

Managing irrigation water salinity in viticulture

Maitrise de la salinité des eaux d'irrigation pour la viticulture

J.-L. Escudier¹, B. Gillery², H. Ojeda¹, et F. Etchebarne³

¹ UE PECH-ROUGE, INRA, Université de Montpellier, CIRAD, Montpellier SupAgro, 11430 Gruissan, France

² BMG Holding, 9 rue Stanislas, 75006 Paris, France

³ Chercheur indépendant, 11560 Saint Pierre la Mer, France

Abstract. Although vines are among the least water-intensive crops, the availability and accessibility of good-quality natural water resources, comprising groundwater, stagnant surface water (lakes and artificial reservoirs created by dams), flowing surface water (rivers) and sea water, remain an issue. In this context, reuse of treated wastewater (RTW) offers an alternative resource that has substantial advantages: it can mitigate water shortages, help conserve natural resources and play a part in the circular water economy. Some types of RTW may contain valuable nutrients for plants, but they may also contain high concentrations of dissolved salts. Given that, in the event of low rainfall, excess sodium and chloride resulting from irrigation with some types of water from natural sources or RTW are not leached from the soil, it is vital to obviate any increase in soil salinity. This paper looks at the technologies by which salt levels in irrigation water can be reduced. The membrane techniques studied: reverse osmosis, nanofiltration and electrodialysis are subjected to technical and economic comparisons. In the context of water quality management and a circular economy approach to resources motivated by both technical and economic considerations, electrodialysis can substantially reduce electricity consumption and operating costs. In this case it can therefore be seen as an agricultural water treatment technology that stands the test of sustainability and is reliable and fit for purpose.

Résumé. Même si la vigne reste parmi les plantes cultivées une des plus économes en eau, se pose maintenant la question de la disponibilité et de l'accessibilité à la ressource en eau naturelle de qualité: eaux souterraines (infiltration, nappes), eaux de surface stagnantes (lacs, retenues de barrages) ou en écoulement (rivières, fleuves), eaux de mer, eaux usées traitées (REUT). Certaines de ces eaux peuvent contenir des composés d'intérêts nutritionnels pour les plantes, mais aussi être riches en sels dissous. L'objet de cette communication est d'étudier les technologies permettant d'affiner la teneur en sel de l'eau d'irrigation pour la vigne, quel que soit son origine et son niveau initial. Les techniques membranaires, osmose inverse, nanofiltration et électrodialyse sont ainsi comparées techniquement et évaluées économiquement. Les unes, nanofiltration et osmose inverse, à partir de membranes poreuses ou denses sous pression, consiste en une séparation de quasi tous les éléments dissous de l'eau (anions, cations, mais y compris les nutriments azotés, et minéraux) et ce quel que soit, pour l'osmose inverse, la salinité de l'eau initiale (e.g. eau de mer). L'autre l'électrodialyse, à partir de membranes denses ne filtre pas l'eau, mais extrait une quantité pilotable en ligne, de sels dissous (Na^+ et Cl^- en particulier sélectionnables) sous l'effet d'un champ électrique, afin de l'adapter aux sols ou plantes concernés

1. Eau d'irrigation

1.1. Contexte agricole global

Les terres émergées représentent 13.5 milliard d'ha, 4.8 milliards sont recensées comme cultivables, et 1.5 milliard cultivées (données FAOSTAT, 2017). La surface irriguée représente le 20 % de la surface agricole mondiale, mais elle assure 40 % de la production vivrière mondiale. L'irrigation joue donc un rôle stratégique pour l'amélioration de la productivité. Il existe une pression croissante sur les ressources en eau, amplifiée par la concurrence des autres secteurs utilisateurs d'eau et par le respect de l'environnement. L'eau représente 70 % de la surface du globe terrestre et 1.4 milliards

de km^3 . Mais au niveau mondial, l'eau douce directement utilisable sans dessalement ne représente que 0.6 % de ce volume [1]. 70 % des ressources en eau douce sont utilisées pour l'agriculture contre 20 % pour l'industrie et 10 % pour des usages domestiques, avec des disparités suivant les pays [2].

Dans l'Union Européenne (UE), l'agriculture représente environ 30 % de l'extraction totale d'eau. L'intensité de l'irrigation dans différents pays dépend évidemment du climat, du type de récoltes et des méthodes de culture. Par exemple, le rôle de l'irrigation est complètement différent dans les pays d'Europe de l'Ouest et d'Europe Centrale que dans les pays européens méridionaux, où l'irrigation est essentiellement dédiée à la production agricole. En fait,

la majeure partie des terres irriguées en Europe est située dans les pays du Sud. L'Espagne, l'Italie, la France, la Grèce et le Portugal possèdent 85 % de tout le secteur irrigué de l'UE. Par exemple, en Espagne, l'agriculture irriguée représente 56 % de la production agricole totale mais occupe seulement 13 % de toute la surface agricole en moyenne, mais ceci va à 35 % à 40 % dans certaines régions tel que Valence [3].

1.2. Les besoins en eau de la vigne

La vigne est une des plantes cultivées les moins consommatrices d'eau (450 mm en moyenne par an). Cependant beaucoup de vignobles dans le monde sont cultivés dans de conditions de sécheresse n'arrivant pas à ce seuil minimal de disponibilité en eau. De ce fait l'irrigation devient une technique incontournable pour assurer la productivité et la pérennité du vignoble [4].

Le changement climatique en cours impose une adaptation des techniques culturales pour l'agriculture et en particulier pour la vigne en différentes zones agro-climatiques [5]. Dans la zone méditerranéenne du sud de la France, depuis la fin du XXe siècle des bilans hydriques de plus en plus fortement et précocement déficitaires sont constatés, et la question de l'approvisionnement en eau devient chaque jour plus préoccupant (Fig. 1). Il faut donc irriguer de plus en plus de vignobles.

1.3. Les risques de salinisation des sols

La mise en place de stratégies d'irrigation utilisant des eaux avec une salinité même modérée, permettent d'économiser de l'eau ; mais peuvent favoriser la salinisation du sol [7,8]. Les données de la FAO indiquent que la salinisation des sols concerne maintenant 400 millions d'hectares. Ce phénomène s'accroît significativement. En 1995, 21 % des terres irriguées étaient déjà sujettes à la salinisation [9].

La salinisation réduit les superficies irriguées du monde de 1–2 % par an et frappera le plus durement les régions arides et semi-arides. L'évolution climatique en cours aggrave ce phénomène, car les périodes de fortes sécheresses concentrent en sel les eaux de surface par évaporation. Les utiliser pose problème pour l'agriculture. Par ailleurs, pomper de l'eau douce dans les nappes phréatiques, demande des suivis de salinité rigoureux afin de veiller à un renouvellement suffisant des eaux douces. Ne pas le faire, peut mener à une remontée du niveau de sel des nappes –parfois jusqu'au niveau racinaire– en créant des salifications du sol irréversibles.

De nombreux pays aux climats chauds et secs (e.g. USA, Australie, Afrique du nord,...) font et feront face à une salinisation des eaux de nappe phréatique. Dans le sud de l'Espagne, faute d'eau disponible dans des fleuves et des rivières –jusqu'à-là utilisés (e.g. de Le Tage), la technique de l'osmose inverse a été choisie pour dessaler l'eau de mer, comme source d'eau agricole. En 2004, en lien avec le programme AGUA du ministère de l'environnement, on dénombrait 700 unités de désalinisation d'eau de mer ou saumâtre, dont 22 % étaient destinés à l'agriculture [3].

Une grande attention doit être prise pour les zones côtières, où l'infiltration d'eau de mer aux embouchures peut créer un risque important de salinité des eaux de surface et des sols. La technique d'immersion de vignobles

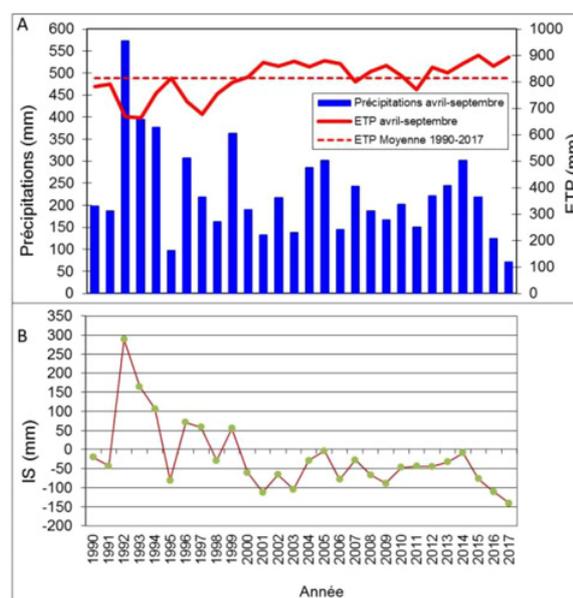


Figure 1. A) Evolution de l'évapotranspiration potentielle totale (ETP) et des précipitations, période avril-septembre. B) Evolution de l'indice de sécheresse (Indice de sécheresse: [6]. Période 1990-2017. INRA, Unité Expérimentale de Pech Rouge, 11430 Gruissan, France.

utilisant l'eau de rivière, pendant l'hiver, était souvent utilisée pour contrôler ce phénomène de salinisation, par exemple, en France dans la zone littorale de l'Hérault (Sérignan) et de l'Aude (plaine de Coursan). Mais depuis quelques années, l'eau utilisée devient de plus en plus rare ou saumâtre (infiltration d'eau de mer) et vu les caractéristiques et la typologie des sols, cela aggrave le problème [10]. Une étude spécifique et un diagnostic ont été réalisés concernant l'état de la pression saline des sols viticoles de Sérignan (34410) et du delta du fleuve Orb au niveau de son embouchure dans la Méditerranée, avec des sols d'origine alluviale et lacustre. Les sols de l'étude présentent une conductivité électrique parfois importante dès la surface et croissante avec la profondeur. Les conductivités électriques sont les plus élevées sur une bande de 0 à 500 m du fleuve Orb, elles diminuent graduellement de 0.5 km à 2.0 km. Trois types de sols ont ainsi été définis: Salisols avec excès de sel, Sodosols avec excès en sodium, et salisodosols alcalino salins [13].

La pluviométrie n'a été que de 350 mm d'eau en 2017 dans les départements de l'Aude (11000) et l'Hérault (34000). Des remontées de sel dans des plaines littorales du sud de la France sont observées, suites aux années 2015 à 2017 particulièrement sèches [11]. Maintenant les flux d'eau –naturellement douce– nécessaires ne sont pas toujours disponibles pour corriger ces remontées de sel.

Le sel est le produit qui résulte de l'action d'un acide sur une base, le sodium (Na^+) est le plus abondant. Les ions Na sont en équilibre en solution liquide avec les constituants de la terre, les argiles en particulier. Mais il n'y a pas que le sodium, il y a aussi des cations Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ et des anions Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} et NO_3^- . Pour connaître la teneur en sel d'un sol, au-delà des analyses chimiques, il est possible d'effectuer des mesures de conductivité électrique (en dS/m ou en mS/cm). Au niveau international, la FAO a validé des seuils de tolérance des cultures au sel [12].

Tableau 1. Lignes directrices pour l'interprétation de la qualité de l'eau pour l'irrigation [12].

Risque	TDS (ppm or mg/L)	EC _{iw} (dS/m or mmhos/cm)
Nul	< 450	< 0.75
Faible	450 – 1000	0.75 – 1.5
Modéré	1000 – 2000	1.5 – 3.00
Sévère	> 2000	> 3.0

1.4. La vigne, la salinité des eaux et la salinisation des sols

La vigne, est une plante considérée comme « sensible » à « moyennement sensible » aux sels [12]. Le seuil de tolérance pour la vigne est entre 2 et 4 dS/m, soit l'équivalent de 1.28 g/l de sel dissous dans la pâte saturée des sols [13].

Presque toutes les eaux contiennent des sels dissous et des oligo-éléments, dont beaucoup résultent de l'altération naturelle de la surface de la terre. En outre, les eaux de drainage des terres irriguées, ainsi que les effluents des eaux usées urbaines et industrielles peuvent avoir un impact sur la qualité de l'eau d'irrigation. La plupart des problèmes de salinité dans l'agriculture résultent directement des sels transportés dans l'eau d'irrigation. Les sels ainsi que d'autres substances dissoutes commencent à s'accumuler, au fur et à mesure que l'eau est absorbée par les plantes et s'évapore de la surface. En l'absence de lessivage naturel par les pluies d'hiver la salinisation devient inexorable. En théorie en zone sèche, à très faible pluviométrie il faudrait presque de l'eau pure pour éviter tout phénomène de concentration des éléments non volatils du sol, et la formation de croûte. Une bonne approche consiste à maîtriser la lixiviation du sol. Ceci consiste à donner à chaque type de culture juste un peu plus d'eau que nécessaire, afin de réduire la salinité dans la zone racinaire. Ainsi les sels sont transportés dans la couche aquifère qui les disperse. Ceci fonctionne à condition que le drainage naturel soit suffisant, ou que les pluies d'hiver limitent l'accumulation de sel [7, 8].

Il existe une corrélation entre la conductivité électrique d'un sol (EC_e) et le rendement agricole d'une plante [12]. Les racines pompent l'eau du sol pour assurer le bon fonctionnement de la plante (photosynthèse, ouverture-fermeture des stomates, échanges gazeux, ...). De ce fait, les racines doivent lutter contre la pression osmotique créée par le sel. Cependant, chez la vigne, la sensibilité à la salinité du sol, peut varier en fonction du porte-greffe [14].

En général, l'eau d'irrigation doit avoir un degré faible ou moyen de salinité (i.e. EC_{iw} de 0.75 à 3 dS/m). Le Tableau 1 montre la relation entre les solides dissous totaux (TDS) et la conductivité électrique de l'eau d'irrigation (EC_{iw}), cela est approximativement : TDS = 640 EC [12].

1.5. Le risque d'excès de sodium dans l'eau d'irrigation

Il existe deux types de problèmes de sel qui sont très différents: ceux associés à la salinité totale et celles associées au sodium (Na). Les sols ne peuvent être affectés que par la salinité ou par une combinaison de salinité et de Na. La conductivité électrique du sol (EC_e) et le

ratio d'absorption du sodium (SAR) sont couramment utilisés pour classer les sols sensibles au sel. Les sols salins (résultant du risque de salinité) ont normalement un pH inférieur à 8.5, ils sont relativement pauvres en Na, ils contiennent principalement des chlorures (Cl⁻) et des sulfates de sodium (Na₂SO₄), de calcium (CaSO₄) et de magnésium (MgSO₄). Les sols sodiques (résultant du risque sodique) ont généralement un pH compris entre 8.5 et 10 [15].

En effet, une grande quantité Na dans l'eau affecte la perméabilité des sols et pose des problèmes d'infiltration. Ceci est dû au fait que le Na présent dans le sol en forme échangeable remplace les ions Ca et Mg adsorbés sur les argiles du sol et cause la dispersion des particules dans le sol. Cette dispersion a comme conséquence l'altération des agrégats des sols. Le sol devient alors dur et compact, lorsqu'il est sec, réduisant ainsi les vitesses d'infiltration de l'eau et d'air, affectant ainsi sa structure [16]. Les sols sableux subiront moins de dommage en comparaison [13].

2. Accès à une ressource qualitative et pérenne de l'eau : focus sur la réutilisation des eaux usées traitées (REUT)

Le recyclage des eaux usées, une ressource habituellement rejeté dans le milieu naturel (cours d'eau ou en mer dans la zone littorale) après avoir subi des traitements réglementaires, s'inscrit dans la logique de l'économie circulaire de l'eau. De ce fait, il faut mettre en oeuvre des technologies adaptées qui permettraient d'aboutir à des usages des eaux traitées qui soient encadrés, pérennes et acceptés de tous.

Les deux principales préoccupations des utilisateurs d'eau usée traitée (EUT) pour l'irrigation sont la quantité et la qualité de cette ressource. La qualité dépend des sources d'eau usée (domestiques, industrielles, pluviales) ainsi que des procédés de traitement d'eau mis en oeuvre. Les EUT doivent répondre à des caractéristiques physiques, chimiques, et biologiques qui elles-mêmes dépendent de l'usage prévu. Cette contrainte nécessite donc une formulation de critères et de normes appropriées pour les utilisateurs ou les consommateurs de cette eau. Plusieurs éléments contenus dans l'eau utilisée pour l'irrigation agricole requièrent l'attention, dont la salinité, la teneur en ions échangeables (Na, Ca et Mg), et en métaux (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Mo, Pb, Zn) [12, 17]. La réglementation française concerne aujourd'hui uniquement les usages liés à l'irrigation agricole, aux espaces verts ou de loisirs. Pour autant, tous les usages non réglementés ne sont pas forcément interdits. Pour cela, mettre en valeur les eaux sortant des stations d'épuration reste encore une démarche innovante en France. Parmi les quelques territoires considérés comme précurseurs au niveau national, se trouve la ville de Gruissan (11430), où fort du constat de la pénurie en eau et à la demande de la cave coopérative de Gruissan, l'INRA (Unité Expérimentale de Pech Rouge et LBE de Narbonne) s'engagent depuis 2011 sur la thématique de la REUT pour l'irrigation de la vigne. En 2013 née le Projet de R&D Collaborative Régional (Région Occitanie) « Irri-Alt'Eau », le premier projet de REUT en France

impliquant la filière vitivinicole [18]. Depuis-là, les résultats ont été toujours encourageants et concluants, soit sur la maîtrise des qualités d'eaux réglementaires, pour l'irrigation de la vigne en France [19–21] comme sur la faisabilité technique au vignoble vis-à-vis des objectifs de production [22, 23]. Ceci a été démontré tout en limitant les risques sanitaires et environnementaux, ainsi qu'en prenant en compte l'acceptabilité sociale.

Aujourd'hui, en effet seules 5 % des eaux usées traitées de la planète sont réutilisées, soit un volume de 7.1 km³/an, ce qui représente à peine 0.18 % de la demande mondiale en eau. Cependant, les disparités entre les pays sont importantes et certains pays avec un index de stress hydrique important, comme l'Australie, les Etats-Unis (Californie et Floride) ou Israël, ont pour objectif d'assurer 10 à 30 % de leur demande en eau par cette ressource alternative [24]. L'estimation faite dans le cadre du projet AQUAREC [25] prévoit un volume de réutilisation des eaux usées de 3222 Mm³/an en Europe d'ici 2025. L'Espagne présente le potentiel de réutilisation le plus important (plus de 1 200 Mm³/an). L'Italie et la Bulgarie ont toutes les deux un potentiel de réutilisation estimé à environ 500 Mm³/an, tandis que l'Allemagne et la France devraient réutiliser respectivement 142 et 112 Mm³/an d'eaux usées traitées, avec des hausses significatives par rapport à leur niveau de référence actuel ; elles sont suivies par le Portugal et la Grèce, qui représentent un potentiel de réutilisation de moins de 100 Mm³/an [25]. Il est logique que les pionniers dans cette pratique soient les pays viticoles (entre autres) dont une part importante de l'eau est à usage agricole et présentant un indice de stress hydrique élevé, comme l'Australie, les Etats-Unis et l'Espagne [26].

Maintenant plusieurs solutions techniques permettent de répondre aux normes de réutilisation existantes, en particulier aux directives de l'OMS sur l'irrigation restreinte et sans restrictions. En Europe, la REUT participe au déploiement de la directive cadre sur l'eau (directive européenne 2000/60/CE) en permettant une gestion durable de la ressource. D'autant qu'en France le développement de la REUT est encouragé par le Grenelle de l'Environnement (Loi grenelle I).

3. Affinage de la salinité des eaux par les techniques séparatives à membranes

Les méthodes thermiques ont été les premières utilisées pour produire de l'eau douce par évaporation de l'eau salée. Il existe plusieurs options (vaporisation instantanée, multiple effet, compression de vapeur, thermo compression), mais les coûts énergétiques de ces procédés les rendent dissuasives pour les applications agricoles [1]. Les procédés membranaires seront seuls étudiés dans cet article.

Ils permettent la séparation d'espèces moléculaires en solution grâce à l'utilisation de membranes artificielles qui possèdent des perméabilités sélectives ; la nature de celles-ci est fonction des opérations de fractionnement à effectuer. Les techniques à membranes offrent la possibilité de discerner certaines molécules parmi d'autres et d'orienter le flux de matière. Leur principe est connu depuis plus d'un siècle, cependant leur développement dans les applications industrielles, beaucoup plus récent, est essentiellement dépendant de la mise au point



Figure 2. Installation de stabilisation tartrique du vin par électrodialyse. Capacité 120 hl/h (Source : Oenodia).

de matériaux membranaires bien adaptés à l'objet de l'opération technologique visé.

Microfiltration tangentielle (MFT), ultrafiltration (UF), nanofiltration (NF), osmose inverse (OI) sont bien connues dans le domaine de l'eau, pour produire de l'eau potable ou agricole. La MFT, l'électrodialyse (ED) sont bien connues et développées dans le domaine du vin, où il s'agit pour cette dernière d'enlever quelques centaines de mg/l de sels de potassium sans affecter les autres composés du vin, afin d'éviter tout dépôt cristallin au fond des bouteilles. À titre d'exemple, la Fig. 2 ci-dessous, illustre une installation d'électrodialyse utilisée pour la stabilisation tartrique du vin.

Sur l'eau agricole, il s'agira d'enlever quelques centaines de mg/l de sels de NaCl sans affecter les autres composés minéraux (élément nutritifs comme N, P, K pour l'essentiel). L'implantation industrielle de l'ED remonte aux années 50, cette technique séparative à membranes a été primitivement développée au Japon à grande échelle pour le dessalement des eaux saumâtres et la production de saumure à partir d'eau de mer, soit un objectif opposé à celui de dessalement qui nous intéresse ici.

Pour réduire la salinité des eaux saumâtres, trois options principales sont possibles: osmose inverse (OI), nanofiltration (NF) ou électrodialyse (ED).

3.1. Osmose inverse

L'osmose inverse (OI) utilise des membranes denses qui laissent passer l'eau en arrêtant quasi tous les sels. Cette technique est utilisée pour : le dessalement des eaux de mer et des eaux saumâtres, la production d'eau ultra pure et d'eau de procédé.

Le phénomène d'osmose est un phénomène qui tend à équilibrer la concentration en solutés de part et d'autre d'une membrane semi-perméable. Le phénomène d'osmose est un phénomène naturel courant, notamment à travers les membranes cellulaires. La membrane semi-perméable laissera passer le solvant (le soluté ne passe pas) pour équilibrer la concentration dissous [27]. La différence de concentration crée une pression, appelée pression osmotique. Pour inverser le passage du solvant et augmenter la différence de concentration, il faut appliquer une pression supérieure à la pression osmotique [27].

Pour dessaler l'eau à l'aide des membranes d'OI, l'effet d'osmose naturel est donc inversé afin de forcer l'eau de la solution saumâtre (concentration en sels élevée)

à aller dans la solution douce (concentration en sels basse). L'eau est pressurisée à une pression d'opération supérieure à la pression osmotique, de ce fait la saumure devient plus concentrée (e.g. la pression d'opération de l'eau de mer est d'environ 60 bar). L'Espagne a en particulier fait largement appel à cette technologie dès les années 2000 – 2010 avec plus de 700 unités en fonctionnement (voir 1.1).

3.2. Nanofiltration

Cette technique se situe entre l'OI et l'ultrafiltration (UF). Elle permet la séparation de composants ayant une taille en solution voisine de celle du nanomètre (soit 10 Å) d'où son nom. Les sels ionisés monovalents et les composés organiques non ionisés de masse molaire inférieure à environ 200 – 250 g/mol ne sont pas retenus par ce type de membrane. Les sels ionisés multivalents (Ca, Mg, Al, SO₄...) et les composés organiques non ionisés de masse molaire supérieure à environ 250 g/mol sont, par contre, fortement retenus. Les mécanismes de transfert sont intermédiaires entre ceux de l'OI et ceux de l'UF (passage des petites molécules comme l'eau, les sels et arrêt des molécules de masse molaire élevée telles que polymères, protéines, colloïdes). Cette technique est souvent utilisée pour l'adoucissement des eaux [27] car les flux de perméation par m² de membrane installée sont supérieurs à ceux de l'OI.

3.3. Electrodialyse

L'électrodialyse (ED) est une technologie électromembranaire extractive, dans laquelle des espèces ionisées dissoutes, minérales ou organiques, sont transportées à travers des membranes ioniques sous l'action d'un champ électrique. Il s'agit de la technique séparative la plus répandue parmi celles qui font intervenir des membranes échangeuses d'ions (MEI). Elle convient aux espèces ioniques, telles que les sels, les acides ou les bases et les molécules de faible poids moléculaire.

Sous l'effet d'un champ électrique perpendiculaire au plan des membranes, les cations migrent vers la cathode en traversant les membranes échangeuses de cations (MEC) et les anions migrent vers l'anode en traversant les membranes échangeuses d'anions (MEA). Les ions extraits sont récupérés dans le circuit de concentration ou saumure, tandis que le produit dans le circuit d'alimentation se déminéralise. La disponibilité sur le marché de MEI sélectives peut aussi permettre une extraction sélective du NaCl, en excès. Ceci permet ainsi garder les autres sels minéraux et organiques dans l'eau qui servira à l'irrigation, potentiels nutriments pour les vignes. L'ED est une technologie qui présente une grande souplesse d'utilisation: en travaillant à tension constante, une qualité d'eau constante peut être livrée, même si la salinité d'entrée augmente. D'autre part, elle est très facile à arrêter et à redémarrer, sans procédure de stockage particulière pour les MEI.

Parmi ces trois technologies membranaires, l'eau douce utilisable doit traverser la membrane en OI et NF, mais pas en ED ou seuls les sels en excès sont extraits (Fig. 3). Ceci a des conséquences importantes au niveau technico-économique, flux de traitement par m² de membrane et de la qualité de l'eau pour l'irrigation.

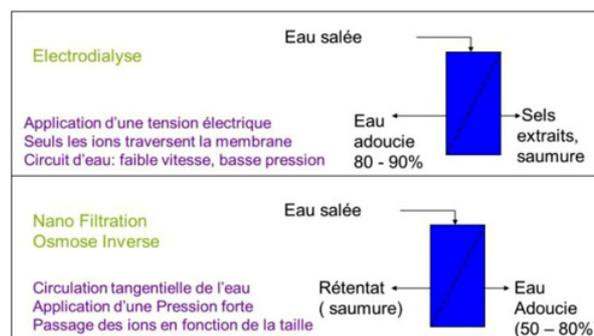


Figure 3. Procédé global du dessalement d'eau salée par électrodialyse d'une part, nanofiltration ou osmose inverse d'autre part.

4. Approche technico économique du dessalement d'eau pour l'irrigation, en lien avec les besoins de la vigne

Dans une perspective de réutilisation à grande échelle d'eaux usées traitées, dont les débits et les compositions sont éminemment variables dans le temps –pour une ressource donnée et d'une STEP à une autre–, il n'est pas évident, à ce jour, de concevoir pour un coût de revient déterminé, des procédés intégrant une opération dédiée spécifiquement à l'atteinte des critères requis.

Pour l'affinage des eaux saumâtres, la faisabilité technico-économique doit passer par la mise en oeuvre d'une technologie robuste et simple, qui permettrait de piloter le niveau de dessalement requis pour l'irrigation de la vigne. Les procédés à membranes denses, telles que l'électrodialyse (ED) ou l'osmose inverse (OI) offrent des propriétés très adaptées à ces contraintes. L'OI concerne plutôt le traitement des eaux à forte salinité, voir l'eau de mer. L'ED n'extrait que les ions en excès, cette technologie concerne plutôt des traitements d'affinage de correction pour des eaux faiblement à moyennement salées (TDS inférieure à 10 g/L). L'OI présente un avantage sur l'ED, de permettre un abattement très élevé du contenu en microorganismes; mais également présente un inconvénient: l'élimination totale des sels et des nutriments bénéfiques pour les plantes. En conséquence, ce procédé ne serait pas vraiment adapté à l'affinage des eaux destinées à l'agriculture, car l'addition de sels minéraux et d'azote sera nécessaire ou bien il s'agira d'envisager un mélange avec des eaux saumâtres. L'ED par son mode opératoire d'échange d'anions et de cations, permet par contre, d'affiner la qualité des eaux saumâtres en extrayant une quantité pilotable en ligne, de sels dissous (Na⁺ et Cl⁻ en particulier).

Dans le cadre d'une démarche éco-responsable et durable, l'ED serait mieux placée. C'est une technologie beaucoup plus souple, le redémarrage avec l'obtention de taux de dessalement stabilisés est immédiat. En conséquence, la qualité d'eau de sortie est constante, puisqu'elle est pilotée par la conductivité qui sera fixée en fonction du taux d'abattement de salinité désiré, une régulation automatique du courant permet d'optimiser au mieux la consommation énergétique, fonction de la salinité de l'eau. De plus la conservation des membranes au cours d'un arrêt prolongé ne nécessite pas de bisulfite, ce qui est un avantage par rapport à l'OI.

Tableau 2. Analyse comparative des différentes technologies de dessalement (d'après données ScienceDirect, 2013).

Technologie	Consommation énergétique (kWh/m ³)	Coût moyen de l'eau produite en fonction des volumes traités (\$US/m ³)
Multi-stage flash (MSF)	19.6 – 27.3	23000 – 528000 m ³ /jour : 0.56 – 1.75
Multi-effect distillation (MED)	14.5 – 21.4	91 000 – 320 000 m ³ /jour : 0.52 – 1.01 12 000 – 55 000 m ³ /jour : 0.95 – 1.5 <100 m ³ /jour : 2.0 – 8.0
Mechanical vapor compression (MVC)	7.0 – 12.0	30 000 m ³ /jour : 0.87 – 0.95
Thermo vapor compression (TVC)	16.3	1 000 m ³ /jour : 2.0 – 2.6
Osmose Inverse (OI)	2.0 – 4.0	100 000 – 320 000 m ³ /jour : 0.45 – 0.66 15 000 – 60 000 m ³ /jour : 0.48 – 1.62 1 000 – 4 800 m ³ /jour : 0.7 – 1.72
Electrodialyse (ED)	2.7 – 5.6 0.7 – 2.5 (faible salinité)	Grande capacité : 0.6 Petite capacité : 1.05

Ces deux technologies ainsi que la nanofiltration se distinguent aussi en termes de consommation d'énergie par m³ d'eau douce produit et de bilan matière, quantité d'eau brute consommée et rejet. Par exemple, pour le dessalement d'eau de mer par OI, le bilan des expériences industrielles en Espagne montre que les limites concernaient le coût énergétique correspondant entre 45 % et 65 % du coût total de l'eau, et un bilan matière avec une production importante d'eau saumâtre. Un litre d'eau de mer à 39 g/L de sel permet de produire 0.45 L d'eau adoucie à 0.5 g/L de sel et 0.65 L de saumure à 69 g/L de sel. En complément, afin d'avoir un aperçu global, le Tableau 2 dresse un comparatif des différentes technologies utilisées en matière de dessalement dont notamment les systèmes membranaires.

Concernant l'ED, pour une eau brute de composition moyenne donnée (Tableau 3), les performances observées permettent notamment d'atteindre des taux de récupération de l'ordre de 90 %. Là où en comparaison l'OI affiche généralement 80 %. Le Tableau 4 dresse un bilan des performances de l'électrodialyse sur l'eau brute décrite dans le Tableau 3.

La consommation énergétique est d'un ordre de grandeur semblable en comparaison à des systèmes d'osmose basse pression mais reste cependant légèrement supérieure pour la gamme de salinité considérée.

Sur le plan économique, la technologie d'ED se montre également compétitive. Afin de l'illustrer, il est intéressant d'étudier le coût spécifique (en €/m³ d'eau produite) que peut représenter le traitement d'une eau saline par ED. Ce coût tient compte pour une capacité de traitement donnée des coûts d'exploitation et de l'investissement nécessaire amorti sur une durée de 10 ans. La Fig. 4 donne un aperçu de ce coût de traitement pour des capacités variant de 50 à 150 m³/h et selon des durées d'exploitation de 6 à 10 mois par an. En parallèle, un exemple de réalisation industrielle de grande capacité est illustré en Fig. 5.

5. Conclusion et perspectives

L'utilisation d'eau recyclée a augmenté progressivement depuis la fin du XX^e siècle. Elle est utilisée avec succès depuis nombreuses années dans plusieurs pays vitivinicols de renom international. Bien que les eaux recyclées aient été initialement promues pour améliorer la qualité des eaux de surface, elles sont maintenant devenues une importante source d'eau alternative pour aider à faire face aux pénuries d'eau, ainsi qu'à la demande agricole et urbaine. En France, la réutilisation des eaux usées traitées

Tableau 3. Caractéristiques et composition moyenne d'une eau brute traitée par électrodialyse (Source : BMG Holding).

Eau brute	
Conductivité (mS/cm)	5.59
TDS (g/L)	3.19
TH	41.7
Composition (mg/L) Cations	
Sodium	980
Potassium	90
Magnésium	40
Calcium	100
Anions	
Sulfates	280
Chlorures	1700

Tableau 4. Qualité d'eau traitée et performances de la technologie d'électrodialyse (Source : BMG Holding).

Eau produite	
Conductivité (mS/cm)	1.0 – 1.3
TDS (g/L)	0.65 – 0.8
TH	7 – 10
Composition (mg/L) Cations	
Sodium	120 – 220
Potassium	6 – 11
Magnésium	5 – 10
Calcium	15 – 20
Anions	
Sulfates	50 – 70
Chlorures	360 – 460
Performances	
Récupération (%)	90
Elimination TDS (%)	75 – 80
Consommation (kWh/m ³)	0.9

(REUT) est devenue l'élément essentiel de l'économie circulaire de l'eau, aussi qu'elle devient de plus en plus une source directe d'eau pour l'irrigation des cultures et des espaces verts ou de loisir. Cependant, le problème majeur pour la REUT dans les territoires du littoral, est posé par la salinité de cette ressource. Dans ce cas, l'affinage de la salinité des eaux devient indispensable avant d'envisager tout projet d'irrigation. Les principaux acteurs du traitement d'eau en France (Suez, Veolia, Saur), associés à des fabricants de modules et systèmes membranaires (Polymem, Eurodia) sont engagés dans des programmes de développement d'applications de grandes capacités. Au-delà des performances technologiques et du coût d'investissement initial, il faut envisager des actions

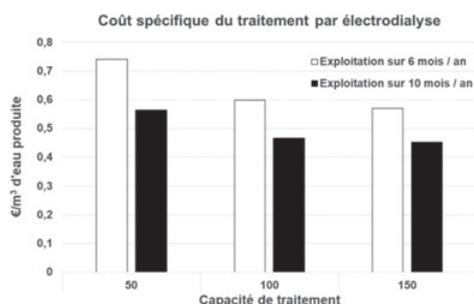


Figure 4. Coût spécifique du traitement par électrodialyse pour des capacités de 50 à 150 m³/h. □ 6 mois d'exploitation par an et ■ 10 mois d'exploitation par an (Source : BMG Holding).



Figure 5. Installation de traitement d'eau par électrodialyse – Capacité 220 000 m³/jour (Source : GE Water).

dans un cadre durable et éco-responsable. En effet, il faut analyser le risque d'un problème de pollution locale, au cours du temps, par l'élimination du sel extrait –en fonction du procédé– et des produits utilisés pour la maintenance des équipements. En outre, privilégier au moins le couplage du procédé à de sources énergétiques renouvelables, s'avérerait indispensable, afin de prévenir tout impact environnemental.

Références

[1] P. Bandelier, *Le dessalement d'eau de mer et des eaux saumâtres* (Encyclopédie de l'énergie, 2016)
 [2] OCDE, *Gestion durable des ressources en eau dans le secteur agricole* (Éditions OCDE, Paris, 2010)
 [3] M. François, *Eau et développement en Espagne, Politiques et discours* (Géographie, Université de Caen, 2009)
 [4] H. Ojeda, *Le Progrès Agri. Viti.* **7**, 133 (2007)
 [5] H. Fraga, A.C. Malheiro, L. Moutinho-Pereira, J.A. Santos, *Int. J. Biometeorol.* **57**, 909 (2013)
 [6] J. Tonietto, A. Carbonneau, *Agric. For. Meteorol.* **124**, 81 (2004)
 [7] S.R. Raine, W.S. Meyer, D.W. Rassam, J.L. Hutson, F.J. Cook, *Irrig. Sci.* **26**, 91 (2007)
 [8] R. Aragüe, E.T. Medina, W. Zribi, I. Clavería, J. Álvaro-Fuentes, J. Faci, *Irrig. Sci.* **33**, 67 (2015)
 [9] F. Ghassemi, A.J. Jakerman, H.A. *Salinisation of Land and Water Resources* (University of New South Wallpress, Sydney, 1995)
 [10] A.E.S. Bless, F. Colin, A. Crabit, N. Devaux, O. Philippon, S. Follain, *Sols salins et sodiques. Cas de sols de Sérignan, Hérault – France* (Note technique de Montpellier SupAgro, 2017), p. 10

[11] A.E.S. Bless, F. Colin, A. Crabit, N. Devaux, O. Philippon, S. Follain, *Sci. Total Environ.* **625**, 647 (2018)
 [12] R.S. Ayers, D.W. Westcot, *FAO Irrigation and Drainage Paper* **29** (1985)
 [13] S. Follain, E. Bless, F. Colin, X. Le Clanche, A. Crabit, N. Devaux, O. Philippon, *Dépérissement et salinité des sols : diagnostique et action de lutte en zone littorale* (DOI: 10.13140/RG.2.1.2834.9849, 2016)
 [14] M. Hanana, L. Hamrouni, K.B. Hamed, C. Abdelly, *J. New Sci. Agri. Biotech.* **19**, 722 (2015)
 [15] G. Fipps, *Irrigation Water Quality Standards and Salinity Management Strategies* (AgriLife Communications, The Texas A&M System, 2003)
 [16] S. Laurenson, N.S. Bolan, E. Smith, M. McCarthy, *Aust. J. Grape Wine Res.* **18**, 1 (2012)
 [17] T. Asano, F. Burton, H. Leverenz, *Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications* (Metcalf & Eddy, Inc. an AECOM Company, NY, USA, 2007)
 [18] F. Etchebarne, J.-L. Escudier, H. Ojeda, *Rev. Oenologues* **160**, 11 (2016)
 [19] Y. Jaeger, F. Etchebarne, Y. Sire, J.-L. Escudier, H. Ojeda, N. Rampnoux, B. Goral, *Proceeding of 19th GiESCO International Meeting of Viticulture, Pech Rouge – Montpellier, France* (Book of full manuscripts), vol. 1, 117 (2015)
 [20] F. Etchebarne, M. Echegoyen, Y. Sire, J.-L. Escudier, Y. Jaeger, B. Goral, H. Ojeda, *Proceeding of 19th GiESCO International Meeting of Viticulture, Pech Rouge – Montpellier, France* (Book of full manuscripts), vol. 1, p. 51 (2015)
 [21] F. Etchebarne, Y. Sire, J.-L. Escudier, M. Torrijos, N. Wery, G. Santa-Catalina, D. Patureau-Steyer, Y. Jaeger, B. Goral, N. Rampnoux, H. Ojeda, *Proceeding of WINERY 2015: 7th IWA Specialized Conference on Sustainable Viticulture, Winery Wastes & Agri-industrial Wastewater Management, Stellenbosch, South Africa* (Book of abstracts, 2015), p. 16
 [22] F. Etchebarne, M. Echegoyen, G. Pereyra, S. Van-Houten, Y. Sire, J.-L. Escudier, M. Torrijos, N. Wery, G. Santa-Catalina, D. Patureau, Y. Jaeger, B. Goral, N. Rampnoux, H. Ojeda, *Rev. Oenologues* **161**, 12 (2016)
 [23] F. Etchebarne, M. Echegoyen, G. Pereyra, S. Van-Houten, Y. Sire, J.-L. Escudier, M. Torrijos, N. Wery, G. Santa-Catalina, D. Patureau, Y. Jaeger, B. Goral, N. Rampnoux, H. Ojeda, *Proceeding of 20th GiESCO International Meeting Mendoza, Argentina* (Book of full manuscripts, 2017), p. 597
 [24] V. Lazarova, F. Brissaud, *Intérêt, bénéfiques et contraintes de la réutilisation des eaux usées en France. L'eau, l'industrie, les nuisances* **299**, 29 (2007)
 [25] AQUAREC. *Report on integrated water reuse concepts* (Eds. T. Wintgens, R. Hochstrat, Deliverable D19, 2006)
 [26] F. Etchebarne, J.-L. Escudier, H. Ojeda, *Rev. Oenologues* **160**, 9 (2016)
 [27] A. Maurel, *Techniques séparatives à membranes: osmose inverse, nanofiltration, ultrafiltration, micro-filtration tangentielle – Considérations théoriques* (Techniques de l'Ingénieur, 1993), p. 1