

Pawlowski, 1986).

II.1.6 Les textiles échangeurs d'ions

Lors de ces dernières années, nous notons l'apparition d'un nouveau matériau échangeur d'ions dit « textile échangeur d'ions (TEI) » (Berdous et Akretche, 2002). Les textiles échangeurs d'ions sont nés des recherches effectuées plus de 20 ans par l'Institut Textile de France et résultent de l'association par machines textiles de fibres à fonction échangeurs d'ions. Ils peuvent être constitués de fibres naturelles, artificielles ou synthétiques sur lesquels ont été fixés des sites fonctionnels échangeurs d'ions et se présentent sous la forme d'un média tissé, tricoté, sous forme de papier ou de poudre suivant le domaine d'application et les conditions d'utilisation envisagées (Berdous et Akretche, 2002). La fonction d'échange d'ions est conférée au matériau textile par une copolymérisation de monomères ioniques spécifiques initiés par voie radiochimique, soit sous un rayonnement Gamma, soit sous un faisceau d'électrons accélérés (Chatelin et al., 1987). Les TEI sont des matériaux macroporeux régénérables, non-réticulés, qui possèdent de part leur structure et la mobilité des greffons échangeurs d'ions, une haute cinétique d'échange, supérieure à celle des résines échangeuses d'ions. En traitement d'effluent, ces TEI permettent notamment de traiter d'importants volumes sans perte de charge notable.

Ces matériaux sont utilisés en traitement d'effluents liquides et gazeux, en traitement des boues et en protection des sols, en catalyse, en production d'eau ultrapure et comme moyen de destruction de l'algue *Caulerpa Taxifolia* (Dejean, 1997) qui s'étend en Méditerranée.

Ils ne sont pas utilisés en tant que séparateurs mais permettent d'optimiser certains procédés électromembranaires en augmentant la conductivité électrique des solutions diluées en conséquence celle de tout le monde.

L'équipe de Berdous (Berdous et Akretche, 2002) a mis au point un procédé utilisant des membranes échangeuses d'ions pour la récupération de métaux tels que le cuivre et l'argent, par dialyse de Donnan. Toutefois, le phénomène d'osmose réduit l'efficacité de l'opération. Les auteurs ont alors combiné MEI et TEI, ce qui permet d'améliorer le rendement car les propriétés hydrophiles du textile permettent de diminuer le flux d'eau et donc favorisent le transfert d'ions.

II.1.6.1 Structure des textiles échangeurs d'ions (Boutemine, 2009 ; Kourda, 2000)

La structure du squelette des textiles échangeurs d'ions elle peut être de deux sortes :

- Squelette cellulosique : le polymère tronc sur lequel sont greffées les fonctions d'échange, est constitué d'un matériau cellulosique pouvant être une fibre native (coton, lin, chanvre, ramie) ou une fibre de dérivé cellulosique (viscose, acétate, triacétate de cellulose).
- Squelette polypropylène : le polymère tronc est constitué par les fibres de polypropylène qui ont l'avantage d'être chimiquement inertes et de résister aux acides et aux bases fortement concentrés.

II.1.6.2 Utilisations des textiles échangeurs d'ions

Le principe de fonctionnement des textiles échangeurs d'ions, se révèle semblable à celui des résines synthétique, de plus la nature de substrat (cellulose) permet aux TEIs de combiner à la fonction d'échange, des fonctions de filtration jusqu'à quelque microns. Les textiles échangeurs d'ions ont potentiellement un vaste champ d'application, allant de la conception de vêtement de protection à l'épuration d'effluents de centrale nucléaire ([Chatelin et al., 1987](#)) :

- Vêtements de travail: fabrication de blouses de travail antiacides ou et antibases.
- Epuration de l'air : extraction des vapeurs à caractère acide ou basique, produits de fermentation aminés, ionisation des gaz dilués ([Sugo et al., 1994](#)).
- Epuration des eaux et des effluents : c'est le domaine où les TEI ont été le plus amplement expérimentés. Parmi les principaux secteurs d'applications nous citerons l'hydrométallurgie et la galvanoplastie : détoxification, recyclage des effluents, récupération des métaux, confinement des boues d'hydroxydes ([Combes, 1980](#)).
- L'industrie chimique et pharmaceutique : déminéralisation, catalyse supportée, extraction de macro ions ([Combes, 1980](#)).
- Le nucléaire : décontamination des traces radioactives, retraitement des déchets ([Kourda, 2000](#)).

Les textiles échangeurs d'ions peuvent, en outre, être associés avec d'autres procédés séparatifs ([Boutemine, 2009](#) ; [Kourda, 2000](#)):

- Couplage TEI/résine : la disposition des TEI en amont des résines échangeuses d'ions permet l'élimination des macro- ions avant le passage de l'effluent sur résine.
- Couplage électrodialyse et ou électrolyse/TEI dans les deux cas, les TEI sont placés en aval, l'objectif est de capter la fuite ionique par les TEI dès que le fonctionnement de la technique électrochimique n'est plus économiquement valable (solutions diluées).

- Couplage ultrafiltration/TEI et TEI/osmose inverse : dans ce dernier cas, l'insertion des TEI avant osmose inverse devrait permettre d'éviter un encrassement prématuré des membranes et de prolonger leur durée de vie.

II.2 L'électrodialyse (ED)

L'ED est une technologie membranaire qui utilise l'énergie électrique pour transférer des espèces chargées. Il s'agit à l'origine, dans les années 1930, d'utiliser un courant électrique pour accroître le transfert de matière des espèces chargées par rapport à celui obtenu par une simple dialyse. A l'heure actuelle, l'ED utilise des membranes spécifiques, disposées en alternance orthogonalement à un champ électrique. Le réacteur est constitué d'un empilement de membranes, souvent désigné par le terme « stack », lui-même composé d'une répétition de motifs élémentaires identiques, montés dans un arrangement type « filtre-presse ».

II.2.1 Définition de la dialyse

Le terme de dialyse désigne la diffusion d'un soluté à travers une membrane qui lui est sélectivement perméable tout en étant imperméable au solvant. La dialyse est donc une méthode de séparation membranaire dont le moteur est la différence de concentration des constituants dissous de part et d'autre de la membrane. Les solutés migrent pour égaliser les potentiels chimiques de part et d'autre de la membrane (figure II.8).

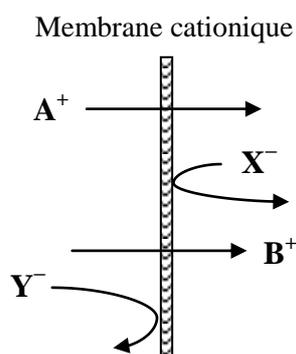


Figure II.8: Principe de la dialyse de Donnan.

La dialyse sert à extraire les matières indésirables d'un fluide, la séparation s'effectuant en fonction de la masse moléculaire dans le sens concentration élevée vers concentration faible.

II.2.2 Principe de l'électrodialyse

On sait que lorsqu'on soumet un liquide contenant des espèces ioniques à un champ électrique grâce à deux électrodes plongées dans le milieu entre lesquelles on applique une DDP, les cations et les anions migrent respectivement vers les électrodes positives et négatives où ils se déchargent : il y a électrolyse.

Si l'on place sur le trajet des ions une série de membranes permselectives, les unes aux anions, les autres aux cations, alternativement, la migration est limitée dans les compartiments formés par cette série de barrières. Certains s'appauvrissent tandis que d'autres, dans le même temps, s'enrichissent en espèces ioniques. Ce procédé est appelé électrodialyse (par analogie à la dialyse qui se fait, ici, sous l'impulsion du champ électrique).

Fondée sur les propriétés des membranes échangeuses d'ions homopolaires à ne transférer qu'un seul type d'ions, l'application d'un champ électrique perpendiculairement au plan des membranes permet donc d'extraire en partie ou en totalité les ions contenus dans un fluide et d'opérer ainsi une séparation espèces chargées/espèces neutres. Un schéma explicatif permet de mieux comprendre le phénomène et les flux de transfert qui agissent pendant l'électrodialyse (figure II.9).

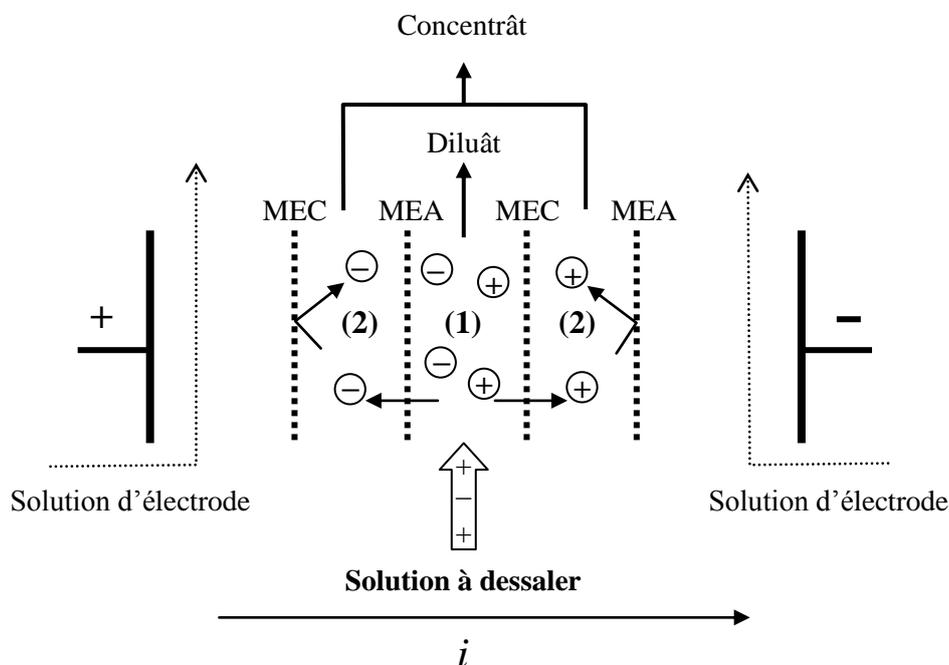


Figure II.9 : Principe de l'électrodialyse.

Les membranes sélectives aux anions (MEA) et aux cations (MEC) sont disposées alternativement entre deux électrodes situées aux extrémités du module. Une cellule élémentaire est constituée de deux types de compartiments (1) et (2). Lors du passage du courant électrique i , les cations sont attirés par le pôle négatif : ils peuvent quitter (1) en migrant à travers la MEC mais sont piégés dans (2) à cause de la MEA. Les anions migrent en sens inverse. Donc, le compartiment (1) dans lequel arrive l'effluent brut s'appauvrit progressivement en espèces ioniques (la solution qui en résulte est appelée «diluée») tandis que le compartiment (2) s'enrichit en ces mêmes ions (concentré).

Les espèces neutres présentes dans l'alimentation ne sont pas modifiées et se retrouvent dans le dilué. Les électrodes sont maintenues au contact de circuits indépendants seulement destinés à assurer la conduction électrique. Dans les installations industrielles, les empilements peuvent atteindre plusieurs centaines de cellules élémentaires dans des assemblages de type filtre-pressé.

II.2.3 Phénomènes liés à l'électrodialyse et limitations de la technique

La capacité de séparation de certains ions d'un mélange ions/molécules neutres est non seulement déterminée par les propriétés des membranes échangeuses d'ions mais aussi par des paramètres opératoires directement liés au module membranaire : ce sont la densité de courant et la densité de courant limite. Une définition de ces paramètres permet d'expliquer les phénomènes auquel tout procédé membranaire est confronté : la polarisation de concentration et le colmatage. Dans le cas de l'ED, la polarisation de concentration est déterminée essentiellement par la densité de courant et les vitesses d'écoulement des flux du dilué et du concentré. Le colmatage, difficile à contrôler et aux conséquences quasi irréversibles est souvent dû à l'adsorption de polyélectrolytes ioniques souvent contenus dans les solutions à traiter : ces composés pénètrent partiellement ou totalement dans la membrane entraînant une baisse définitive de la perméabilité sélective par occupation des sites échangeurs d'ions.

II.2.3.1 Polarisation de concentration (polarisation primaire)

Lors du passage du courant, il s'établit rapidement un profil de concentration lié aux différences de mobilité des ions dans la solution et dans les membranes. Ces dernières sont, en effet, conçues pour que les nombres de transport des contre-ions à transférer soient plus grands dans la membrane que dans la solution. Cela se traduit, à l'interface membrane/solution, par des gradients de concentration dans les couches limites laminaires. Côté dilué, on assiste à une décroissance de la concentration des contre-ions, tandis qu'une augmentation de la concentration

de ces mêmes contre-ions a lieu côté concentré (figure II.10): c'est la polarisation de concentration spécifique à la présence d'un courant électrique.

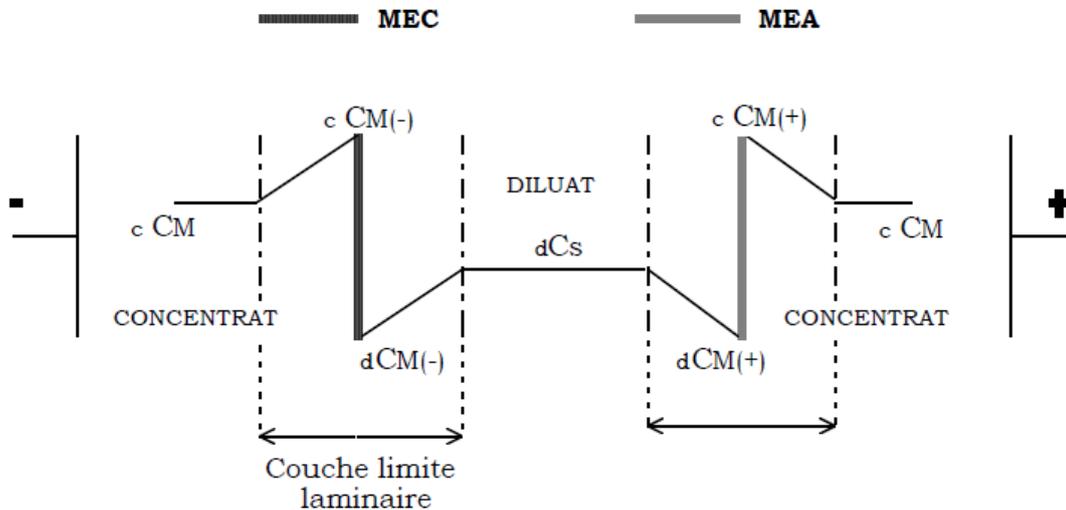


Figure II.10: Gradient de concentration dans les couches limites aux interfaces membrane/solution en présence d'un courant électrique (Violleau, 1999).

La croissance graduelle de la concentration dans la zone interfaciale entre la membrane et le liquide génère un flux diffusionnel de l'interface membranaire vers la solution. Dans le cas de l'ED, la polarisation de concentration est déterminée essentiellement par la densité de courant limite (i_{lim}) (Violleau, 1999).

II.2.3.2 Colmatage des membranes

L'un des problèmes les plus importants en électrodialyse est le colmatage des membranes. Le colmatage est une accumulation ou un dépôt réversible ou irréversible de matière solide indésirable, soit à la surface ou à l'intérieur de la membrane. En général, cette accumulation modifie l'intégrité de la membrane. Cette modification entraîne une baisse générale de la performance du procédé.

Les principaux paramètres physiques qui influencent l'efficacité d'un procédé électromembranaire et la formation ultérieure d'un colmatage minéral des membranes sont la charge, l'hydrophobicité, la taille moléculaire et la solubilité des espèces présentes. De cette façon, la précipitation des espèces ioniques dépend de leur solubilité et leur adsorption qui est liée essentiellement aux interactions électrostatiques avec la membrane.

De façon générale, les membranes échangeuses d'anions sont colmatées par des espèces organiques chargées négativement, tandis que les membranes échangeuses de cations sont plutôt

colmatées par des espèces inorganiques ou par les tensioactifs cationiques. Le dépôt forme une couche qui fait augmenter la résistance électrique du système, causée par la passivation des membranes. Dans certaines conditions, l'encrassement et les changements de propriétés des membranes sont irréversibles, ce qui les rend irrécupérables et donc, ces dernières doivent être remplacées. Les interruptions du procédé pour faire le nettoyage de régénération ou le remplacement de membranes colmatées peuvent être extrêmement chères, ainsi la recherche afin d'éviter ou empêcher le colmatage est justifiée (Hamani, 2012).

Selon la cause, Le colmatage peut se classer en trois types : entartrage par la précipitation de minéraux, encrassement sur la membrane par des protéines et matière colloïdale et empoisonnement par des agents tensioactifs (Bribiesca, 2005). La polarisation de la concentration est un phénomène auto-catalytique qui explique la formation de plusieurs types de colmatage, mais ce n'est pas le seul qui peut en occasionner un. L'empoisonnement des membranes par des agents tensioactifs en est un autre exemple. Un phénomène qui peut aussi changer drastiquement les conditions du milieu et entraîner la formation d'un colmatage est la fuite de proton H^+ à travers la membrane échangeuse d'anions (MEA). Cette fuite est causée par une haute concentration des ions H^+ qui sont attirés par la cathode et qui ne s'arrêtent pas à l'interface de la MEA. Ces ions, en traversant la matrice polymérique, se combinent avec les accepteurs de protons (espèces acides par exemple) présents dans les interstices de la membrane (Hamani, 2012).

II.2.3.3 Densité de courant limite

Si la densité de courant augmente (en augmentant la tension appliquée aux bornes du module) cela provoque un accroissement du flux d'ions jusqu'à ce que la concentration à la paroi membranaire devienne nulle. C'est la densité maximale de courant qui peut être atteinte. Elle est appelée densité de courant limite et notée i_{lim} (Strathmann, 1985).

$$i_{lim} = \frac{z_i \cdot F \cdot D_i \cdot C_i^S}{\delta \cdot (\bar{t} - t)} \quad (\text{II.16})$$

δ est l'épaisseur de la couche limite.

Une réflexion sur le transfert des ions du compartiment de dilution vers le compartiment de concentration peut être menée en mesurant l'évolution de l'intensité I en fonction de la tension appliquée U aux bornes du module (Tishchenko, 1991). La courbe obtenue à l'allure suivante (figure II.11).

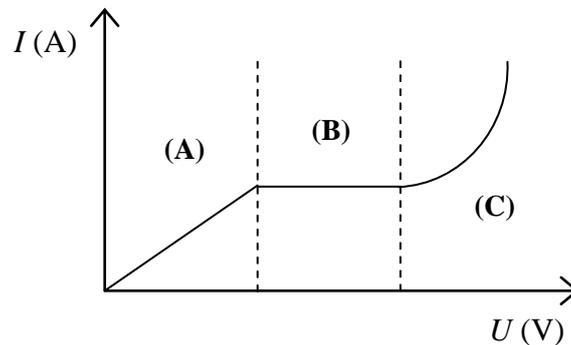


Figure II.11: Evolution de l'intensité I en fonction de la tension appliquée U aux bornes de l'empilement

On y observe trois parties distinctes. Une région pratiquement linéaire, notée (A), rend compte, par la valeur de la pente de la portion de droite, de la somme des résistances dues à l'électrolyte et aux membranes, et du terme de polarisation de concentration. Dans cette zone, la loi d'Ohm $U=R.I$ est vérifiée. Un palier, noté (B), marque l'état de polarisation totale de la cellule : il donne la valeur de l'intensité de courant limite qui est conditionnée par l'apport des ions à la membrane par le flux dû au potentiel électrique, le flux diffusionnel et le flux lié à la convection. Au-delà, l'intensité se remet à croître (C). Ceci n'est pas dû à une reprise du transfert des espèces en solution mais à l'électrolyse de l'eau. En effet quand la tension devient suffisamment grande, le courant appliqué sert à la dissociation de l'eau en H^+ et OH^- qui transporte à leur tour le courant. Ceci entraîne une surconsommation néfaste d'énergie, des variations de pH pouvant occasionner des dégradations irréversibles et une augmentation de la résistivité du milieu. L'efficacité du procédé est donc altérée. Il faudra donc toujours opérer en deçà de la valeur de la densité de courant limite (Violleau, 1999).

En pratique, cette valeur est déterminée en mesurant l'intensité I (en A) pour une tension U (en V) croissante appliquée aux bornes de l'empilement. L'intensité I et la densité de courant i sont liées par l'expression :

$$I = i \cdot a \quad (\text{II.17})$$

Où, a est l'aire de la membrane.

La densité de courant limite peut être déterminée par la méthode Cowan et Brown (Cowan et Brown, 1959). En portant: le rapport U/I en fonction de $1/I$, le point de changement de pente P, appelé point de polarisation donne la valeur de I_{lim} (figure II.12).

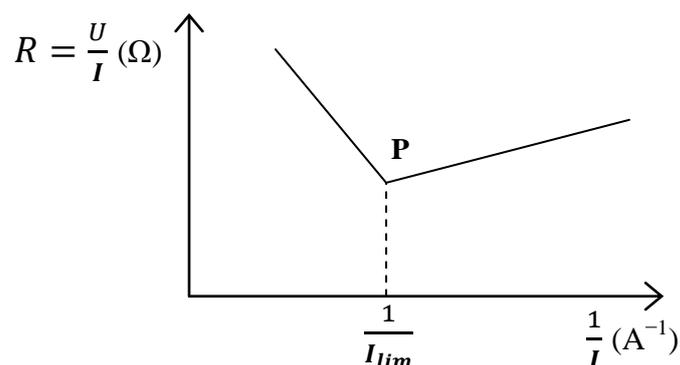


Figure II.12: Détermination expérimentale de la valeur de I_{lim} .

La densité de courant limite i_{lim} est donc une fonction directe de la concentration ionique de la solution à déminéraliser. Lors de l'électrodialyse, au fur et à mesure que la concentration en ions diminue, le courant limite diminue.

S'il est dépassé, la concentration à l'interface membrane solution tend vers zéro et la résistance de la solution tend vers l'infini : ceci crée un échauffement local pouvant entraîner une détérioration irréversible de la membrane (brûlure, variation de pH). i_{lim} doit donc être impérativement connu et maîtriser tout au long de l'électrodialyse. Pour cela, il sera intéressant de déterminer i_{lim} à concentration constante. Les conditions opératoires pourront alors être fixées de manière à ne jamais dépasser i_{lim} .

II.2.3.4 Défaut de permselectivité des membranes

Un autre phénomène tend à diminuer l'efficacité des procédés électromembranaires est la perte de permselectivité des membranes et en particulier les MEA en milieu acide concentré. En effet, une fuite en protons à travers la membrane apparaît et s'intensifie lorsque la concentration en acide augmente. Ceci est dû à la très grande mobilité des protons dans la membrane lorsque les conditions d'exclusion de Donnan sont dépassées (Boulehdid, 2008).

II.2.3.5 Aspect énergétique de l'électrodialyse

Le champ électrique E (en V/m) entraîne une différence de potentiel $U = E \times l$ que l'on relie à l'intensité via la loi d'Ohm :

$$U = R \cdot I = \frac{I}{\Lambda} \quad (\text{II.18})$$

Où, R est la résistance totale (en Ω) du système, c'est-à-dire, est égale à la somme des résistances des membranes et des résistances des solutions :

$$R_{empilement} = \sum R_{membranes} + \sum R_{solutions} \quad (\text{II.19})$$

$$R_{solution} = \frac{l}{\kappa \cdot S} \quad (\text{II.20})$$

Avec, l distance entre les membranes, κ conductivité de la solution en S/m, l'inverse de la résistivité :

$$\rho = \frac{l}{\kappa} \quad (\text{II.21})$$

La conductance Λ (en S) est quand à elle l'inverse de la résistance :

$$R = \frac{l}{\Lambda} \quad (\text{II.22})$$

La résistance de l'empilement est généralement proche de celle de la solution constituant le diluât, étant donné sa faible conductivité électrique. Par ailleurs, la contribution de la résistance électrique des membranes à la consommation électrique est négligeable. Mais cette résistance peut augmenter sensiblement en fonction du temps, en particulier en présence d'espèces colmatantes.

La puissance consommée (en watt) est exprimée par la relation :

$$P_e = U \cdot I = R \cdot I^2 \quad (\text{II.23})$$

On en déduit l'énergie W consommée pendant un temps t :

$$W = \int U I dt = \int R \cdot I^2 dt \quad (\text{II.24})$$

II.2.4 Applications de l'électrodialyse

L'électrodialyse est une technique utilisée pour la concentration, la dilution voire l'épuisement ionique de solutions. Il existe des installations de dessalement d'eau de mer à grande échelle en Arabie Saoudite ou dans les zones où les eaux souterraines sont saumâtres aux USA et en Russie. Dans, ce domaine l'électrodialyse classique est concurrencée par l'osmose inverse. Pour le dessalement des eaux saumâtres, cette technique est plus rentable car elle permet de traiter de beaucoup plus grandes quantités d'eau pour un coût énergétique identique (Maurel, 2006). Par contre, l'électrodialyse est intéressante pour la production de sels. La technique consiste à concentrer l'eau de mer pour augmenter sa teneur en sel avant d'extraire ce dernier. Ceci entraîne une augmentation de la pression osmotique au point de rendre l'osmose inverse difficile à mettre en œuvre. Une opération d'électrodialyse est plus appropriée (Baker, 2004).

D'autre part, l'électrodialyse occupe une large place dans l'industrie agroalimentaire pour traiter les co-produits. Elle est utilisée pour désacidifier les jus de fruits (Baker, 2004), pour purifier les mélasses de sucrerie et pour le dessalement de lactosérum et aussi comme base pour les préparations de laits infantiles (Violleau, 1999). Enfin de nombreux procédés sont proposés depuis une dizaine d'années pour contribuer au recyclage d'effluents de tanneries, de bains d'acides, d'eaux de rinçage contenant des métaux lourds et toxiques (Leitz, 1976).

II.3 Combinaison de l'échange d'ions à l'électrodialyse

Comme nous l'avons signalé précédemment, l'ED possède certaines limites intrinsèques, comme la forte résistance présentée par les solutions de faibles concentrations, où le phénomène de polarisation de concentration peut également contribuer au problème. L'ED seule ne peut que difficilement être appliquée dans le cas de solutions diluées de concentrations de l'ordre du ppm en raison de leur trop forte résistance. Cela limite la valeur du courant électrique qui peut être appliqué, ce qui entraîne une augmentation de la surface de membrane requise, et donc un coût élevé de l'installation. Pour faire face à cette difficulté, des matériaux échangeurs d'ions, plus conducteurs que la solution à traiter, sont introduits dans le compartiment diluât. Ils apportent en effet une conductivité ionique qui permet de réduire la résistance électrique et d'augmenter la surface disponible pour l'échange d'ions. L'efficacité du procédé pour le traitement des solutions diluées est alors améliorée, et deux techniques hybrides sont issues de la combinaison EI/ED : l'électropermutation (EP) et l'électrodéionisation (EDI).

La technique d'EP appelée aussi électrorégénération (ER) continue a été décrite il y a 60 ans par Spiegler et Coryell. (1952) sans connaître une grande application jusqu'à ce jour. Mais face à la croissance des prix des produits purs et aux problèmes de pollution causés par les rejets industriels, le procédé d'ER a pris une place prépondérante dans l'industrie mondiale. L'ER sur une résine a été reprise par Strathmann et Kock. (1980) pour traiter des effluents contenant du plomb. De nombreuses études récentes décrites dans la littérature ont montré également l'efficacité de cette technique pour l'élimination des métaux lourds des solutions de faibles concentrations (Ezzahar et al., 1996 ; Basta et al., 1998 ; Smara et al., 2005 ; Vasilyuk et al., 2004 ; Dzyazko et Belyakov, 2004), des nitrates des eaux potables (Danielsson et al., 2006 ; Kabay et al., 2007), pour la séparation du césium (Mahendra et al., 2013) et encore pour l'épuration des acides (Boutemine, 2009 ; Mecibah, 2012).

L'EDI en continu est un procédé de purification. Les premières publications de l'EDI datent de 1955 (Walters et al., 1955), puis Kollman dépose deux brevets sur la technique en 1957

(Kollman, 1957). Dès 1959, Glueckauf pose les bases de la théorie des transports ioniques lors d'une électrodéionisation (Glueckauf, 1959). Cependant, le premier système n'est commercialisé qu'en 1987 par la société Millipore, sous le nom commercial Ionpure et elle est aujourd'hui commercialisé par la société U.S.Filter. Il est désormais majoritairement employé pour obtenir de l'eau ultra-pure, avec une résistivité de l'ordre de 18 M Ω .cm. Depuis, l'intérêt porté sur cette technique est croissant car il s'agit d'une alternative très avantageuse à l'échange d'ions classique.

II.3.1 Electropermutation

II.3.1.1 Principe du procédé

Ce procédé a été décrit en 1980 par Strathmann et Kock, pour traiter un effluent contenant du plomb (Strathmann, 1980). Ce procédé est représenté schématiquement sur la figure II.13. La résine échangeuse de cations est placée dans le compartiment central de l'électrodialyseur entre deux membranes de même type. Les deux compartiments d'électrodes contiennent une solution d'acide. Dans un premier temps l'ion à éliminer M^+ est fixé sur la résine (initialement sous forme protonée) par échange avec les protons. Le courant électrique appliqué induit une migration des protons à travers la première membrane échangeuse de cations (MEC). Ces protons déplacent les ions M^+ fixés, qui migrent ensuite à travers la deuxième MEC, vers la cathode où ils peuvent soit se déposer, soit se concentrer selon la nature du cation M^+ et l'objectif désiré (Smara, 2005).

L'électroextraction d'un ion M^+ par EP peut être réalisée en une seule étape (électroextraction continue) ou en deux étapes successives (électroextraction discontinue) :

- **L'électroextraction continue** : Le procédé se fait alors en une seule étape pendant laquelle la fixation des cations M^+ apportés par la solution en circulation, la régénération par voie électrochimique des échangeurs ioniques et le transfert des cations M^+ se font simultanément (Ezzahar et al., 1996).
- **L'électroextraction discontinue** : Ce procédé se compose de deux étapes : La première est une étape d'épuration des solutions par fixation des ions M^+ sur les échangeurs ioniques en absence de champ électrique. La circulation de la solution est arrêtée dès que la fuite en ions M^+ dépasse un certain seuil de concentration. La seconde est une régénération proprement dite. Sous l'effet d'un champ électrique, les protons ou autres ions extractants, viennent remplacer les ions M^+ sur la résine et les membranes cationiques ; ensuite les ions M^+ seront alors transférés (Boutemine, 2009).

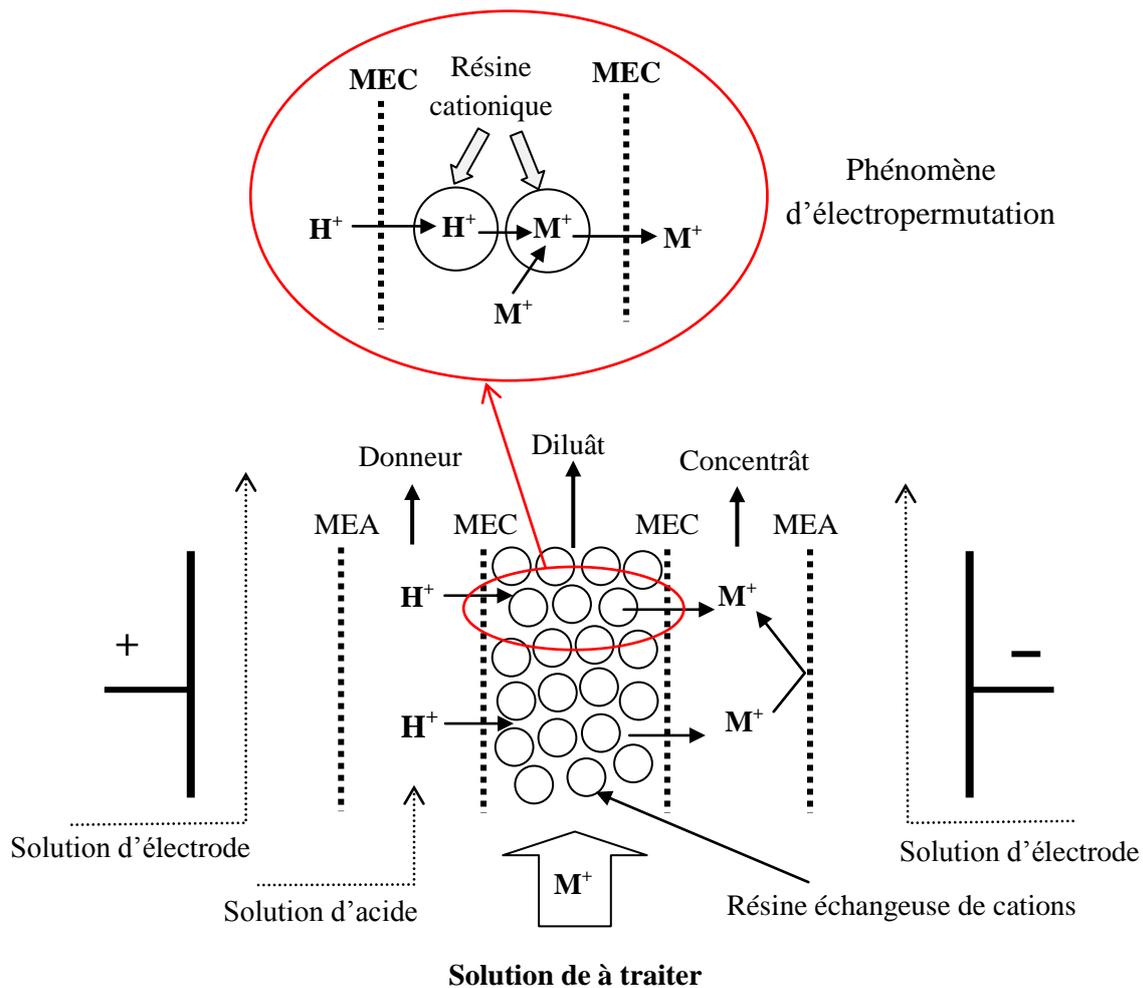


Figure II.13: Schéma du principe de l'électropermutation

Ce procédé se heurte à un phénomène limitatif, dû à la grande mobilité des protons. Le transport du courant par les protons diminue le rendement faradique de transfert des ions à extraire et par suite le rendement de régénération des REI. [Strathmann et Kock, \(1980\)](#), expliquent que pour augmenter le rendement de régénération, la résine doit être saturée en Pb(II) au départ et que l'opération de régénération doit être arrêtée juste au moment où les protons commencent à passer dans le compartiment cathodique. Ils proposent une installation à trois colonnes de REI, cela permet d'exploiter la capacité d'échange totale du matériau. Quand la première colonne est complètement saturée en ions Pb(II), elle est partiellement régénérée, à 60 %, elle deviendra alors la troisième colonne dans la ligne. Cette technique permet d'améliorer le rendement faradique de régénération des REI qui peut atteindre une valeur supérieure à 50 % ([Smara, 2005](#)).

II.3.2 Electrodéionisation

II.3.2.1 Principe du procédé

La figure II.14 présente le principe de fonctionnement de l'électrodéionisation tel qu'il est généralement présenté dans la littérature.

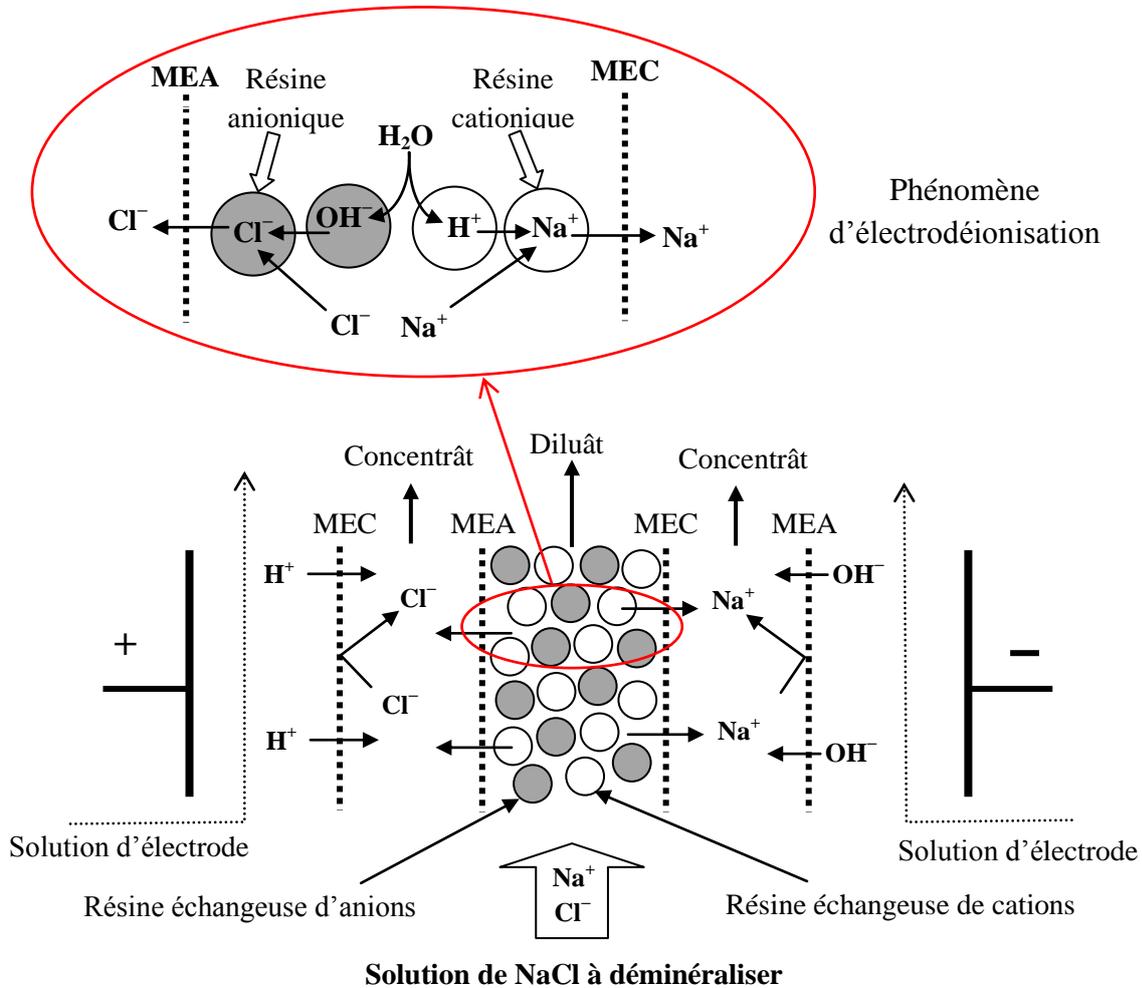


Figure II.14: Schéma du principe de l'électrodéionisation (Ganzi et al., 1987).

L'alimentation est divisée en plusieurs fractions. La fraction d'effluent qui passe dans le compartiment central (diluât) est purifiée tandis que les fractions dans les autres compartiments de part et d'autre sont concentrées. En passant de bille en bille, les ions vont migrer respectivement vers la cathode et l'anode sous l'effet du courant électrique, et traverser les membranes cationiques (MEC) et anioniques (MEA). Ainsi les ions polluants se retrouvent dans les compartiments concentrés, et l'on obtient en sortie un effluent purifié. Souvent, plusieurs compartiments de purification sont alternés avec des compartiments de concentration. Le compartiment de purification est garni d'un lit mélangé de résines échangeuses d'ions

cationiques et anioniques qui captent les ions Na de l'effluent. Usuellement dans la littérature, il est dit que les résines sont régénérées électrochimiquement en continu (Thate et al., 1999) par dissociation de l'eau dans le compartiment produit : les H produits régénèrent respectivement les résines cationiques et anionique du lit mélangé, en prenant la place des ions sodium et chlorure fixés sur les résines.

II.3.2.2 Applications de l'électrodéionisation

Le procédé d'EDI est capable de dessaler industriellement des eaux brutes, aussi bien que d'affiner de l'eau prédéionisée (après traitement par osmose inverse) pour fournir de l'eau ultra-pure atteignant une résistivité de 18 M Ω .cm (Ganzi et al., 1987 ; Matejka, 1971).

A l'échelle industrielle le procédé connaît une application surtout dans les domaines de la pharmacie, de l'électronique, et de production d'énergie électrique. Ces industries ont choisi ce procédé parce qu'il répond aux exigences de production de qualité avec une maintenance quasi-inexistante. En 1995, 600 installations d'électrodéionisation sont recensées dans le monde.

Ce procédé continu de susciter l'intérêt des chercheurs notamment pour la dépollution d'effluents contenant des métaux lourds (Yeon et al., 2004, Grebenyuk et al., 1996 ; Grebenyuk et al., 1998 ; Linkov et al., 1998 ; Vasilyuk et al. 2004 ; Dzyazko et al., 2004 ; Spoor et al., 2001 ; Spoor et al., 2002), ainsi que pour la dénitrification de l'eau de boisson avec l'utilisation de résines échangeuses d'anions sélectives aux ions nitrate (Kesore et al., 1997).

II.3.3 Combinaison Electrodialyse/Echange d'ions sur textiles échangeurs d'ions

Pour les procédés couplant l'électrodialyse et l'échange d'ions, le TEI échangeur de cations a été utilisé pour la première fois par Ezzahar et al., (1996) pour l'élimination de quelques cations des solutions de faibles concentrations. L'EDI a été mise en œuvre au laboratoire par Dejean. et al., (1997) pour la production de l'eau haute résistivité. D'ailleurs, plusieurs auteurs ont également utilisés le TEI à fin d'optimiser ce même procédé pour l'élimination des ions métalliques (Feng, 2007; Song, 2007), la déminéralisation de l'eau (Dejean, 2008), et encore pour la purification de l'acide phosphorique (Elleuch, 2006).

Les deux procédés décrits précédemment ont également été mis en œuvre à l'échelle laboratoire en remplaçant les résines par des textiles échangeurs d'ions (Dejean, 1997 ; Dejean, 1998 ; Laktionov, 1999 ; Ezzahar, a,b1996 ; Basta et al., 1998 ; Kourda, 2000). En effet, de part leur

structure et leur présentation, ces matériaux présentent plusieurs avantages par rapport aux résines (polymère hydrophobe et réticulé, forme sphérique) :

- La nature du polymère constitutif confère au textile une structure macroporeuse qui le rend peu sensible au phénomène de colmatage, et une structure hydrophile qui n'induit qu'une faible perte de charge et permet l'utilisation de débit élevés,
- L'absence de réticulation donne une grande accessibilité aux sites échangeurs, d'où une cinétique d'échange rapide,
- Enfin la présence des textiles sous forme de feuilles, analogue à celle des MEI, apparaît tout à fait adaptée pour une insertion facile dans un empilement d'électrodialyse de type filtre presse, permettant ainsi un bon contact avec les MEIs.

II.3.4 Avantages de la combinaison Electro dialyse/Echange d'ions

Les avantages de ce couplage de procédés sont les suivants :

- Par rapport à l'électrodialyse conventionnelle : La perte d'efficacité de l'électrodialyse en solution diluée est compensée par la présence des résines. La grande surface spécifique de celles-ci fait augmenter le rendement de transfert des ions et permet d'opérer avec des densités de courant plus élevées puisque la conductivité du milieu à traiter augmente et que par conséquent, le phénomène de polarisation primaire se trouve atténué. Les performances de déminéralisation s'en trouvent améliorées.
- Par rapport à l'échange d'ions : La régénération des résines par voie électrique remplace la régénération par voie chimique. Le phénomène de polarisation primaire qui s'opère inévitablement, a lieu non seulement à l'interface membrane/solution, mais aussi à l'interface grain de résine/solution. La dissociation de l'eau s'effectue dans tout le compartiment de dilution et les ions H^+ et OH^- générés vont permettre aux grains de résines échangeuses de cations ou d'anions de retrouver leur forme initiale. La phase de régénération est donc supprimée ce qui évite l'emploi et la manutention de réactifs chimiques agressifs ainsi que le rejet de grands volumes d'effluents salins concentrés.