

II-1 Introduction

Des effets imputables à des métaux lourds sont connus depuis l'antiquité romaine, quand des pots et des conduites en plomb étaient tenus responsables pour la perte d'intelligence des enfants et le comportement anormal des adultes. Pourtant, le développement industriel utilisant les différents types de métaux lourds ne cesse de s'accroître, et la pollution par ces métaux s'accroît de plus en plus. Parmi ces métaux, nous distinguons le cadmium qui est un métal très toxique et qui se trouve pratiquement dans tous les compartiments de notre planète (Miquel, 2001). Compte tenu de l'accroissement de l'utilisation du cadmium dans les différents secteurs industriels (piles, alliages, semi-conducteurs,), la contamination par ce métal représente un grand problème pour l'environnement ainsi que la santé humaine (Jung et Han, 2001).

Afin de limiter les dangers du cadmium, il est indispensable de traiter les eaux naturelles ou d'épurer les effluents industriels chargés en cadmium avant de les rejeter. Le traitement physico-chimique, s'effectuant dans une station de détoxification, est le plus utilisé pour éliminer cette pollution. Ce traitement peut comporter différents procédés tels que la précipitation chimique à la chaux, la coagulation floculation aux sels d'aluminium ou aux sels ferriques et l'adsorption. Si la norme de rejet ou de potabilité n'est pas atteinte on aura recours à des traitements complémentaires comme l'échangeur d'ions et les procédés à membranes (Cousin, 1980 ; OIE, 2000).

En plus de ces traitements, les procédés biologiques semblent avoir des résultats prometteurs pour la dépollution des eaux.

Au cours de ce chapitre, nous présenterons ces différentes méthodes en insistant sur les conditions d'application de chaque méthode et en mentionnant leurs avantages et inconvénients. Nous développerons plus particulièrement les procédés de précipitation chimique à la chaux et la coagulation au sulfate d'aluminium.

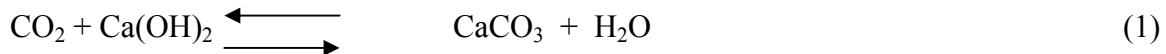
II-2 Procédés par précipitation chimiques à la chaux

C'est le procédé le plus utilisé dans le traitement des eaux pour adoucir l'eau en éliminant sa dureté. Il peut être employé pour l'abaissement du taux de cadmium des eaux destinées à l'alimentation (Dégremont, 1989).

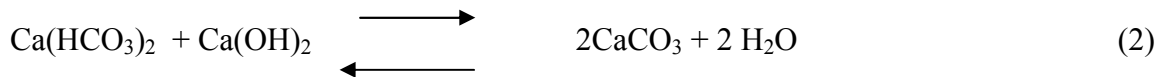
II-2-1 Généralités sur la précipitation chimique à la chaux

La technique de la précipitation chimique à la chaux sert à la diminution de la dureté carbonatée dite dureté temporaire. Sa mise en œuvre est très simple, il suffit d'ajouter de la chaux (hydratée ou vive) à l'eau afin de précipiter CaCO_3 (carbonate de calcium) ou $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (hydroxyde de magnésium) (Kemmer, 1984).

Lorsqu'on ajoute la chaux dans l'eau, elle réagit d'abord avec le CO_2 libre suivant la réaction (Kemmer,1984) :



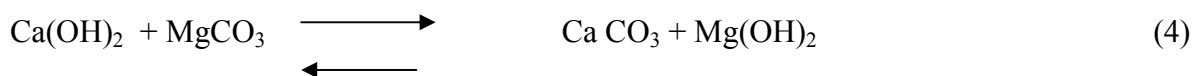
La chaux réagit ensuite avec les bicarbonates de calcium, le pH final est de 9,8 (Richard et Hourtic, 1976)



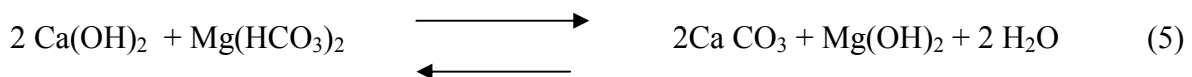
Si l'eau contient des ions $(\text{HCO}_3)^-$ liés à des ions Mg^{2+} , l'ajout de chaux provoque (Kemmer,1984) :



Sachant que le carbonate de magnésium est relativement soluble, l'addition de chaux provoque (Kemmer,1984) :

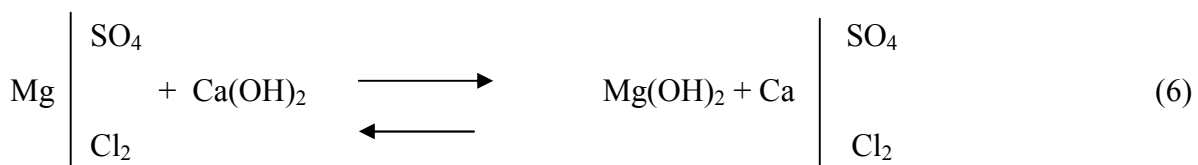


La réaction globale de précipitation de la magnésie Mg(OH)_2 à partir des relation (3) et (4) s'écrit :



Le pH final de la réaction (5) est 11,83 (Richard et Hourtic, 1976)

Lorsque le magnésium est lié à des sulfates ou des chlorures, la magnésie précipite suivant la réaction :



A partir des réactions de (1) à (6), on peut constater qu'un adoucissement avec un excès de chaux en présence de magnésium provoque la précipitation de la magnésie Mg(OH)_2 (Brodsky et Zdenek, 1971). A partir de cela, on peut distinguer deux types de précipitation à la chaux :

- Précipitation partielle à la chaux .
- Précipitation totale à la chaux.

La précipitation partielle à la chaux sert à l'élimination de calcium (dureté calcique). Si l'on désire réduire la teneur en magnésium en même temps que celle du calcium, nous devons augmenter la teneur en chaux au delà de la dose nécessaire pour la précipitation partielle à la chaux afin de pouvoir faire réagir tout le magnésium (Précipitation totale à la chaux). La précipitation chimique à la chaux met en évidence quatre facteurs qui régissent les réactions : la solubilité, la charge des particules, la température et la durée. L'effet de la température sur la précipitation à la chaux est d'une grande importance comme le montre le tableau 14. Lors de la précipitation à chaud à la chaux, le calcium précipite sous forme d'aragonite et les précipités sédimentent rapidement. Par contre, durant la précipitation à froid, le calcium précipite sous forme de calcite et l'hydroxyde de magnésium prend beaucoup de temps pour précipiter (Kemmer,1984).

Tableau 14 : Décarbonation à chaud à la chaux sodée à 105 °C (Kemmer,1984).

Elément (mg CaCO ₃ /l)	Eau brute à 13°C	Après traitement
Calcium	175	15
Magnésium	100	2
Sodium	25	133
Bicarbonate	200	0
Carbonate	0	40
Sulfate	60	60
Chlorure	40	40

II-2-2 Elimination des éléments spécifiques par la chaux

A coté de son rôle primordial qui est la réduction de la dureté, le procédé de précipitation chimique à la chaux peut constituer un traitement d'affinage et d'élimination spécifique de certains éléments minéraux tels que les métaux et le fluor. Ce qui implique des essais en laboratoire afin de bien déterminer les réactions appropriées au procédé, le pH optimal et la température ambiante.

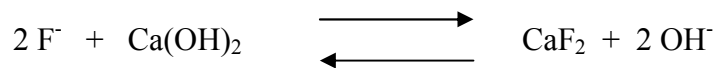
* La défluoruration par la chaux reste le seul moyen économique lorsqu'il s'agit d'eau faiblement ou moyennement chargée en fluor et contenant suffisamment de magnésium. Par ailleurs, en plus de la facilité de la mise en œuvre, ce procédé provoque en même temps une élimination partielle de dureté ainsi que la minéralisation totale (Tableau 15). Les seuls inconvénients de cette technique sont l'obtention d'une eau défluorée ayant un pH élevé qui nécessite une recarbonatation ultérieure, et les grands volumes de boues résultant de fortes doses de chaux utilisées (Youcef et Achour , 2001).

Tableau 15 : Evolution de la qualité des eaux après défluoruration (Youcef, 1998)

Nature d'eau	Eau de forage EDE-MEAO (Ouargla)		Eau de forage El-oued		Eau de forage Biskra	
	Eau brute	Eau traitée	Eau brute	Eau traitée	Eau brute	Eau traitée
Caractéristiques						
Dose de chaux (mg/l)	0	300	0	300	0	400
Fluor résiduel (mg/l)	1,99	0,4	2,81	0,87	3,25	0,91
Rendement (%)	0	97,90	0	69,04	0	72
PH	7,66	5,79	7,79	5,82	7,75	4,98
TH (°F)	104	93	142	138	80	62
TAC (°F)	7,9	2,8	8,5	2,3	15	-
SO₄²⁻ (mg/l)	683	-	817	833	475	700

L'élimination des fluorures se manifeste suivant deux mécanismes :

- L'introduction de chaux conduit à la réaction de précipitation des fluorures sous forme de CaF₂ (Youcef,1998) suivant la réaction :



- Pour les eaux chargées en magnésium, la défluoruration peut s'expliquer par l'adsorption du fluor sur la magnésie (Dégremont,1989 ; Mazounet et Mouchet,1984)

* L'adoucissement à la chaux peut également contribuer à l'élimination de la silice en utilisant généralement un procédé plus ou moins chaud. La silice est adsorbée sur la magnésie précipitée au cours de la réaction de précipitation à la chaux ou en utilisant la dolomite comme agent d'adoucissement. Les résultats obtenus sont représentés dans la figure 3 (Kemmer,1984).

Figure 3 : Réduction de la teneur en silice dans la précipitation à la chaux (Kemmer,1984).

* L'extraction de fer peut être effectuée par l'adoucissement à la chaux en le précipitant sous formes d'hydroxydes. Lors de la précipitation du fer de l'eau, la première étape est d'oxyder le fer en le mettant sous forme ferrique. L'oxydation se fait le plus souvent par le chlore ou par le permanganate de potassium (Kemmer, 1984 ; Dégrémont,1989).

En plus des éléments précités, la précipitation à la chaux peut être efficace pour l'élimination des phosphates dans les égouts des municipalités, le manganèse dans les approvisionnement d'eau brute et différents métaux lourds qui peuvent exister dans les rejets industriels (Tableau 16) (Kemmer,1984 ; Sermejian et al,2002).

Tableau 16 : Rendements d'élimination des métaux lourds par précipitation à la chaux (Semerjian et al, 2002).

Métal	Rendement d'élimination (%)
Nickel	52.3
Chrome	87.3
Cuivre	70.8
Plomb	92.4
Cadmium	82.4
Zinc	80
Arsenic	63
Mercure	77.8

II-2-3 Elimination du cadmium par la chaux

La possibilité d'éliminer les métaux lourds et le cadmium en particulier par précipitation chimique à la chaux a fait l'objet de plusieurs études (Cousin,1980; Kemmer,1984 ; Degrémont,1989 ; USEPA,2001 ;Semerjian et al ;2002). Toutefois, cette élimination n'est effectuée que si le cadmium est à l'état d'ions et non de complexes. Le cadmium précipite sous forme d'hydroxydes ou encore d'hydrocarbonates dans une zone de pH variant entre 8,8 et 9,5 (Degrémont,1989).

Les résultats obtenus au cours du traitement à la chaux sont très satisfaisants et le rendement d'élimination peut atteindre 98% à pH compris entre 8,5 et 11,3 (Cousin,1980). L'USEPA indique une valeur optimale de pH voisine de 10. Du cadmium insoluble (carbonate et hydroxyde de cadmium) peut se former, ce qui nécessite ensuite une coagulation floculation et une filtration. Les volumes des sous produits sont très importants. Une étude (Semerjian et al,2002) a montré que la présence des ions magnésium Mg^{2+} favorise l'abaissement du cadmium par la précipitation chimique à la chaux surtout si le milieu est très basique. L'élimination du cadmium est estimée à 99% en présence de magnésium alors qu'elle ne peut dépasser 82,4 % en son absence .

* Concernant la dépollution des effluents industriels d'ateliers de traitement de surface (galvanoplastie, électrophorèse, décapage, ...), elle nécessite la mise en œuvre de divers procédés (oxydation, neutralisation, floculation-décantation) puis le conditionnement éventuel des boues.

Après decyanuration et déchromatation, le pH de l'ensemble du rejet est ajusté dans une plage optimale correspondant à la zone d'insolubilisation des métaux en présence. Le pH auquel les meilleurs résultats sont obtenus se situe généralement entre 8 et 9. Cependant, le cadmium échappe à cette règle et il est pratiquement impossible de l'éliminer correctement en dehors d'une valeur de pH située entre 11 et 12. L'utilisation de la chaux est préférée à la soude du fait qu'elle assure une meilleure décantabilité des matières en suspension et la déshydratation des boues. De plus, la consommation de réactif alcalin étant très importante, la chaux présente l'avantage d'être moins onéreuse que la soude.(Girard et Le Doeuff,1982).

Lorsque des quantités de chaux supérieures à la stoechiométrie sont investies, des ions calcium apparaissent dans le surnageant, augmentant la conductivité électrique de l'eau. Le pH de l'eau peut être supérieur ou égal à 12,5. Ceci peut aboutir à des teneurs en métaux lourds souvent bien inférieures aux normes imposées. Ainsi, lors du traitement de l'eau de la Meuse, à la station de Taiffer, la teneur du cadmium diminue de 5,70 $\mu g/l$ à 0,25 $\mu g/l$ (Masschelein, 1996).

II-3 Procédé par coagulation floculation

La coagulation floculation proprement dite est une technique qui sert à l'élimination des états dispersés. Cependant, elle peut devenir efficace vis à vis de l'abattement de certains éléments spécifiques à condition de se placer dans des conditions optimales souvent différentes de celles exigées pour l'élimination de la turbidité (Lefebvre,1990 ; Semmens et Ayers,1988).

Plusieurs études ont montré que l'élimination du cadmium peut être effectuée par la coagulation floculation en mettant en évidence que le pH et la dose du coagulant ont une grande influence sur les résultats obtenus.

II-3-1 Généralités sur la coagulation floculation

Les processus de coagulation et floculation sont employés pour clarifier l'eau en éliminant sa turbidité. Ils sont largement utilisés dans le domaine du traitement des eaux pour la simplicité de leurs mises en œuvre.

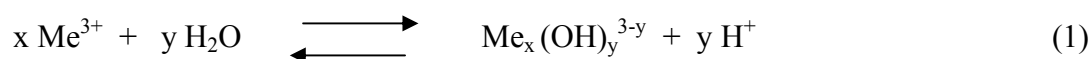
L'eau brute ou trouble contient toujours des matières en suspension, une partie de ces matières peut décanter rapidement. Par contre, l'autre partie peut prendre des mois pour précipiter. Les solides non décantables sont des colloïdes qui sont stables dans les eaux grâce aux charges négatives sur leurs surfaces. La coagulation est la déstabilisation de ces colloïdes en neutralisant les forces qui les gardent séparées. Celle-ci est caractérisée par l'introduction de coagulants chimiques et par l'énergie nécessaire au mélange. Une fois les colloïdes déstabilisés, ils ont tendance à s'agglomérer. La floculation est l'étape de la formation des floccs, elle est favorisée par un mélange lent qui amène les floccs à se réunir.

Les réactifs coagulants les plus utilisés sont les sels ferriques, les sels d'aluminium et les polyélectrolytes spécifiques (Kemmer,1984).

L'adjonction d'un sel de fer ou d'alun conduit à :

- Une acidification du milieu
- Une légère augmentation de la force ionique de milieu.
- La formation des polymères métalliques (produit d'hydrolyse de Al^{3+} ou de Fe^{3+})

D'une manière générale, les produits d'hydrolyse des sels ferriques ou d'alun s'écrivent ainsi :



A partir de l'équation (1), on constate que plus le pH augmente et plus le degré d'hydrolyse devient important.

L'hydrolyse du sulfate d'aluminium dans l'eau peut aboutir aux réactions suivantes, en fonction du pH :

* $\text{pH} < 4,5 \Rightarrow$ Les cations Al^{3+} prédominent (cas peu probable dans les eaux naturelles).



Les mécanismes de coagulation qui peuvent se produire sont (Kemmer,1984 ; Lefebvre,1990):

- Réactions des poly-cations solubles d'aluminium avec les composés à éliminer qui conduit à la neutralisation de charge (Al^{3+} , $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$)
- Réaction d'adsorption des composés sur les précipités insolubles d'hydroxyde d'aluminium ($\text{Al}(\text{OH})_3$).

La mise en œuvre de la coagulation floculation est basée sur les essais de Jar test en laboratoire (Guesbaya, 1998).

II-3-2 Elimination d'éléments spécifiques par coagulation floculation au sulfate d'aluminium

En plus des objectifs classiques (clarification des eaux), la coagulation floculation peut être utilisée pour éliminer de nombreux éléments tels que les matières organiques, les métaux lourds et le fluor. Pour ce faire, des conditions bien précises doivent être prises en considération comme la nature et la dose du coagulant, le pH du milieu et la teneur initiale en élément à éliminer.

* L'abattement des matières organiques notamment les substances humiques s'avère d'une grande importance. Comme les ions minéraux, la matière organique peut réagir avec les sels d'aluminium et ces réactions conduisent à une élimination plus ou moins efficace de la matière organique. Cette élimination est influencée par différents paramètres tels que la nature du coagulant, le pH de l'eau à traiter et la teneur en matière organique surtout en substances humiques. Les rendements d'élimination varient entre 50 et 90 % (Rahni,1992; Guesbaya,1998). La composante minérale semble avoir un rôle promoteur sur l'élimination des substances humiques par coagulation floculation au sulfate d'aluminium car plus la minéralisation totale augmente plus les rendements d'élimination s'améliorent et le taux de coagulant diminue (Figure 4) (Guesbaya, 1998).

Figure 4 : Evolution du pourcentage d'élimination des substances humiques en eaux minéralisées (Guesbaya, 1998).

* La défluoruration des eaux peut être effectuée par la coagulation floculation au sulfate d'aluminium (Mazounie et Mouchet,1984 ; Lagaude et al,1988). Afin d'aboutir à de bons rendements par ce procédé, la zone de pH doit se situer entre 6 et 7,5. L'élimination du fluor est due à son adsorption sur l'hydroxyde d'aluminium formé lors de la coagulation floculation. Il apparaît que les doses optimales du coagulant augmentent globalement avec la teneur initiale en fluor des eaux traitées (Youcef,1998).

* Différents métaux lourds peuvent être éliminés par coagulation floculation au chlorure ferrique. Lors de la précipitation de l'hydroxyde ferrique une coprécipitation de nombreux ions métalliques (Mn, Zn, Mo, Ni,Cd, As) peut se passer. Les rendements de cette coprécipitation varient entre 95 et 100% (Rodier,1984).

Il est à noter que le procédé de coagulation floculation intervient aussi dans la précipitation des eaux industrielles de fabrication et dans le traitement des eaux résiduaires urbaines ou industrielles (Degrémont, 1989).

II-3-3 Elimination du cadmium par coagulation floculation au sulfate d'aluminium

La coagulation floculation semble être un procédé efficace pour la réduction des ions du cadmium à condition de prendre en compte les différents paramètres qui peuvent avoir une influence sur ce procédé comme le pH, la turbidité de l'eau à traiter et la dose du coagulant (Cousin,1980 ; OIE,2000). La coagulation au sulfate ferrique donne des rendements variant entre 10 et 90% (à pH supérieur à 8) (Figure5). Par contre, la coagulation au sulfate d'aluminium donne des résultats nettement moins bon qu'avec le sulfate ferrique comme le montre la figure 6 . Cependant, ce procédé peut être optimisé en utilisant des adjuvants comme la bentonite. Le rendement

d'élimination du cadmium par coagulation floculation au sulfate d'aluminium en présence de la bentonite peut atteindre jusqu'à 72 % alors qu'il ne dépasse pas 40 % en son absence (Cousin, 1980). Il apparaît que la coagulation floculation au sulfate d'aluminium est très efficace pour l'abattement de cadmium insoluble (carbonate et hydroxyde du cadmium) (USEPA,2001).

Figure 5 : Elimination des polluants minéraux par coagulation avec des sels de fer (Cousin,1980)

Figure 6 : Elimination des polluants minéraux par coagulation avec des sels de d'aluminium (Cousin,1980)

II-4 Méthodes diverses de séparation du cadmium

La chaux et le sulfate d'aluminium ne sont pas les seuls agents qui peuvent abaisser les teneurs en cadmium, il existe d'autres réactifs ou matériaux qui ont été testés dans l'espoir de sélectionner le meilleur agent capable de récupérer le maximum du cadmium. L'efficacité de chaque procédé dépend de caractéristiques de l'eau à traiter et son domaine d'application (destinée à l'alimentation, à l'irrigation).

II-4-1 Adsorption sur les argiles

Plusieurs études (Abdelouahab et al, 1987 ; Cousin, 1980; Serpaud et al, 1994) ont mis en évidence les avantages de l'adsorption pour l'élimination du cadmium en montrant que cette technique dépend de plusieurs facteurs comme le pH, la nature chimique des ions présents et la température.

* Abdelouahab et al (1987) en testant quatre argiles bentonitiques pour traiter des eaux résiduaires industrielles chargées en cadmium, ont remarqué que la fixation du cadmium sur ces argiles est conditionnée par leurs caractéristiques physico-chimiques. Les argiles à caractère montmorillonitique de type calcique peuvent ainsi adsorber jusqu'à 58,8 mg de cadmium par gramme d'argile. L'effet du pH a été étudié en observant que l'efficacité de fixation augmente pour une gamme de pH allant de 2 à 7 avec un maximum de 90% pour un pH de 7. Pour des valeurs de pH plus élevées, l'efficacité est nettement diminuée.

* Cousin (1980) a par ailleurs montré que la présence de matières humiques accroît considérablement l'adsorption du cadmium par les sédiments argileux car 50% du cadmium se trouve sous forme échangeable et 50% est sous forme de complexe de coordination. De plus, la présence d'aluminium et de calcium affecte l'adsorption du cadmium sur les argiles et il apparaît que cette dernière diminue quand les concentrations de ces deux ions augmentent.

* Afin de tester les capacités des argiles pour la rétention des ions du cadmium, une étude expérimentale (Serpaud et al, 1994) a été faite sur l'adsorption des métaux lourds Cu, Cd, Zn et Pb par les sédiments d'un cours d'eau pollué par des rejets industriels. Les résultats obtenus ont permis de confirmer l'importance de certains paramètres tels que le pH, la température et la masse de sédiments. Il est apparu qu'une augmentation de pH de 5 à 8 favorise l'adsorption du cadmium de 75 à 90%. Des expériences réalisées en absence de sédiment et avec une solution de 1 mg/l de cadmium révèlent qu'une précipitation chimique partielle n'est possible qu'à partir de pH=9. Ce

qui signifie que l'augmentation de pH provoque l'accroissement du nombre des sites et favorise la précipitation d'oxydes et d'hydroxydes. Par contre, la température semble jouer un rôle inhibiteur car l'accroissement de 10°C à 40°C conduit à une diminution de 85,5% à 64 % de cadmium adsorbé. Le pouvoir de rétention a été étudié suivant les modèles de Langmuir et Freundlich en observant que la capacité ultime d'adsorption peut atteindre 62,9 mg du cadmium par gramme de sédiment.

II-4-2 Adsorption sur charbon actif

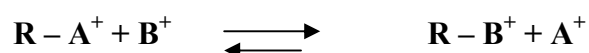
Le charbon actif est largement utilisé dans le domaine du traitement des eaux grâce à sa surface spécifique qui se situe généralement entre 500 et 1000 m²/g (Kemmer,1984).

* L'utilisation du charbon actif pour l'élimination du cadmium donne des résultats sensiblement différents selon le type de charbon utilisé. L'addition du charbon actif en poudre au moment de la floculation aboutit à des résultats peu satisfaisants. Par contre, l'élimination du cadmium peut atteindre 95% dans le cas où le charbon actif est employé en tant que lit filtrant (Cousin,1980).

* Gabaldon et al (1996) ont montré que la réduction des teneurs en cadmium par adsorption sur charbon actif dépend principalement du pH et du rapport molaire cadmium/charbon actif. Il apparaît que le meilleur rendement d'élimination peut aller de 64% à 68% pour une fraction molaire du cadmium égale à 10⁻⁴ M et une concentration de charbon actif de 6,7 g/l.

II-4-3 Echangeurs d'ions et procédés membranaires

Ce procédé est conçu essentiellement pour la déminéralisation des eaux, surtout dans l'industrie. L'élimination du cadmium par ce procédé pourrait se révéler d'une grande importance notamment au moyen de clinoptilolites et zéolites qui ont un caractère sélectif de l'échange. Il apparaît que le cadmium éliminé résulte de l'échange qui se passe entre les cations du cadmium et les cations de sodium ou de l'ammoniaque de la zéolite (Renaud et al, 1980). Les réactions d'échanges d'ions sont réversibles et sélectives et peuvent s'écrire comme suit :



Où R est le squelette de la résine. Ces réactions se font en milieu acide pH = 2 à 3 en utilisant de l'acide sulfurique. Les résines de types de sodium ou hydrogène sont les plus utilisées pour éliminer le cadmium (OIE,2000).

Les procédés à membranes ont connu un essor important passant du stade laboratoire au stade industriel. Ainsi, l'osmose inverse, l'ultrafiltration et plus récemment la nanofiltration ont été appliquées à l'épuration d'effluents contenant des polluants minéraux.

* Dans le cas de l'ultrafiltration, cette étape de séparation doit être précédée de la complexation du cation métallique dissous par un polymère hydrosoluble (Benbrahim et al, 1998). Cependant, l'utilisation de ce procédé pour le traitement des eaux naturelles est limitée par la présence des ions calcium qui entrent en compétition avec le cadmium (Ennassef et al, 1989).

* Le procédé d'osmose inverse utilise des membranes semi-perméables qui peuvent fournir une eau de bonne qualité en éliminant les formes solubles de cadmium ou de mercure. Toutefois, les installations coûtent très cher et nécessitent une maintenance rigoureuse. Ce type de membranes peut être très sensible à la qualité chimique de l'eau ; ce qui impose un prétraitement pour éliminer les matières en suspension, la dureté de l'eau et ajuster le pH et la température du milieu (USEPA, 2001).

II-4-4 Biosorption

Les techniques conventionnelles de l'élimination du cadmium (Précipitation chimique à la chaux, coagulation floculation, adsorption, échangeurs d'ions) peuvent présenter quelques inconvénients comme le coût, la production de grands volumes de déchets et l'inadaptation aux normes de rejet ou aux débits. C'est pourquoi on a commencé depuis une vingtaine d'années à mettre en oeuvre des méthodes qui utilisent des microorganismes ayant l'aptitude de fixer des quantités importantes de cations métalliques telles que les bactéries, les algues, les champignons et les levures (Benguella et Benaissa, 2000). Divers matériaux biosorbants ont été testés dans le but de choisir le meilleur qui peut absorber et accumuler le cadmium.

* La chitine semble montrer une affinité vis à vis des ions du cadmium et ses isothermes suivent le modèle de Langmuir. La capacité ultime d'adsorption est de 15 mg/g (Benguella et Benaissa, 2000).

* Deux mousses aquatiques, *Frontinalis dalecarlica* et *Platyhypnidium riparivide*, ont été utilisées afin d'étudier leurs capacités d'accumulation et d'élimination du cadmium. Il apparaît que ces deux mousses présentent de grands pouvoirs d'accumulation du cadmium et que cette dernière est influencée par plusieurs facteurs tels que la concentration du cadmium, la dureté de l'eau, le temps d'exposition et de l'espèce de mousses. L'accumulation totale du cadmium est inversement proportionnelle à l'augmentation de la dureté (Gagnon et al, 1999).

* Pour nettoyer les eaux et les terres contaminées par les métaux lourds, on entreprend actuellement la phytoremédiation qui consiste à recultiver des plantes à fibres ayant des capacités importantes d'accumulation des métaux lourds et une augmentation considérable de biomasse. Parmi les plantes recultivées, on distingue le saule qui peut réduire de 20% les quantités de cadmium disponible, le chanvre, le lin, le gazon (Kozlowski et al,2000).

Il est à noter que l'accumulation et l'élimination du cadmium dans les bioindicateurs ne sont généralement pas des phénomènes linéaires (Gagnon et al, 1999). Les matériaux biosorbants ne sont pas efficaces pour les impuretés non biodégradables ou dans le cas où l'eau à traiter contient des substances toxiques pour le développement des micro-organismes (Semerjian et al,2002).

II-5 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons pu présenter les différentes techniques qui peuvent servir à l'abattement des teneurs en cadmium dans les eaux. Tous les procédés décrits sont apparus comme ayant des efficacités variables mais dépendant fortement du pH de l'eau. Les procédés physico-chimiques les plus utilisés à l'échelle industrielle sont ceux liés à des phénomènes de précipitation par la chaux et les sels d'aluminium et d'adsorption sur différents matériaux poreux. Les procédés biologiques restent encore à l'état d'étude en laboratoire mais semblent toutefois prometteurs.

