2 de process). Cela signifie que la production de chaux est par nature un processus fortement émetteur de carbone. Le secteur européen de la chaux représenté par la Fédération Européenne de la Chaux (European Lime Association – EuLA) reconnaît qu'il a un rôle important à jouer dans l'ambition de l'Union Européenne à d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050 et s'engage pleinement dans les objectifs du Pacte vert pour l'Europe [1].

Le secteur de la chaux contribue à cette transition en se tournant vers des combustibles à plus faible teneur en carbone et en augmentant l'efficacité énergétique des processus de production. Cela permettra de réduire les émissions liées à cette consommation énergétique (CO_2 de combustion). Toutefois, ces émissions représentent moins d'un tiers de la quantité totale de CO_2 libérée lors de la production. Contrairement aux émissions de combustion, les émissions de CO_2

de process ne peuvent pas être ni réduites ni évitées. Le captage et l'utilisation ou le stockage du carbone sont nécessaires pour que la production de chaux devienne neutre en carbone en s'attaquant aux émissions de CO_2 à la source. Ces technologies sont en cours de développement mais ne sont actuellement pas viables industriellement.

Il existe toutefois une propriété importante de la chaux qui n'a pas encore été pleinement documentée ou mise en œuvre dans le calcul de l'empreinte carbone du secteur de la chaux. En effet, la chaux capte le CO_2 lorsqu'elle se retransforme en calcaire, un processus naturel connu sous le nom de carbonatation (ou minéralisation par carbonatation).

La mesure dans laquelle ce phénomène se produit dépend de la façon dont la chaux est utilisée en pratique. Des études montrent que le taux de carbonatation atteint 100% dans des applications telles que la purification de l'eau potable, ce qui signifie que la totalité du CO_2 de process généré par la production de la chaux est, dans ce cas, capturée de façon permanente et n'est pas libérée dans l'atmosphère, la chaux étant complètement transformée en calcaire (CaCO_3).

Dans ce document, la Fédération Européenne de la Chaux (EuLA), présente les résultats d'une analyse documentaire bibliographique réalisée par l'université Politecnico di Milano (PoliMI), qui a étudié les données disponibles sur les taux de carbonatation dans diverses utilisations de la chaux. Leurs conclusions montrent que, en moyenne, 33% de la quantité de CO_2 de process émise lors de la production de chaux est captée par carbonatation.



Un catalyseur essentiel

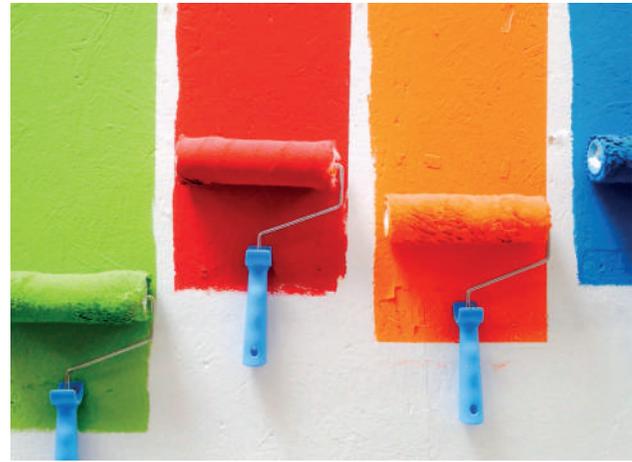
La chaux est l'exemple typique de produit habituellement invisible, mais qui a un impact primordial sur notre vie quotidienne. Elle est au cœur de nombreux processus industriels, notamment la fabrication de l'acier, la construction, l'industrie agro-alimentaire et de nombreuses applications environnementales. La chaux a été utilisée de très longue date. Par exemple, les Romains utilisaient des mortiers à base de chaux pour construire leur maisons. Aujourd'hui, ses caractéristiques multiples et uniques sont un atout pour divers secteurs de la construction et de l'industrie, qui peuvent ainsi optimiser leurs produits, et elle joue un rôle important dans l'agriculture, l'industrie agro-alimentaire et le traitement des eaux.

En construction, la chaux peut être employé comme mortier pour tirer parti de sa maniabilité lorsqu'elle est humide et de sa carbonatation naturelle qui la ramène à l'état de calcaire lors du séchage. Ce processus est particulièrement utile pour la restauration des bâtiments historiques. Les formes modernes de mortiers mélangent la chaux avec d'autres composés qui accélèrent le séchage. De même, on utilise une combinaison de chaux et du noyau ligneux (la partie solide

à l'intérieur de la tige) des plants de chanvre pour former un mélange chaux-chanvre.

Dans de nombreuses applications modernes, la chaux à destination de l'industrie est utilisée comme un composé basique ou alcalin pour neutraliser l'acidité ou piéger les impuretés acides. C'est notamment le cas dans l'industrie sidérurgique, où la chaux se lie aux éléments acides pendant le processus de fusion pour éliminer les impuretés en formant des scories. La chaux a été utilisée comme moyen de lutte contre les pluies acides à la fin du siècle dernier. Elle est également utilisée pour épurer les gaz de combustion des installations industrielles et des centrales électriques. Dans le cadre de la production d'aluminium, la chaux est utilisée dans un mélange caustique pour dissoudre la bauxite (minerai d'aluminium).

On se sert également de la chaux pour purifier et adoucir l'eau potable et pour traiter les eaux usées et les boues. Pour certaines applications, la chaux est mise en suspension dans l'eau et combinée au CO₂ pour fabriquer différentes formes de précipités de carbonate de calcium (PCC), essentiellement du calcaire purifié. Ce produit est utilisé comme pigment ou charge dans des matériaux tels que le papier et la peinture.



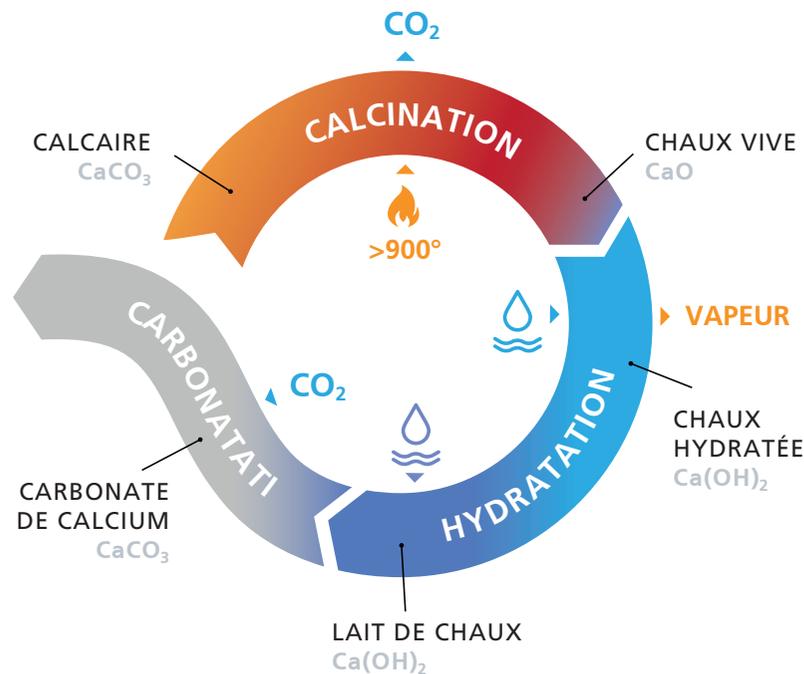


LE CYCLE DE VIE DE LA CHAUX

Les étapes du cycle de vie de la chaux

Le cycle de la chaux est au cœur de nombreuses applications. Il nous permet de transformer le calcaire que nous extrayons

comme ressource de base en une famille de produits très diversifiée, dont la chaux vive, la chaux hydratée et sa suspension dans l'eau – le lait de chaux. Chacun de ces produits est utilisé de différentes manières.



CO₂ de process

La production de chaux est un processus à forte intensité de carbone en raison de la libération de CO₂ à partir du calcaire, appelé « CO₂ de process ». La mise en œuvre de combustibles pour produire la chaleur nécessaire émet également du CO₂, appelé « CO₂ de combustion ». En général, le CO₂ de process représente plus des deux tiers des émissions de CO₂ du secteur européen de la chaux, tandis que le CO₂ de combustion en représente moins d'un tiers. Si les émissions de CO₂ de combustion peuvent être réduites autant que possible en s'orientant vers des sources d'énergie plus neutres en CO₂ (par exemple la biomasse), il n'en va pas de même pour les émissions de processus, car elles font partie intégrante de la réaction chimique qui produit la chaux.

La chaux, puits de carbone naturel

La chaux se transforme naturellement en calcaire en captant le CO₂ ambiant. Ce phénomène, appelé carbonatation (ou minéralisation par carbonatation), est essentiel pour de nombreuses utilisations de la chaux. Par exemple, les mortiers contenant de la chaux capturent le CO₂ de l'atmosphère, qui réagit avec la chaux

pour produire des cristaux de carbonate de calcium. C'est pourquoi les mortiers à la chaux durcissent avec le temps. La chaux pure est souvent appelée chaux aérienne par opposition à la chaux hydraulique qui se fige dans l'eau. Les cristaux de carbonate de calcium sont plus gros que la chaux et ils se forment dans les espaces disponibles, comme les fissures. En gonflant, ils colmatent ces fissures. Cette caractéristique autoréparatrice réduit la pénétration de l'eau et augmente la durabilité des mortiers.

Taux de carbonatation

Le taux de carbonatation d'une application décrit la quantité de CO₂ captée en pourcentage du CO₂ de process émis au cours de la fabrication de la chaux. Le traitement de l'eau potable (et purification de l'eau), par exemple, affiche un taux de carbonatation de 100%. Dans cette application, la chaux est volontairement exposée au CO₂ afin de précipiter sous forme de carbonate de calcium. Comme toute la chaux présente dans l'eau est précipitée, elle capte une quantité de CO₂ égale au CO₂ de process émis lors de sa fabrication. Dans la production d'acier, la chaux est utilisée pour éliminer les impuretés qui ne sont pas du CO₂, et cette application a donc un taux de carbonatation inférieur.



DÉCOUVRIR LES AVANTAGES DE LA CARBONATATION

De nombreuses études ont été menées et publiées ces derniers temps sur le captage permanent du CO₂ grâce aux propriétés de la chaux. Pour évaluer avec précision l'empreinte carbone du secteur de la chaux, nous devons tenir compte de la quantité de CO₂ captée par la chaux lorsqu'elle est utilisée dans différentes applications. Pour cela, il faut disposer de données sur le taux de carbonatation pour toutes les utilisations de la chaux et leurs parts respectives dans la totalité de ce secteur.

Pour répondre à ce besoin de connaissances, EuLA a chargé en 2018 l'université Politecnico di Milano (PoliMI) de réaliser une revue documentaire des recherches scientifiques menées sur la carbonatation de la chaux [2]. PoliMI a évalué la carbonatation naturelle et renforcée (voir plus loin)

dans diverses applications de la chaux, en considérant la quantité et la fiabilité des informations et des données disponibles.

Les faits établis

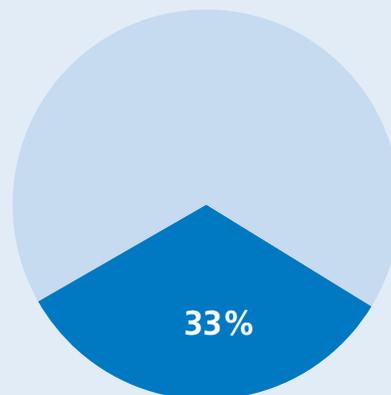
Nous disposons d'informations scientifiques concluantes sur le taux de carbonatation pour huit applications. Ces applications sont ainsi qualifiées « d'applications éprouvées ». Elles comprennent notamment les deux principales applications de la chaux: la fabrication d'acier et le captage des gaz de combustion, soit 23% des émissions totales de CO₂ de la production européenne de chaux. Pour six autres applications courantes, les données disponibles sont moins nombreuses, mais elles suggèrent le captage de 10% supplémentaires des émissions de CO₂ de process de la chaux européenne.

Le taux de carbonatation naturelle du secteur européen de la chaux pourrait représenter en moyenne 33% des émissions de CO₂ de procédé initialement générées par la production de chaux.

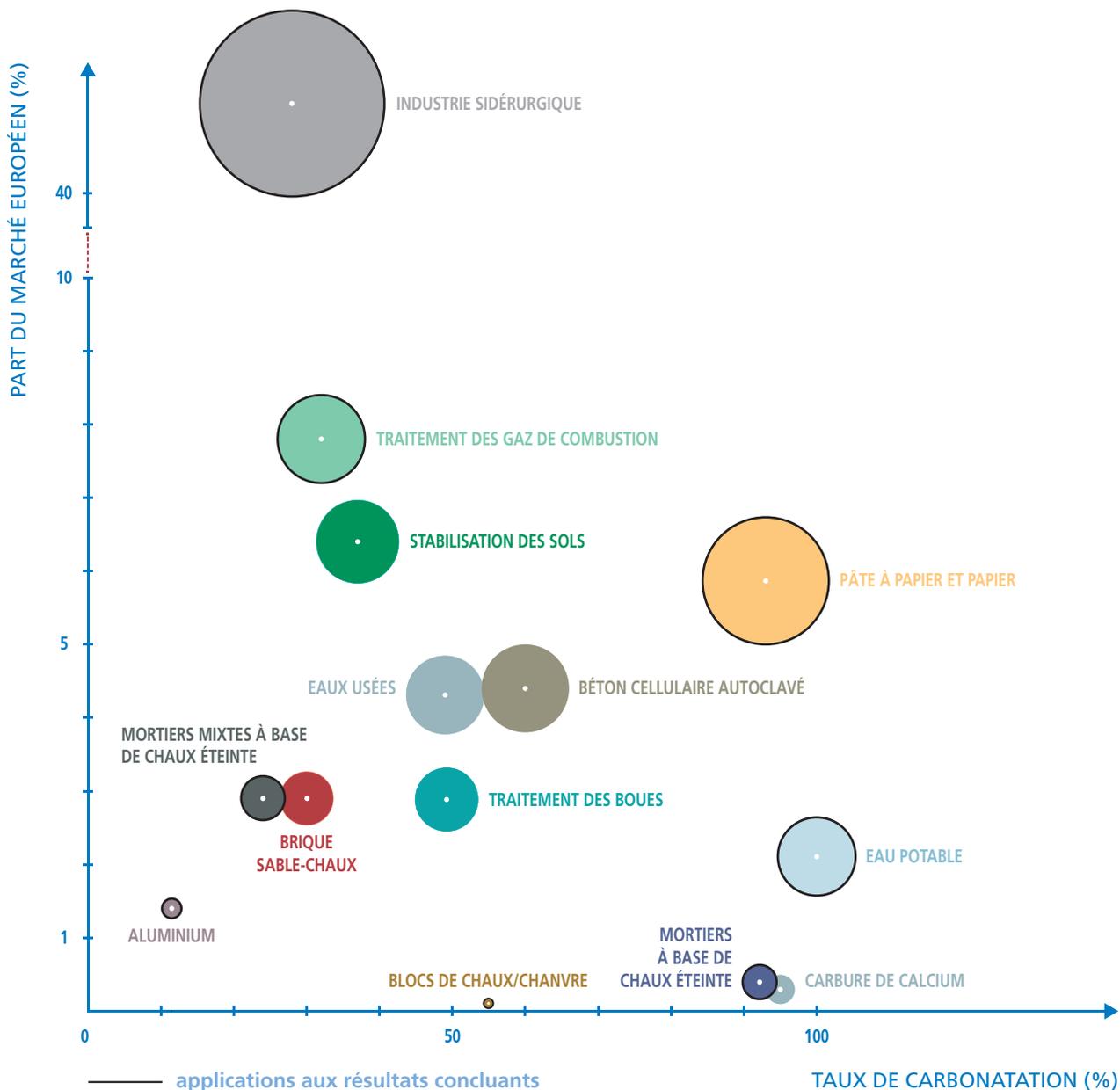
La carbonatation naturelle de la chaux absorbe en moyenne 33% de la quantité de CO₂ de procédé émise pendant la production.

Le graphique ci-dessous montre la quantité de CO₂ captée par la carbonatation naturelle. Pour chaque application, la surface du cercle représente la quantité de CO₂ captée, en pourcentage du total de CO₂ de process émis lors de la production de chaux pour le marché européen.

Total du CO₂ de process



Total du CO₂ capté par carbonatation naturelle



Renforcement de la carbonatation

La carbonatation se produit naturellement sous l'effet de l'utilisation de la chaux. Dans certains cas, il est possible d'ajuster la façon dont la chaux est utilisée afin de maximiser le taux de carbonatation. Le meilleur moyen d'y parvenir est souvent de maximiser le contact entre la chaux et le CO₂, à la fois en termes de surface, de concentration de CO₂, de pression et de temps. Parmi les autres options, on peut citer l'amélioration de l'efficacité du process, l'ajustement du rapport entre la chaux et les réactifs ou la réduction des impuretés et le contrôle de l'humidité relative, de l'acidité et de la température de la réaction.

PoliMI a recueilli des informations qui démontrent un potentiel de carbonatation d'environ 40% des émissions de CO₂ du processus lors de l'application des techniques de carbonatation naturelle et renforcée.

Vitesse de la carbonatation

Lorsque la chaux est utilisée dans la purification des gaz de combustion, pour traiter l'eau potable ou dans la production de pâte à papier, la carbonatation se produit instantanément. Dans l'industrie sidérurgique, la carbonatation a lieu pendant le stockage à l'air libre des scories (déchet de la production d'acier) et dure généralement entre 3 et 6 mois. La chaux utilisée dans divers matériaux de construction, comme les mortiers et la chaux de chanvre, se carbonate progressivement pendant la durée de vie du bâtiment.

Bien qu'il existe de grandes différences dans les délais de carbonatation selon les applications, la plupart de ces réactions de se produisent au cours de la première année.

Un processus permanent

Le captage du CO₂ par carbonatation est permanent, car une grande quantité d'énergie thermique est nécessaire pour le libérer à nouveau. En d'autres termes, sans retransformation en chaux, le CO₂ reste piégé en permanence.

La chaux peut donc véritablement être considérée comme un puits de carbone.





EXEMPLES DE CARBONATATION DANS LES APPLICATIONS DE LA CHAUX

Les pages suivantes présentent des exemples d'applications de la chaux pour lesquelles des données concluantes sur la carbonatation sont disponibles. Une évaluation plus détaillée a été réalisée par PoliMI [2]. Les annexes figurant à la fin de cette brochure fournissent des informations supplémentaires issues de leurs travaux. Les pages suivantes décrivent le rôle joué par la chaux dans chacune de ces applications et indiquent quand et comment se produit la carbonatation naturelle. Pour chaque application, nous fournissons les données suivantes:

- **Le taux de carbonatation naturelle:** quantité de CO₂ captée lors de l'utilisation, exprimée en pourcentage du CO₂ de process émis lors de la fabrication de la chaux pour cette application.
- **Le taux de carbonatation renforcée:** indication du ou des taux de carbonatation qui peuvent être atteints en mettant en oeuvre des mesures supplémentaires visant spécifiquement à maximiser la carbonatation.
- **Les publications pertinentes:** nombre de publications qui contiennent des données crédibles pour une application, par rapport au nombre total de publications évaluées pour cette application.

SIDÉRURGIE



Usage: chaux utilisée pour neutraliser les éléments acide, éliminer les impuretés, permettre la formation de scories mousseuses dans les fours à arc électrique et protéger les réfractaires

Carbonatation naturelle: cette carbonatation se produit lors du stockage à l'air libre des scories d'acier pendant 3 à 6 mois

Taux de carbonatation: 5-28%

Taux de carbonatation renforcée: 39-56%

Publications pertinentes: 55 sur les 72 évaluées

MORTIERS À BASE DE CHAUX ÉTEINTE



Usage: chaux éteinte mélangée à des agrégats pour créer un mortier qui durcit par carbonatation pour devenir du calcaire

Carbonatation naturelle: pendant la durée de vie du bâtiment

Taux de carbonatation: 80%

Taux de carbonatation renforcée: 92%

Publications pertinentes: 21 sur les 100 évaluées

BLOCS DE CHAUX/CHANVRE



Usage: chaux aérienne mélangée à des chènè-vottes de chanvre pour créer des briques ou des parois moulées, qui durcissent par carbonatation

Carbonatation naturelle: pendant la durée de vie du bâtiment

Taux de carbonatation: 55%

Taux de carbonatation renforcée: 65%

Publications pertinentes: 9 sur les 15 évaluées

MORTIERS MIXTES À BASE DE CHAUX ÉTEINTE



Usage: chaux éteinte mélangée à un co-liant et à des agrégats. La chaux hydratée durcit par carbonatation en calcaire, tandis que le co-liant prend par une autre réaction, souvent par hydratation

Carbonatation naturelle: pendant la durée de vie du bâtiment

Taux de carbonatation: 20%

Taux de carbonatation renforcée: 23%

Publications pertinentes: 27 sur les 90 évaluées

EAU POTABLE



Usage: chaux hydratée pour précipiter le calcium, éliminer les impuretés et réguler l'acidité

Carbonatation naturelle: le CO₂ se dissout dans l'eau sous forme de bicarbonates et se précipite avec le calcium

Taux de carbonatation: 100%

Taux de carbonatation renforcée: 100%

Publications pertinentes: 2 sur les 14 évaluées

PURIFICATION DES GAZ DE COMBUSTION



Usage: chaux hydratée pour réagir avec les gaz acides provenant des émissions des installations industrielles

Carbonatation naturelle: la chaux libre réagit avec le CO₂ des gaz d'émission

Taux de carbonatation: 32%

Taux de carbonatation renforcée: 59-64%

Publications pertinentes: 23 sur les 39 évaluées

PÂTE À PAPIER ET PAPIER



Usage: chaux hydratée précipitée en différentes formes de carbonate de calcium

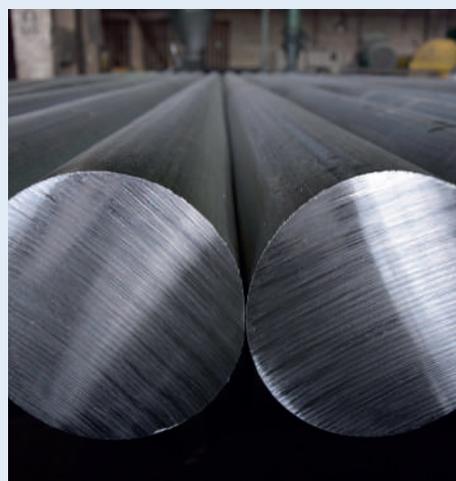
Carbonatation naturelle: du CO₂ est ajouté pendant le processus pour provoquer une précipitation

Taux de carbonatation: 93%

Taux de carbonatation renforcée: 100%

Publications pertinentes: 26 sur les 41 évaluées

ALUMINIUM



Usage: chaux vive ou chaux hydratée utilisée dans un mélange pour dissoudre la bauxite

Carbonatation naturelle: la chaux libre réagit avec le CO₂ atmosphérique pendant le stockage des résidus

Taux de carbonatation: 12%

Taux de carbonatation renforcée: 12%

Publications pertinentes: 13 sur les 52 évaluées

CONCLUSION

En moyenne, 33% de la quantité totale de CO₂ de process émise lors de la production de chaux en Europe est capturée par carbonatation pendant l'utilisation et, en utilisant des techniques spécifiques, ce chiffre pourrait même atteindre 40%.

Il est important de noter que cette carbonatation se produit principalement au cours de la première année.

Comme ce CO₂ est capturé de manière permanente, il faut en tenir compte dans le calcul de l'empreinte carbone du secteur.

Mieux définir et mieux comptabiliser le CO₂ éliminé et stocké de la chaux permettra au secteur européen de la chaux d'être un partenaire solide dans une ambition partagée vers une Europe neutre

en carbone, tout en restant concurrentiel sur le marché mondial.

EuLA est pleinement engagée dans la vision d'une Europe neutre en carbone d'ici 2050, consciente que cela nécessitera à la fois des innovations technologiques et un cadre réglementaire solide. Nous sommes convaincus qu'une comptabilisation correcte de la carbonatation qui se produit grâce à l'utilisation généralisée de la chaux fait partie intégrante de ce cadre.

EuLA continue à mener des études afin de générer des données supplémentaires sur la carbonatation naturelle et renforcée dans les applications pour lesquelles les données ou les recherches scientifiques actuellement disponibles ne se prêtent pas à des conclusions solides. Cela permettra une comptabilisation encore plus détaillée de la carbonatation résultant de l'utilisation de la chaux.

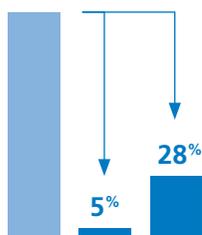
RÉFÉRENCES

1. CE. 2019. Communication de la Commission sur le Pacte vert. COM(2019) 640 final. Bruxelles. https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/actions-being-taken-eu_fr
2. Grosso M., Biganzoli L., Campo F. P., Pantini S., Tua C. 2020. Revue de la littérature sur l'évaluation du potentiel de carbonatation de la chaux sur différents marchés et au-delà. Rapport préparé par le groupe de recherche Assessment on Waste and Resources (AWARE) du Politecnico di Milano (PoliMI), pour la European Lime Association (EuLA). Pp. 333.
3. Campo F. P., Tua C., Biganzoli L., Pantini S., Grosso M. 2021. Natural and enhanced carbonation of lime in its different applications: A review. [Carbonatation naturelle et renforcée de la chaux dans ses différentes applications: revue] Publié dans le Environmental Technology Journal 10:1. Pp. 224-237. <https://doi.org/10.1080/21622515.2021.1982023>

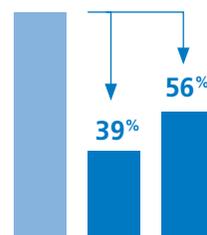


ANNEXES





TAUX DE CARBONATATION NATURELLE
AUGMENTATION PROGRESSIVE AVEC LE TEMPS



TAUX DE CARBONATATION RENFORCÉE
AUGMENTATION PROGRESSIVE AVEC LE TEMPS

Taux de carbonatation naturelle de 5 à 28% (moins d'un an) pendant le stockage des scories d'acier.
Taux de carbonatation renforcée de 39 à 56% (moins de 5 ans) pendant le stockage des scories d'acier.

FACTEURS INFLUENÇANT LE TAUX DE CARBONATATION

La carbonatation naturelle de la chaux dans la fabrication de l'acier est affectée par:

- La surface exposée des stocks de scories d'acier.
- La faible porosité des empilements empêche le contact avec le CO₂.

Le taux de carbonatation renforcée est affecté par:

- La composition des scories d'acier.
- La taille des particules et la surface de contact avec le CO₂.

Utilisation de la chaux dans la production de fer et d'acier

La présence de composés de calcium dans les scories d'acier est une conséquence de l'utilisation de chaux ou de calcaire au cours des processus de fabrication du fer et de l'acier. La chaux est utilisée dans les procédés de désulfuration des métaux chauds ainsi que dans les procédés du convertisseur basique à oxygène (BOF) et du four à arc électrique (EAF). Elle agit comme agent fondant pour créer des scories alcalines capables de protéger les réfractaires, de neutraliser les éléments formateurs d'acide et d'éliminer les inclusions de soufre, de phosphore, de silice et d'alumine. La chaux est également utilisée

dans une grande variété de procédés métallurgiques secondaires pour éliminer les impuretés supplémentaires et empêcher la réabsorption des poussières des scories. En outre, elle peut être utilisée avec d'autres matériaux, tels que le spath fluor, pour former des scories synthétiques, qui sont utilisées comme fondant pour éliminer le soufre supplémentaire pendant le processus de raffinage de l'acier. Dans le processus de production de fonte brute, la chaux est beaucoup moins souvent utilisée. Elle est ici mélangée à du calcaire dans une proportion de 1:6, principalement dans le processus de frittage.

Le processus de carbonatation

La carbonatation naturelle se produit pendant le stockage à l'air libre des scories d'acier, lorsque la chaux hydratée ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) contenue dans les scories réagit avec le CO_2 atmosphérique. Le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ est le résultat de l'hydratation complète du CaO libre restant dans les scories. Cette hydratation

est nécessaire pour le recyclage des scories en tant que matériau de construction et se produit par l'exposition à l'air libre des empilements de scories, généralement pendant 3 à 6 mois. Dans les scories de fer, la carbonatation est considérée comme négligeable même après 100 ans.

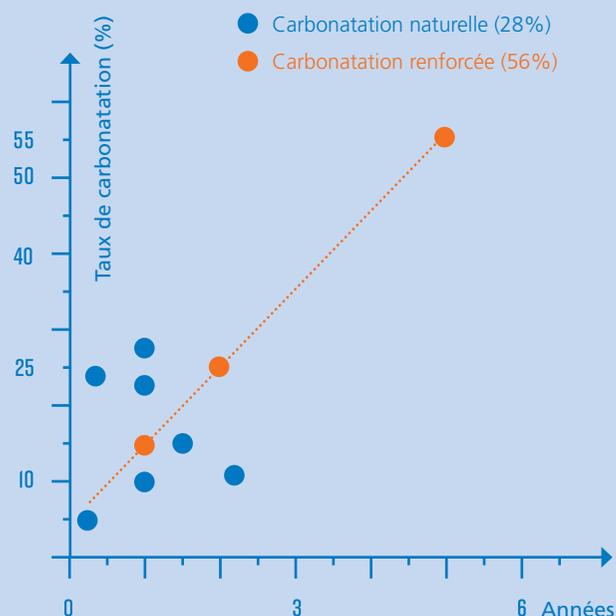
Vitesse de la carbonatation

La carbonatation de la chaux dans les scories d'acier suit l'équation ci-dessous.

Taux de carbonatation

- Pendant les 5 premières années:
= $0,0085\sqrt{\text{nombre de jours}}$.
- Au bout de 5 ans: 39-56%.

Selon l'équation, le taux de carbonatation renforcée minimum de 39% est atteint après 5 ans. Cette valeur est légèrement surestimée, étant donné que les 2/3 de la chaux libre dans les scories d'acier réagissent au cours des 5 premières années. Alors que la carbonatation des silicates de calcium et des aluminates de calcium prend plus de 5 ans, pour atteindre un degré de carbonatation final de seulement 1/3. Ainsi, 39% peut être considéré comme un taux de carbonatation naturelle maximum théorique, généralement atteint après plus de 5 ans. Comme la surface des empilements de scories est moins poreuse une fois carbonatée, la diffusion du CO_2 diminue avec le temps.



Scories d'acier

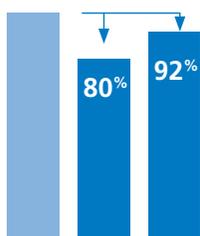
Publications étudiées: 72

Publications contenant des informations et des données pertinentes et fiables: 34

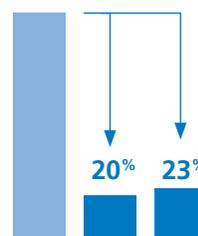
Scories de fer

Publications étudiées: 72

Publications contenant des informations et des données pertinentes et fiables: 21



MORTIER À BASE DE CHAUX ÉTEINTE
AUGMENTATION PROGRESSIVE AVEC LE TEMPS



MORTIER MIXTE À BASE DE CHAUX ÉTEINTE
AUGMENTATION PROGRESSIVE AVEC LE TEMPS

TAUX DE CARBONATATION NATURELLE

Le taux de carbonatation naturelle est affecté par la profondeur du mortier.
La chaux devrait se carbonater de 0 à 191 mm sous la surface du mortier en 100 ans.

Utilisation de la chaux comme mortier

Les mortiers à la chaux sont utilisés depuis l'Antiquité. **Les mortiers à la chaux aérienne** sont composés de chaux hydratée ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). **Les mortiers mixtes**

à base de chaux aérienne sont un mélange de chaux et d'autres composés pour accélérer la liaison, par exemple le ciment Portland.

Le processus de carbonatation

Les mortiers à la chaux éteinte durcissent à la suite de leur exposition au CO_2 , en formant du carbonate de calcium (CaCO_3). La carbonatation fait donc partie du processus de durcissement et d'autoréparation des mortiers à la chaux éteinte.

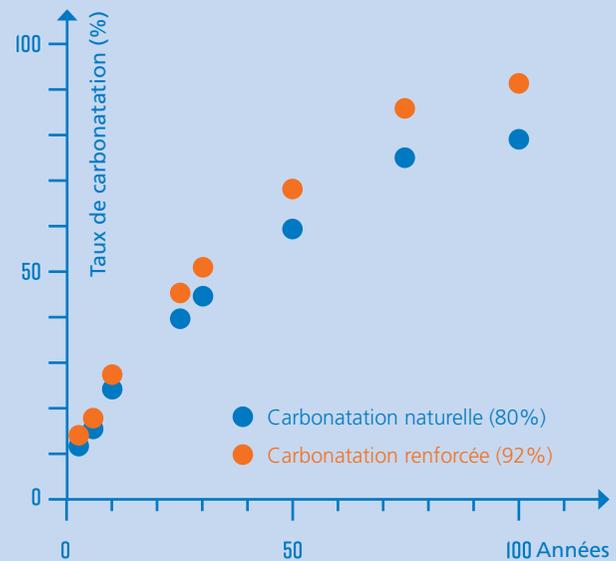
Dans les **mortiers mixtes à base de chaux éteinte**, la chaux éteinte durcit par carbonatation en calcaire, tandis que le co-liant prend par une autre réaction, souvent par hydratation.

Vitesse de carbonatation des mortiers de chaux éteinte

La vitesse de carbonatation naturelle des mortiers à la chaux aérienne suit l'équation supposée:

$$[CR = NCR \cdot K \sqrt{t} / \text{profondeur}]$$

- **CR** = taux de carbonatation (%).
- **NCR** = taux de carbonatation naturelle (80%).
- **t** = temps exprimé en jours.
- **K** = constante de carbonatation égale à 1 mm/√jour.
- **profondeur** = épaisseur de l'application qui se carbonise après 100 ans (191 mm).

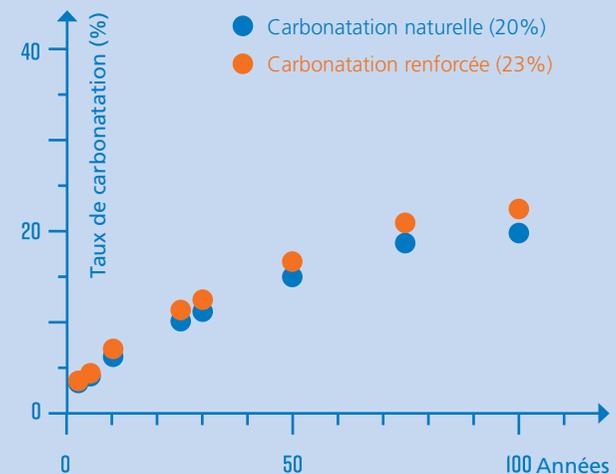


Vitesse de carbonatation des mortiers mixtes de chaux éteinte

La carbonatation naturelle des mortiers mixtes de chaux éteinte est affectée par le taux de substitution du ciment Portland, qui réduit la porosité. Ceci a pour effet de réduire le taux de carbonatation à un quart des mortiers à la chaux éteinte. Équation supposée:

$$[CR = NCR \cdot K \sqrt{t} / \text{profondeur}]$$

- **CR** = taux de carbonatation (%).
- **NCR** = taux de carbonatation naturelle (20%).
- **t** = temps exprimé en jours.
- **K** = constante de carbonatation égale à 0,25 mm/√jour.
- **profondeur** = épaisseur de l'application qui se carbonise après 100 ans (191 mm).



Mortier à base de chaux éteinte

Publications étudiées: 100

Publications contenant des informations et des données pertinentes et fiables: 21

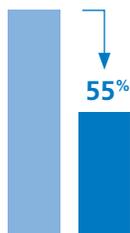
Mortier mixte de chaux éteinte

Publications étudiées: 90

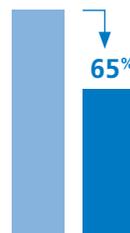
Publications contenant des informations et des données pertinentes et fiables: 27



BLOCS DE CHAUX/CHANVRE



TAUX DE CARBONATATION NATURELLE
AUGMENTATION PROGRESSIVE AVEC LE TEMPS



TAUX DE CARBONATATION RENFORCÉE
AUGMENTATION PROGRESSIVE AVEC LE TEMPS

Le taux de carbonatation est affecté par:

- La composition du liant.
- Le contact avec le CO₂.

Utilisation des blocs de chaux/chanvre comme matériau de construction

chaux/chanvre est principalement utilisés en France et au Royaume-Uni, pays d'origine de la plupart des publications. Le matériau à base des blocs de chaux/chanvre est fabriqué à partir de chènevottes de chanvre, c'est-à-dire le cœur ligneux haché

des tiges des plants de chanvre. Ce matériau est mélangé à un liant composé de chaux aérienne avec des additifs à base de ciment pouzzolanique ou de chaux hydraulique et, dans certains cas, des tensioactifs.

Le processus de carbonatation

Le liant de la chaux aérienne est la chaux hydratée (Ca(OH)₂). Pendant la phase d'utilisation du matériau de construction à base de chaux, la chaux hydratée se carbonate en réagissant avec le CO₂ atmosphérique

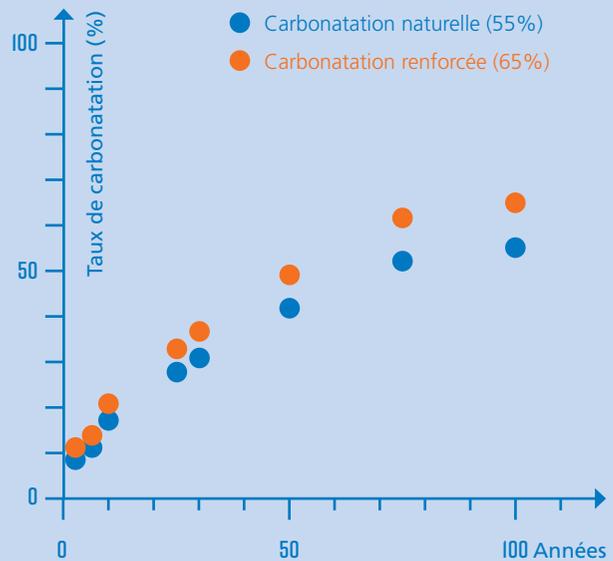
pour former du carbonate de calcium (CaCO₃). La revue documentaire montre que le taux de carbonatation naturelle est de 55%.

Vitesse de la carbonatation

La carbonatation se produit jusqu'à une profondeur de 50 mm, où la chaux est entièrement carbonatée après 91 jours. Ainsi, la constante de carbonatation qui mesure l'avancée de la profondeur de carbonatation dans le temps est égale à 5,24 mm/ $\sqrt{\text{jour}}$ donnée par le rapport de 50 mm sur la racine carrée de 91 jours. Le taux de carbonatation naturelle du bloc de chaux/chanvre suit l'équation supposée:

$$[CR = NCR \cdot K \sqrt{t} / \text{profondeur}]$$

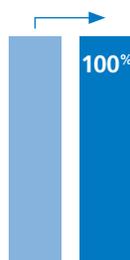
- **CR** = taux de carbonatation (%).
- **NCR** = taux de carbonatation naturelle (55%).
- **t** = temps exprimé en jours.
- **K** = constante de carbonatation égale à 5,24 mm/ $\sqrt{\text{jour}}$.
- **profondeur** = épaisseur de l'application qui se carbonise après 100 ans (1001 mm).



Blocs de chaux/chanvre

Publications étudiées: 15

Publications contenant des informations et des données pertinentes et fiables: 9



**TAUX DE CARBONATION NATURELLE
INSTANTANÉE**

Le taux de carbonatation est affecté par:

- La faible solubilité du carbonate de calcium et de l'hydroxyde de magnésium.
- L'ajout de coagulants et d'agents de floculation pour accélérer le processus.
- L'ajout de fines particules inertes, telles que du sable ou du CaCO_3 préalablement précipité, pour servir de centres de nucléation et augmenter la vitesse de réaction.

Utilisation de la chaux dans le traitement de l'eau potable

La chaux est utilisée dans le secteur de l'eau potable pour de nombreuses applications telles que l'adoucissement, l'ajustement du pH, la neutralisation des acides, l'élimination des métaux, l'ajustement de l'alcalinité ou l'élimination des fluorures, des phosphates, des sulfates et de l'azote.

L'une des principales applications est l'adoucissement de l'eau, qui vise à réduire la dureté de l'eau brute (c'est-à-dire les bicarbonates de calcium et de magnésium), à réduire l'alcalinité et à éliminer la silice pour éviter les effets indésirables de l'entartrage.

Le processus de carbonatation

L'eau dure est adoucie en utilisant de la chaux hydratée ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) pour précipiter le calcium et le magnésium dissous respectivement sous la forme de carbonate de calcium et d'hydroxyde de magnésium insolubles. Après sédimentation ou décantation, ces composés insolubles

sont éliminés par filtration. La chaux utilisée pour l'adoucissement de l'eau est considérée comme entièrement carbonatée, car le CaO et le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sont absents du sous-produit obtenu, qui contient du calcium sous forme de carbonate (CaCO_3).

Vitesse de la carbonatation

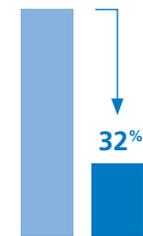
La vitesse de carbonatation naturelle de l'eau potable n'est pas déterminée dans les publications évaluées. On suppose que celle-ci est instantanée,

ce qui signifie que 100% de la quantité d'émissions du process sont absorbés pendant la phase d'utilisation pour l'application eau potable.

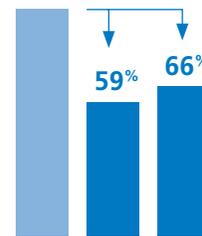
Eau potable

Publications étudiées: 14

Publications contenant des informations et des données pertinentes et fiables: 2



TAUX DE CARBONATATION NATURELLE INSTANTANÉE



TAUX DE CARBONATATION RENFORCÉE INSTANTANÉE

Le taux de carbonatation est affecté par:

- Les caractéristiques des gaz de combustion (composition, température...).
- La formation d'une couche externe de composés calciques, caractérisée par une faible porosité, qui empêche la diffusion du CO₂.
- Le processus de traitement des gaz de combustion a un impact sur le taux de carbonatation: une conception sous-optimale peut conduire à un dosage spécifique plus élevé pour l'élimination des acides (rapport stoechiométrique plus élevé), ce qui augmente la réaction potentielle avec le CO₂ des gaz de combustion et donc la carbonatation naturelle.

Le taux de carbonatation est affecté par:

- La température:
 - 20-30 °C pour la carbonatation à base aqueuse,
 - supérieure à 350 °C pour la carbonatation gaz-solide.
- Ratio liquide-solide pour la carbonatation à base aqueuse:
 - ratio liquide-solide 0,2-0,3 pour une carbonatation optimale.
- La présence de SO₂:
 - le SO₂ obstrue les pores du résidu de dépollution de l'air.

Utilisation de la chaux dans le traitement des gaz de combustion

La chaux est utilisée pour éliminer les gaz acides (HCl, SO_x, HF) contenus dans les gaz de combustion générés par les installations telles que: centrales électriques à combustibles fossiles, combustion de la biomasse et installations d'incinération des déchets. Un procédé de traitement des gaz de combustion peut être semi-sec ou sec, selon la forme de chaux utilisée.

Dans les procédés (semi-)humides, la chaux est utilisée sous forme de solution ou de suspension aqueuse, c'est-à-dire sous forme de lait de chaux

ou de boue de chaux (Ca(OH)₂). Au cours de la réaction avec les gaz de combustion dans les procédés par voie humide, la réaction produit une boue à traiter. Alors que dans les procédés semihumides, l'eau s'évapore et les produits de la réaction sont secs. Dans les procédés (semi-)secs, la poudre de chaux hydratée (Ca(OH)₂) est directement fournie comme absorbant. Dans les deux procédés, les produits de la réaction sont séparés dans une unité de dépoussiérage classique (généralement un filtre à manches).

Le processus de carbonatation

Au cours du traitement des gaz de combustion, la chaux réagit avec le HCl, le HF et le SO_x, mais aussi avec le CO₂, formant ainsi du carbonate de calcium.

En raison du court temps de contact entre l'absorbant de chaux et le gaz polluant, généralement de l'ordre de quelques secondes, et des limites cinétiques des réactions chimiques, la chaux est fournie en excès par rapport aux gaz acides attendus, généralement dans un rapport stoechiométrique de 1,3 à 2,5. En conséquence, les résidus solides

générés par le procédé, appelés résidus de la lutte contre la pollution atmosphérique (APCR), contiennent des quantités de chaux libre disponible pour la carbonatation. La carbonatation améliorée des APCR a été largement proposée comme technologie pour améliorer leur stabilité chimique et leur comportement de lixiviation avant leur élimination finale ou leur recyclage. En outre, la carbonatation améliorée des APCR permet un piégeage contextuel du CO₂ directement à la source d'émission de CO₂ où ces résidus sont générés.

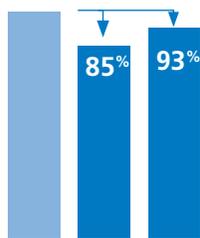
Traitement des gaz de combustion

Publications étudiées: 39

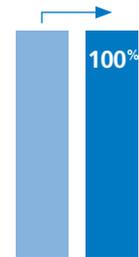
Publications contenant des informations et des données pertinentes et fiables: 23



PÂTE À PAPIER ET PAPIER



TAUX DE CARBONATATION NATURELLE
INSTANTANÉE



TAUX DE CARBONATATION RENFORCÉE
INSTANTANÉE

Le taux de carbonatation est affecté par:

- La vitesse de dissolution de l'hydroxyde de calcium dans la boue.
- La pressurisation de la réaction de carbonatation.
- L'utilisation d'additifs spécifiques.



L'utilisation de la chaux dans la production de pâte à papier et de papier

Le précipité de carbonate de calcium (PCC) est largement utilisé comme pigment de revêtement ou comme charge dans la pâte à papier et le papier, mais aussi dans d'autres applications industrielles. Le PCC est produit chimiquement en combinant le dioxyde de carbone (CO_2) avec la chaux (CaO) dans des conditions d'exploitation contrôlées. La boue de chaux hydratée est mise en contact avec des gaz de combustion contenant du CO_2 , ce qui entraîne une recarbonatation de la chaux. Ainsi, le carbonate de calcium se reforme, et étant insoluble dans l'eau, il précipite.

La séparation des impuretés de la boue de chaux permet de garantir une grande pureté du PCC.

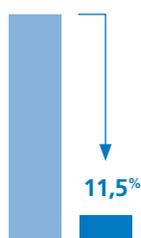
La précipitation peut produire chacune des trois formes cristallines (calcite, aragonite et vatérite) en fonction des conditions de réaction. Les caractéristiques du PCC peuvent être adaptées en régulant la température, la concentration et le débit de CO_2 , la vitesse d'agitation, la taille des particules, la concentration de la boue de chaux hydratée et l'utilisation d'additifs.

Pâte à papier et papier

Publications étudiées: 52

Publications contenant des informations et des données pertinentes et fiables: 13





TAUX DE CARBONATATION NATURELLE
VITESSE NON SIGNALÉE DANS LA LITTÉRATURE ÉVALUÉE

Le taux de carbonatation naturelle est affecté par:

- La composition de la boue rouge.
- Le temps d'exposition depuis la dissolution des minéraux contenant du calcium généralement présents dans la boue rouge.
- Le degré d'agitation pendant le stockage de la boue rouge et, par conséquent, le nombre de surfaces exposées au CO₂ atmosphérique.

L'utilisation de la chaux dans la production d'aluminium

La chaux est utilisée dans le procédé Bayer, principal moyen de raffinage du minerai de bauxite pour l'extraction de l'alumine. Au cours du procédé Bayer, la bauxite est dissoute dans une liqueur caustique contenant de la chaux. Ce procédé produit deux flux de sortie: une lessive riche en alumine qui est utilisée pour la production ultérieure d'aluminium et un résidu solide, appelé boue rouge, à éliminer.

Ce résidu est une boue alcaline dont la teneur en eau est d'environ 50 à 70% et dont le pH est généralement supérieur à 13. L'élimination actuelle des boues rouges consiste à les empiler à sec pour les épaisir jusqu'à ce qu'elles atteignent une teneur en matières solides d'au moins 48-55%. La boue rouge épaisie est ensuite stockée de manière à ce qu'elle se consolide et sèche.

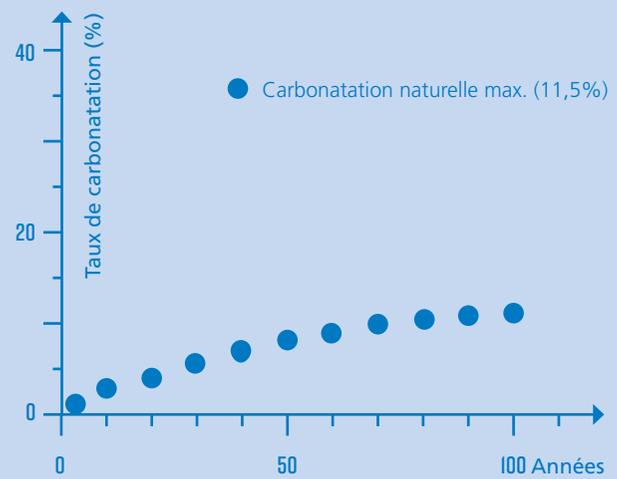
Le processus de carbonatation

La carbonatation naturelle des boues rouges implique à la fois la carbonatation de l'eau de porosité et des réactions en phase solide de dissolution de l'aluminate tricalcique (ATC) et de précipitation de la calcite.

Pour neutraliser la boue, en réduisant son pH, différentes méthodes de neutralisation sont proposées au moyen d'eau de mer ou de technologies utilisant des saumures artificielles riches en Ca et Mg. Une autre neutralisation est basée sur le CO₂, c'est-à-dire une carbonatation dans des conditions améliorées.

Vitesse de la carbonatation

La vitesse de la carbonatation naturelle n'est pas rapportée dans les publications étudiées. Une carbonatation se produisant sur une période de 100 ans est considérée comme le pire des scénarios. Ce graphique fournit une représentation estimée de ce scénario.



Aluminium

Publications étudiées: 41

Publications contenant des informations et des données pertinentes et fiables: 26

DÉFINITIONS

MORTIERS À BASE DE CHAUX ÉTEINTE

Dans la plupart des applications de matériaux de construction, y compris les mortiers, les enduits et les plâtres, on utilise l'hydroxyde de calcium, connu sous le nom de chaux hydratée ou chaux éteinte. Elle durcit lentement en réagissant avec le CO₂ de l'atmosphère pour former à nouveau du carbonate de calcium, une réaction connue sous le nom de carbonatation. La chaux qui réagit ainsi est appelée «chaux aérienne» (ou éteinte), car elle ne réagit qu'avec l'air.

CALCINATION

Désigne le chauffage du calcaire ou d'autres roches composées principalement de carbonate de calcium (CaCO₃) pour produire de la chaux vive ou de la chaux brûlée, c'est-à-dire de l'oxyde de calcium (CaO). Au cours de la décomposition thermique (calcination) du CaCO₃, deux produits sont générés: le CaO et le CO₂.

PUITS DE CARBONE

Désigne les systèmes naturels qui absorbent et stockent le dioxyde de carbone de l'atmosphère.

CHAUX CARBONATÉE

Part de la chaux qui a été transformée en CaCO₃ (carbonates) par réaction avec le dioxyde de carbone (CO₂).

CONSTANTE DE CARBONATATION (K)

Paramètre de l'équation qui exprime la progression de la carbonatation par sa profondeur rapportée au temps (t) pour les matériaux de construction: profondeur de carbonatation = $K\sqrt{t}$.

PROFONDEUR DE CARBONATATION

Distance entre la surface de la chaux et la profondeur où la chaux est peu ou pas carbonatée. Elle est mesurée avec un test à la phénolphthaléine et est exprimée en mm.

TAUX DE CARBONATATION

Rapport en pourcentage entre la quantité de CO₂ absorbée pendant la carbonatation et la quantité de CO₂ de processus émise pendant la calcination.

CARBONATATION RENFORCÉE

Procédé par lequel la carbonatation est favorisée par une concentration accrue de dioxyde de carbone, et/ou par des paramètres de procédé optimisés tels que la température, l'humidité relative, la surface de réactivité, le pH et autres, en fonction de la matrice de réaction en phase solide, aqueuse ou gazeuse. Ainsi, le temps de carbonatation est réduit.

TRAITEMENT DES GAZ DE COMBUSTION

Gaz de fumée générés par les installations de combustion, en particulier les centrales électriques au charbon et les installations d'incinération des déchets, contiennent une quantité importante de gaz acides (HCl, SO_x, HF). L'élimination des gaz acides peut être réalisée en utilisant différents agents alcalins, tels que la chaux, le calcaire, etc. Cette application est également connue sous le nom de désulfuration des gaz de combustion (FGD) ou d'épuration des gaz de combustion (FGC).

BLOCS DE CHAUX/CHANVRE

Matériau de construction développé à l'origine en substitution des remplissages en torchis dans les bâtiments à ossature de bois. Les composants du bloc de chaux/chanvre sont les chènevottes, les noyaux ligneux hachés des tiges des plants de chanvre (*Cannabis sativa*), le liant de chaux éteinte avec des additifs de ciment pouzzolanique ou de chaux hydraulique et dans certains cas des tensioactifs.

HYDRATATION

Processus consistant à ajouter de l'eau à la chaux vive pour obtenir de l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2), produit de la réaction entre la chaux vive et l'eau.

CHAUX

Terme largement utilisé qui désigne à la fois la chaux vive et la chaux éteinte.

**MORTIERS MIXTES
À BASE DE CHAUX ÉTEINTE**

Aujourd'hui, il est courant d'incorporer un liant tel que le ciment Portland dans les mélanges de mortier. Cela permet un gain rapide de la résistance initiale, et donc une progression rapide de la construction. De la chaux (normalement hydratée) est intégrée dans ces mélanges pour assurer une meilleure durabilité à long terme et une meilleure performance globale de la maçonnerie ; on parle alors d'applications de mortiers mixtes de chaux éteinte.

CARBONATATION NATURELLE

Processus par lequel la chaux réagit spontanément avec le dioxyde de carbone en produisant du carbonate de calcium (CaCO_3) qui le stocke de façon permanente. La réaction est exothermique (émission de chaleur) et donc thermodynamiquement favorable. Selon la matrice de réaction solide, aqueuse ou gazeuse, le CO_2 peut provenir de l'atmosphère, de l'eau ou de toute autre source.

CO₂ DE PROCESS

CO_2 émis par la décomposition du CaCO_3 en CaO et CO_2 . Lorsqu'on parle de CO_2 de process, on ne tient pas compte des rejets provenant de la combustion des carburants, car ils dépendent fortement du type d'énergie utilisé.

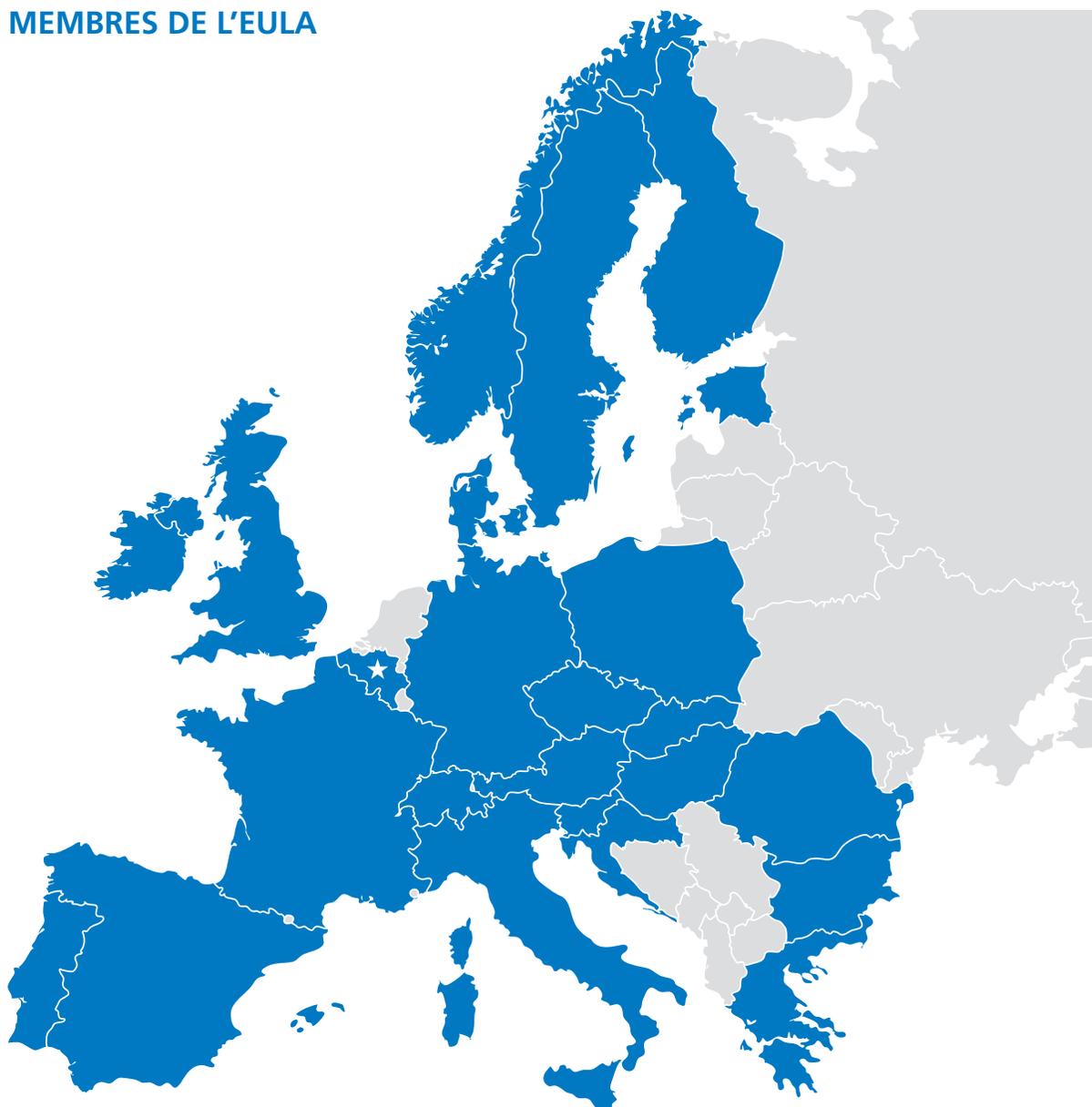
CHAUX VIVE OU ÉTEINTE

L'oxyde de calcium (CaO) est le produit de la calcination.

CHAUX ÉTEINTE OU CHAUX HYDRATÉE

L'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2) est le produit de la réaction entre la chaux vive et l'eau.

MEMBRES DE L'EULA



L'association EuLA (European Lime Association) soutient la réalisation de la vision du secteur de la chaux. Elle a pour but de défendre les intérêts des producteurs de chaux européens au niveau européen et d'aider ses membres à atteindre leurs objectifs nationaux grâce à une voix unique. EuLA est membre d'IMA-Europe (Industrial Minerals Association Europe).



European Lime Association
c/o IMA-Europe
Rue des Deux Eglises, 26
1000 Brussels, Belgique
info@eula.eu | www.eula.eu