

Partenariat 2010 – Savoirs – Action n°3



Salinisation des masses d'eaux en France : du constat au diagnostic.

Rapport final

*W. Kloppmann, A. Bourhane, S. Schomburgk, F.
Asfirane (BRGM)*

Août 2011

Contexte de programmation et de réalisation

Les travaux présentés dans ce rapport ont été réalisés dans le cadre des activités de Service Public du BRGM avec le soutien de l'ONEMA (convention de partenariat n°1900/09 – Année 2010).

Les auteurs

Wolfram Kloppmann
Chef de Projet
w.kloppmann@brgm.fr
BRGM 3 Av. C. Guillemin, 45060 Orléans

Les correspondants

Onema : *Pierre-François Staub, DAST, pierre-françois.staub@onema.fr*
Référence du document :

Partenaire : *Ariane Blum, BRGM, Service EAU, a.blum@brgm.fr*

Référence du document : Rapport BRGM/RP-60186-FR
Kloppmann W., Bourhane A., Schomburgk S., Asfirane F. (2011), Salinisation des masses d'eaux en France : du constat au diagnostic.

Droits d'usage :	<i>Accès libre</i>
Couverture géographique :	<i>Nationale</i>
Niveau géographique [un seul choix] :	<i>National</i>
Niveau de lecture [plusieurs choix possibles] :	<i>Professionnels, experts</i>
Nature de la ressource [plusieurs choix possibles] :	<i>Document</i>

Salinisation des masses d'eaux en France : du constat au diagnostic

Rapport final

BRGM/RP-60186-FR

Août 2011

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2010

W. Kloppmann, A. Bourhane, S. Schomburgk, F. Asfirane

Vérificateur :

Nom : A. Blum

Date : 05/09/2011

Signature :



Approbateur :

Nom : S. Lallier

Date : 05/09/2011

Signature :



En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

Mots clés : salinité, salinisation, évaporites, saumures, intrusion saline, masse d'eau, aquifère, France, DOM-COM, indicateurs géochimiques, traceurs isotopiques, méthodes géophysiques.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :
Kloppmann W., Bourhane A., Schomburgk S., Asfirane F. (2011), Salinisation des masses d'eaux en France : du constat au diagnostic. Rapport BRGM/RP-60186-FR.

© BRGM, 2011, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le présent fascicule a pour objectif de fournir un aperçu de la problématique de la salinisation des eaux souterraines dans le contexte hydroclimatique spécifique de la France métropolitaine et d'outre-mer. Il se base sur deux synthèses récentes, l'une portant sur l'identification des masses d'eau françaises concernées par une salinité élevée (Kloppmann et al., 2010), l'autre sur les outils de diagnostic à notre disposition pour relever des questions sur les sources et vecteurs de la salinisation (Kloppmann et al., 2011). Il s'articule autour des nombreuses questions que suscite l'observation d'un point d'eau (puits, source...) à salinité élevée. Après avoir fait le tour des concepts de base (Qu'est-ce que l'eau saline ?) et avoir abordé les nombreux mécanismes susceptibles d'induire une salinité élevée d'une eau souterraine (Pourquoi les eaux salines sont-elles salines ?), il donne un aperçu de l'ampleur du problème en France (Quel est l'état de salinisation des masses d'eaux en France ?).

S'adressant plus spécifiquement à ceux qui sont impliqués dans la gestion des masses d'eau, la problématique de la salinisation est ensuite regardée sous l'angle de la stratégie à mettre en place (Quelles questions se posent face à une salinisation ?), incluant l'acquisition des informations préalables à toute mesure de remédiation (Quels sont les outils de diagnostic pour répondre aux questions ?). Le rapport esquisse finalement un concept général de diagnostic et remédiation de la salinisation d'une masse d'eau avec un accent particulier sur certains outils (méthodes géochimiques et géophysiques). Sa nature même (fascicule) interdit d'aborder les questions énumérées de façon approfondie. Le lecteur est renvoyé aux deux rapports de synthèse et aux nombreuses études citées dans les deux rapports.

La salinisation des masses d'eau souterraine est l'une des principales causes de dégradation de la qualité de l'eau dans le monde. Ce phénomène très répandu s'avère particulièrement problématique dans les régions arides et semi-arides où la ressource en eau douce se trouve en quantité très limitée. Les mécanismes à l'origine de la salinité d'un système hydrologique sont divers et complexes. Ainsi, le mode de salinisation dépend du contexte géographique (côtier, continental...), géologique (nature de l'aquifère, minéralogie des sédiments...) et climatique. Les principaux vecteurs impliqués dans la salinisation des masses d'eau souterraines sont l'intrusion marine, le mélange avec des saumures anciennes, la dissolution de formations évaporitiques, mais aussi diverses sources anthropiques. Il faut noter que les phénomènes d'origine naturelle peuvent être influencés et accentués par l'intervention humaine.

En France, un certain nombre de masses d'eaux souterraines est concerné par la salinisation. Si le biseau salé est le vecteur principal de la salinisation en contexte insulaire (Corse, Guadeloupe, Martinique, La Réunion) il n'en est pas ainsi pour l'Hexagone. Les masses d'eau qui comptabilisent le nombre le plus élevé de points d'eau concernés par une minéralisation élevée se situent hors du contexte côtier. Les mécanismes impactant ces masses d'eau sont:

- La dissolution naturelle d'évaporites dans les bassins sédimentaires.
- La conservation d'eau de mer ancienne ou de saumures issues de l'évaporation d'eau de dans des parties confinées des aquifères.
- Diverses sources ponctuelles industrielles s'ajoutent (et souvent se superposent) à la salinisation d'origine naturelle, en premier lieu liées à des activités d'exploitation de formations salifères (potasse, halite).
- Des sources diffuses d'origine anthropique (agriculture, salage des routes) créent un "bruit de fond" de salinisation.

Déterminer l'origine de la salinité reste une condition indispensable pour gérer de façon efficace cette problématique. Combinées à des investigations hydrogéologiques et géophysiques, les méthodes géochimiques et notamment l'utilisation des isotopes stables et radioactifs se sont révélées adaptées à la discrimination des sources de salinité. L'identification de ces sources et mécanismes de salinisation nécessite souvent une méthodologie complexe, notamment dans le cas de sources de salinités multiples qui affectent la même masse d'eau. Dans de nombreux cas, il devient possible de discriminer les sources et vecteurs de salure en combinant :

- des modèles hydrodynamiques, capables de prendre en compte le transport d'éléments dissous ainsi que les effets de densité,
- des méthodes géophysiques, y compris celle de la géophysique aéroportée,
- des méthodes géochimiques, isotopiques et radioisotopiques.

La géochimie élémentaire et isotopique a pu fournir un certain nombre d'outils et les assembler dans une "boîte à outils" spécifique aux problèmes de la salinisation. Il s'agit notamment des isotopes stables des éléments constituant l'eau (O, H) ainsi que ceux des éléments dissous (B, Sr, Li, S, O...). On les combine souvent avec des traceurs du temps de résidence de l'eau et de la salinité dans les aquifères, notamment les radioéléments (^{14}C , tritium,...) et, pour des eaux récentes, les CFCs et autres traceurs anthropogéniques. Ces derniers peuvent donner des informations précieuses sur la chronologie de la salinisation et donc sur l'impact relatif des mécanismes naturels et anthropiques.

Ces outils s'intègrent dans une stratégie de gestion et d'action générale vis-à-vis d'une salinisation, allant du premier constat aux mesures de remédiation en passant par un suivi dans le temps, des modèles conceptuels des causes de la salinisation, peaufinés au fur et à mesure de l'acquisition de données, des modèles numériques de simulation et de prédiction.

Sommaire

1. Qu'est-ce une eau saline ?	9
2. Pourquoi les eaux salines sont-elles salines ?	11
2.1. SOURCES DE SALINITE NATURELLES.....	11
2.2. SOURCES DE SALINITE ANTHROPIQUES.....	12
3. Quel est l'état de salinisation des masses d'eaux en France ?	14
3.1. METHODOLOGIE ADOPTEE	14
3.2. FRANCE METROPOLITAINE: CARTES PAR MASSES D'EAU.....	14
3.3. SALINISATION DES AQUIFERES DANS L'OUTRE-MER	15
3.3.1. Salinisation à La Réunion.....	15
3.3.2. Salinisation des aquifères aux Antilles Françaises	16
3.4. CONCLUSIONS SUR LA SALINITE EN FRANCE	16
4. Quelles questions se poser face à une salinisation?	22
4.1. A QUEL DEGREE LA NAPPE EST-ELLE CONCERNEE PAR UNE SALINISATION ?.....	22
4.2. QUELLE EST LA GEOMETRIE DE LA SALINISATION ?	23
4.3. QUELLES SONT LES SOURCES DE LA SALINITE ?.....	26
4.4. QUELS SONT LES MECANISMES DE SALINISATION, NATURELS OU ANTHROPIQUES ?.....	27
4.5. QUEL A ETE ET SERA L'EVOLUTION DE LA SALINISATION ?.....	28
4.6. QUELLE STRATEGIE A METTRE EN PLACE POUR LA REMEDIATION ?...	29
5. Quels sont les outils de diagnostic pour répondre aux questions ?.....	30
5.1. POTENTIEL DES OUTILS GEOPHYSIQUES.....	30
5.2. POTENTIEL DES OUTILS GEOCHIMIQUES	31

6. Concept général de diagnostic et remédiation de la salinisation d'une masse d'eau.....	34
7. Bibliographie	37

Liste des illustrations

Illustration 1 : Gammes de concentrations et terminologie. (D'après Kharaka et Hanor, 2005).	10
Illustration 2 : Mécanismes naturels de salinisation des eaux de surface et souterraines.	12
Illustration 3 : Représentation schématique des mécanismes anthropogéniques de salinisation.....	13
Illustration 4 : Points concernés par une salinisation (moyenne pluriannuelle 2005-2010 de Cl ⁻ > 100mg/L) dont souligné en gris les points pour lesquels la masse d'eau n'a pas pu être identifiée avec certitude.	19
Illustration 5 : Nombre de points concernés par une salinisation (Cl ⁻ > 100mg/L) par masses d'eau (niveau 1 à 3), avec limite des districts hydrographiques des Agences de l'Eau.	20
Illustration 6 : Les 22 masses d'eau les plus touchées par la salinisation en France métropolitaine sur (≥7 points concernés par des teneurs moyennes >100 mg/L en Cl ⁻).	21
Illustration 7 : Panaches de pollution saline en Alsace et au Pays de Bade (Aprona, 2007)	24
Illustration 8 : Géométrie des interfaces entre eaux saline et douce dans un aquifère multicouches épais. Aquifères alternent avec des acquicludes et chaque aquifère montre une pénétration différente, dépendant pro parte du potentiel dynamique en amont (Custodio, 2002).....	25
Illustration 9 : Rôle des méthodes géophysiques et géochimiques dans un plan de diagnostic et remédiation d'une salinisation de masse d'eau	36

1. Qu'est-ce une eau saline ?

Un grand nombre de termes descriptifs, plus ou moins précis, est utilisé dans la littérature pour décrire la minéralisation des eaux souterraines sans qu'il n'existe de système de classification globale. Par le terme **minéralisation** on désigne la concentration des solides totaux dissous (STD) ou charge totale dissoute (CTD). Le terme correspondant dans la littérature internationale est **TDS**, l'abréviation anglaise de Total Dissolved Solids. Le terme **salinité** (en anglais : salinity) est synonyme de TDS et s'exprime généralement en g/L ou en gramme de sels par kilogramme de solution et donc en pour mille pondéral (Illustration 1). La salinité peut être déterminée directement par la somme des concentrations mesurées en éléments dissous ou par le poids du résidu solide après évaporation et, indirectement et approximativement, à partir de la conductivité électrique (mS/cm). Toutefois, le terme de salinité est souvent utilisé comme synonyme de **chlorinité** qui désigne la concentration en chlore dissous sous forme de chlorures (mg/L ou g/L).

Usuellement, on considère en fonction de leur salinité, les eaux douces, saumâtres, salines et les saumures (Illustration 1).

Eau douce : une eau dont la salinité est inférieure à 1 g/L.

Eau saumâtre : une eau dont la salinité est comprise entre 1 et 10 g/L.

Eau saline : une eau dont la salinité est comprise entre 10 et 35 g/L.

Saumure : une eau dont la valeur de salinité est supérieure à la valeur moyenne de celle de l'eau de mer, c'est-à-dire plus de 35 g/L TDS ($3,5 \cdot 10^4$ mg/L TDS). D'après cette définition, la majorité des eaux des champs de pétrole sont des saumures. Cependant, seulement une faible fraction d'entre elles pourrait être classée comme saumure conformément aux définitions de Davis (1964) et Carpenter et *al.*, (1974) qui placent la limite inférieure de salinité des saumures à 100 g/L TDS ($1 \cdot 10^5$ mg/L TDS). On distingue deux types de saumures, les **saumures primaires** qui sont en fait une eau de mer évaporée à différents degrés et les **saumures secondaires** issues de la dissolution de sels solides (évaporites).

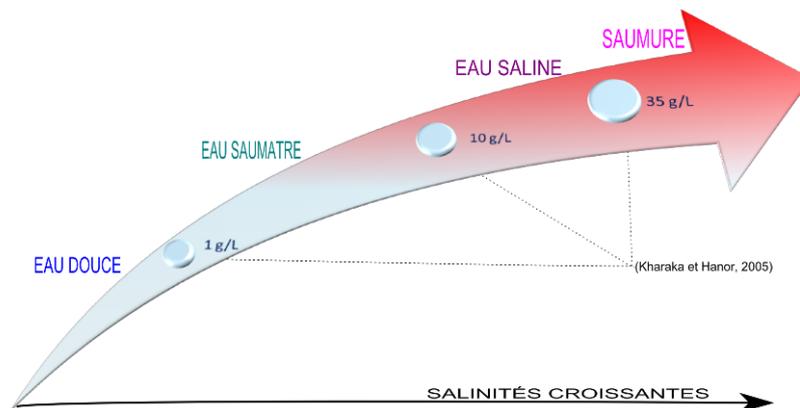


Illustration 1 : Gammes de concentrations et terminologie. (D'après Kharaka et Hanor, 2005).

On peut, dans une optique de gestion des nappes, donner une définition moins contraignante pour le terme « eau saline », la grande majorité des eaux des nappes étant des eaux douces (ou saumâtres) selon la définition ci-dessus. On peut désigner par « eaux salines », l'ensemble des eaux dont la minéralisation est un facteur limitant pour un ou plusieurs usages, dépendant de la réglementation en vigueur. C'est plutôt dans ce sens, volontairement flou, que nous allons appliquer le terme par la suite.

Les processus qui augmentent la minéralisation d'une eau ou d'un sol au-delà d'un seuil défini par ses usages sont regroupés sous le terme de **salinisation**. Il désigne l'ensemble des mécanismes physiques ou chimiques comme l'évaporation, la dissolution de minéraux, l'interaction avec l'eau de mer actuelle ou ancienne et le mélange avec une saumure (primaire ou secondaire). Cette dégradation de la qualité de l'eau peut rendre cette ressource impropre à la consommation humaine, à l'usage industriel et affecter l'agriculture si les niveaux de minéralisation des solutions de sol ou ceux des eaux d'irrigation excèdent la tolérance aux sels des plantes cultivées.

Souvent considéré comme le vecteur exclusif ou prépondérant de la salinisation des nappes, le **biseau salé** désigne la partie d'un aquifère côtier envahi par l'eau de mer, comprise entre la base de l'aquifère et une interface de séparation eau douce / eau salée. On parle d'**intrusion marine** face à une invasion de l'eau de mer dans les nappes d'eau douce du littoral. L'intrusion d'un biseau salé au-delà d'une position naturelle de faible pénétration, est quasi systématiquement la conséquence d'une surexploitation de l'aquifère. L'analyse des sources et mécanismes de la salinisation des masses d'eau en France, montre que l'intrusion marine, même si elle est importante comme mécanisme de salinisation dans les aquifères proches du littoral, est loin d'être le seul vecteur de la salinité dans les eaux souterraines. Le chapitre suivant éclaire très brièvement sur ces sources et vecteurs de la salinité dans le cycle de l'eau en général et dans sa partie souterraine en particulier.

2. Pourquoi les eaux salines sont-elles salines ?

2.1. SOURCES DE SALINITE NATURELLES

Le cycle de la salinité dans les eaux continentales (Illustration 2) peut être subdivisé en deux grands domaines, le domaine "marin" lié directement ou indirectement à l'eau de mer, et le domaine "continental/interactions eaux-roches" pour lequel les sels dissous sont issus essentiellement de l'interaction avec des roches sédimentaires (hors évaporites marines) et cristallines et concentrées par l'évaporation. Dans le domaine « marin » la salinité résulte de la présence d'aérosols marins dans les précipitations qui, après évaporation partielle, vont s'infiltrer dans les aquifères. La salinité peut être associée également à une intrusion directe de l'eau de mer dans les aquifères côtiers. La présence des eaux de mer n'est pourtant pas limitée au littoral. En effet, des transgressions marines ont pu engendrer, dans le passé, à l'échelle de temps géologique, des infiltrations d'eau de mer bien au-delà de la ligne de côte actuelle. Les eaux marines syngénétiques des sédiments marins peuvent également être préservées au sein même de ces sédiments (« eaux connées »). L'évaporation de l'eau de mer donne lieu à la formation de saumures sédimentaires, dites « primaires », et peut conduire au dépôt de roches évaporitiques. Ces dernières, lorsqu'elles sont traversées par des eaux souterraines ou de surface peuvent se dissoudre donnant naissance à des saumures dites « secondaires ». Des faibles proportions de ces saumures mélangées aux eaux souterraines suffisent pour induire une salinisation significative des nappes, pouvant impacter et compromettre certains usages.

Les eaux de surface, initialement faiblement minéralisées, peuvent, par interaction avec les roches du bassin versant et par évaporation successive, devenir salines. Les concentrations en sel, peuvent augmenter jusqu'à la précipitation d'évaporites, notamment dans les zones arides ou semi-arides. Les lieux principaux de la formation de sels solides sont les sols agricoles irrigués et les bassins endoréiques où l'évaporation atteint ou excède l'influx d'eaux continentales. Une autre source de salinité, abondamment discutée dans la littérature sur l'hydrochimie des boucliers scandinaves et canadiens, est l'interaction avec des roches cristallines qui contiennent des inclusions fluides de taille microscopique mais souvent très concentrées en sels (Nordstrom *et al.*, 1989). L'interaction avec ces roches est favorisée par des températures et pressions élevées (fluides hydrothermales). Les gaz volcaniques, souvent riches en chlorures, soufre et autres composées, sont une autre source de salinité dans des secteurs d'activité tectonique et volcanique récente.

Malgré l'éloignement de la mer, le cycle "marin" joue un rôle prépondérant pour les bassins sédimentaires à l'intérieur du continent. Différents types de saumures naturelles ont été observées dans les systèmes multi-aquifères du Bassin de Paris (Fontes et Matray, 1993 a, b), des saumures primaires que l'on peut attribuer à l'évaporation d'eaux de mer, ainsi que des saumures secondaires issues de la dissolution des évaporites marines.

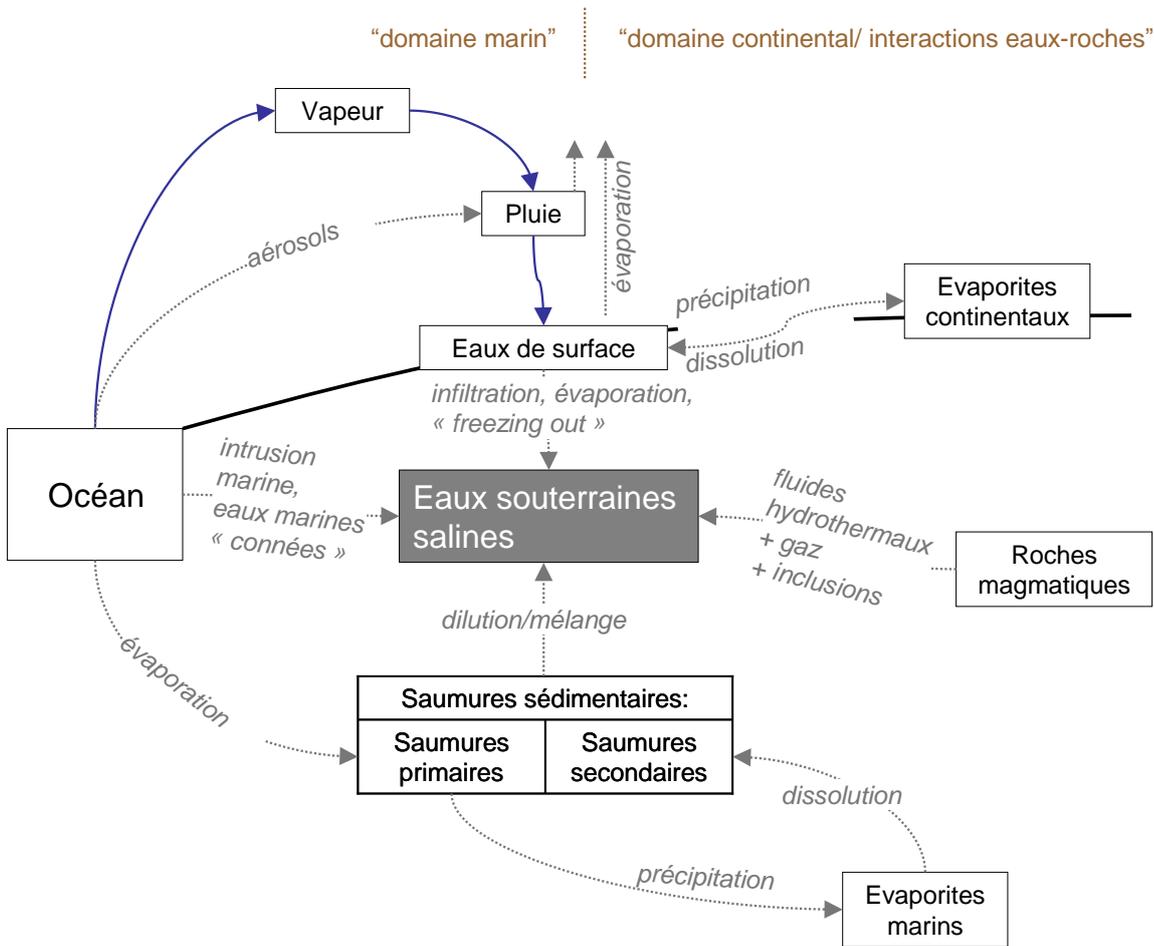


Illustration 2 : Mécanismes naturels de salinisation des eaux de surface et souterraines.

2.2. SOURCES DE SALINITE ANTHROPIQUES

Un certain nombre d'actions humaines se superpose à ce cycle naturel des sels et de l'eau (Illustration 3). Ces actions ont tendance à renforcer certains mécanismes et donc à contribuer à la salinisation des nappes. L'exploitation des nappes par pompage génère en règle générale un changement du champ des flux qui peut engendrer des intrusions salines dans des aquifères côtiers (biseau salé) ou favoriser des échanges verticaux faisant remonter des eaux salines profondes (drainance). L'irrigation est un facteur majeur de la salinisation des sols et, en conséquence, des nappes dans les climats arides et semi-arides. Certaines activités produisent des flux riches en chlorures (eaux usées, exhaures miniers, drainage des routes soumises au salage hivernal, exploitation de fluides profonds à des fins géothermales, exploitation de la potasse, dessalement) ou des déchets solides qui à leur tour peuvent se dissoudre et contribuer à la salinisation des nappes. Ce dernier mécanisme est, à titre d'exemple, la cause principale de la salinisation de la nappe d'Alsace, avec la dissolution des déchets solides de l'exploitation de la potasse stockés en surface (terrils). D'autres

sources anthropiques de salinité peuvent jouer un rôle à l'échelle locale ou régionale, avec une pollution diffuse d'origine agricole, des impacts localisés de certaines stations d'épuration et le salage des routes. Les impacts potentiels du stockage de CO₂ dans les aquifères salins profonds sont actuellement à l'étude dans un certain nombre de projets de recherche. Un mécanisme potentiel consiste en le déplacement des saumures contenues dans ces aquifères vers des aquifères d'eau douce sous l'influence de l'injection du CO₂.

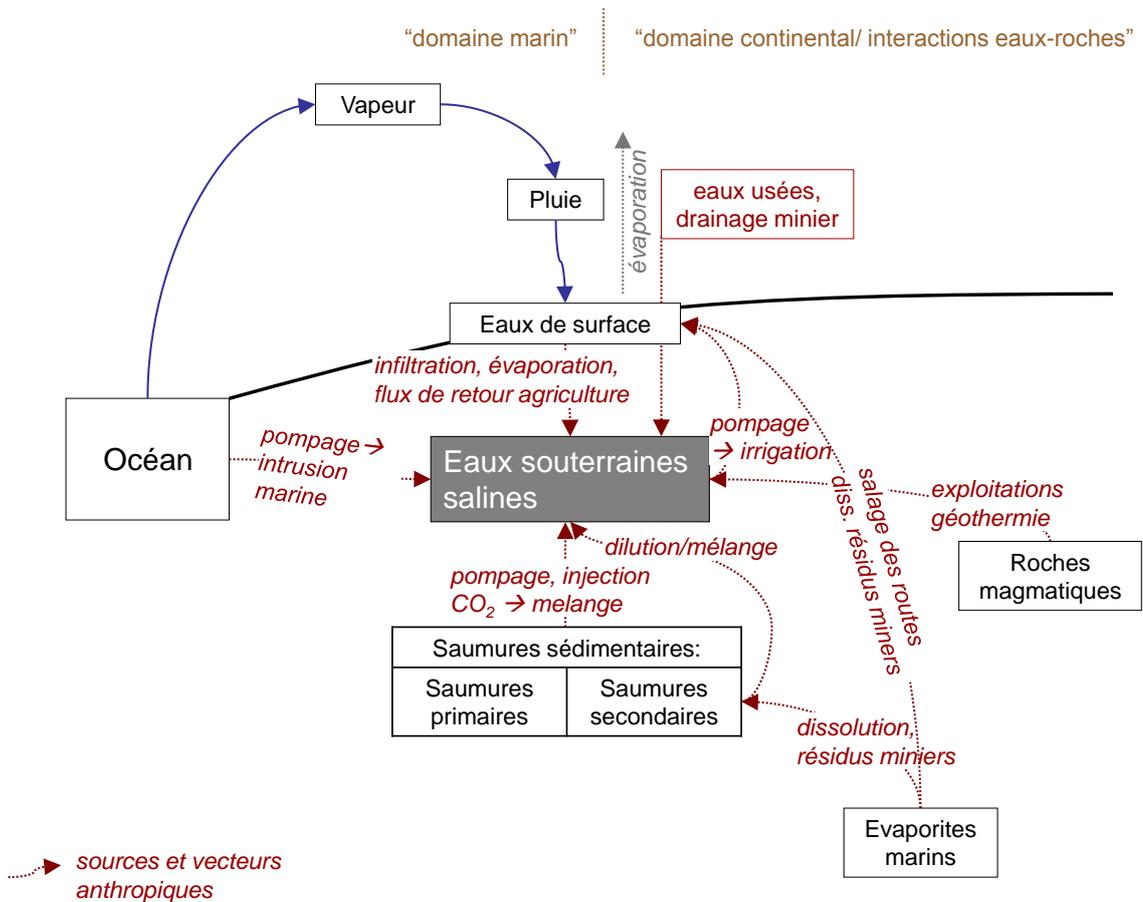


Illustration 3 : Représentation schématique des mécanismes anthropogéniques de salinisation.

3. Quel est l'état de salinisation des masses d'eaux en France ?

3.1. METHODOLOGIE ADOPTEE

Une synthèse détaillée de l'état de la salinisation des masses d'eau en France métropolitaine et de l'Outre-Mer est donnée par Kloppmann et al. (2010), basée sur les données actuelles (2005-2010) contenues dans la base ADES¹ et l'exploitation des principales études scientifiques menées en France métropolitaine et dans l'Outre-mer. Les analyses de cartes portent essentiellement sur le paramètre chlorure, principal élément et indicateur de la salinité.

Une étude statistique à l'échelle de la masse d'eau a permis de cartographier les masses d'eau les plus touchées par le phénomène de salinisation (Illustration 4 à Illustration 6). Il convient d'admettre qu'une chlorinité excédant les 100 mg/L indique une salinisation significative de l'ouvrage concerné et des eaux souterraines captées. Cette teneur est supérieure aux chlorinités des apports météoriques, même après concentration par évaporation, et également supérieure aux valeurs qu'on pourrait attribuer à une pollution diffuse agricole. Même si la potabilité de l'eau n'est pas encore mise en cause (limite de 250 mg/L) nous considérons la valeur de 100 mg/L en Cl⁻ comme seuil d'alerte indiquant des phénomènes de salinisation. La méthodologie adoptée est simple : un décompte du nombre absolu par masse d'eau des points dont la moyenne sur 5 ans excède le seuil. Le choix du nombre absolu de points au-dessus d'une limite donnée de concentration en chlorure présente l'avantage de n'occulter aucune masse d'eau concernée par la salinisation, même localement. Une pondération par rapport à la surface ou le nombre de points total aurait eu pour effet de diminuer la visibilité des grandes masses d'eau fortement exploitées par effet de "dilution" dans un grand nombre de points sans nécessairement faire apparaître des informations supplémentaires sur des petites masses d'eau. Le fait que l'approche choisie, tout en reconnaissant ses limites, fasse apparaître l'a quasi-totalité des aquifères sujets à une salinisation qui sont discutés dans la littérature semble une preuve de sa pertinence. L'approche reste préliminaire, en attendant une analyse statistique plus détaillée mais permet un premier aperçu du phénomène de salinisation en France métropolitaine.

3.2. FRANCE METROPOLITAINE: CARTES PAR MASSES D'EAU

Les 2 cartes ci-après montrent le nombre de points à forte chlorinité (> 100 mg/L) pour les 3 premiers niveaux des masses d'eau. Elles laissent voir que sur la plupart des masses d'eau (94%), moins de deux forages présentent une chlorinité moyenne (sur les 5 dernières années) supérieure à 100 mg/L. Il apparaît également que 13 masses

¹ <http://www.ades.eaufrance.fr/>

d'eau (0,9 %) présentent ≥ 10 ouvrages concernées par des teneurs en chlorures supérieures à 100 mg/L.

La France compte actuellement 22 masses d'eau dans lesquelles plus de 7 ouvrages présentent une chlorinité moyenne (sur 5 ans) supérieure à 100 mg/L. Ces 22 masses d'eau les plus impactées sont identifiées sur l'histogramme (Illustration 6). Ces observations préliminaires laissent croire que la salinisation des eaux souterraines en France concerne un nombre limité de masses d'eau, touchées à différents degrés. Il s'agit principalement des aquifères alluviaux (Rhin, Seine, Durance...) et côtiers (Pliocène du Roussillon, Jurassique supérieur de l'Aunis...). Sur les 22, masses d'eau :

- 14 se situent dans des bassins sédimentaires,
- 7 parmi ces 14 comportent une zone littorale, sont donc potentiellement influencés directement par l'eau de mer (intrusion saline actuelle ou ancienne),
- 6 sont des aquifères alluviaux,
- 2 se situent dans les massifs cristallins.

Pour une discussion plus approfondie portant sur l'origine de la salinité sur les masses d'eau les plus concernées nous renvoyons au rapport détaillé (Kloppmann et al., 2011).

3.3. SALINISATION DES AQUIFERES DANS L'OUTRE-MER

Des études relatives à la salinisation des eaux souterraines ont été effectuées également dans les régions ultramarines. L'intrusion marine (eau de mer actuelle) constitue le principal mécanisme de salinisation impliqué. Les territoires d'outre-mer les plus concernés sont l'île de La Réunion, Les Antilles Françaises, La Martinique et La Guadeloupe.

3.3.1. Salinisation à La Réunion

Sur l'île de La Réunion, l'évolution qualitative de la ressource en eau souterraine dans les aquifères côtiers est suivie depuis une vingtaine d'années (Daessle et Join, 1988, Frissant *et al.*, 2005). Les aquifères côtiers étudiés en 1988, se trouvent sur le littoral Ouest, entre la rivière des Galets au Nord (Saint-Paul) et la rivière Saint-Etienne au Sud (Saint-Louis et Saint-Pierre). Les premiers schémas conceptuels des aquifères de l'île montrent que les nappes de sables alluvionnaires sont plus sensibles aux invasions marines que les nappes de base à encaissant basaltique.

En 2005, l'inventaire des ouvrages soumis aux intrusions salines à l'échelle de l'île (Frissant *et al.*, 2005) a permis d'identifier 8 ouvrages recoupant l'interface eau douce-eau salée, 13 ouvrages où une intrusion saline est fortement soupçonnée et 20 ouvrages où une intrusion saline est possible. Toutes les communes de la côte Ouest de La Réunion sont soumises à l'aléa intrusion saline. Les 4 communes les plus

touchées sont Le Port, Saint-Paul, les Trois Bassins et Saint-Louis. Ces intrusions salines peuvent être dues à des surexploitations chroniques de la nappe (Saint-Louis, Sainte-Marie), à la faible recharge des aquifères (Trois-Bassins, Petite-Île) ou encore au captage d'aquifère naturellement saumâtre (comme celui du Port).

3.3.2. Salinisation des aquifères aux Antilles Françaises

En **Martinique**, la principale étude relative à la salinisation des eaux souterraines est effectuée sur la nappe basaltique du Lamentin (Vittecoq *et al.*, 2007).

Les zones de faibles résistivités identifiées par des études géophysiques correspondant à des zones d'intrusion saline situées à proximité du littoral. Les formations concernées sont les alluvions et les passées altérées des formations volcaniques. La position superficielle et uniquement littorale de cette intrusion marine pourrait-être en liaison avec la proximité de la mer d'une part et à l'importante salinité mesurée dans la partie aval des cours d'eau du secteur d'autre part. Les profils n'ont cependant pas montré d'intrusion saline au sein des formations volcaniques sous-jacentes, formations potentiellement aquifères. La complexité géométrique des formations géologiques du secteur est un des facteurs permettant d'expliquer la présence d'une intrusion saline et son absence en profondeur.

Cette étude permet de conclure toutefois qu'il n'existe pas de contre-indication à l'exploitation des aquifères potentiels situés en profondeur, à condition que le site d'exploitation soit suffisamment éloigné des secteurs où a été détectée l'intrusion saline dans les formations superficielles.

En **Guadeloupe**, les aquifères côtiers étudiés se trouvent sur les sept îles de l'archipel guadeloupéen : Basse-Terre, Grande-Terre, Marie-Galante, la Désirade, Les Saintes, Saint-Martin et Saint-Barthélemy. De manière générale, l'aléa salinisation est mal appréhendé par manque d'informations actualisées sur la position de l'interface eau douce-eau salée. Cependant, des observations géochimiques sur la nappe du Plateau de l'est (facies Na-Cl, relations conductivité-Cl-Na) laissent croire que la salinité est due à une intrusion marine (Ratsimihara et Dörfliger, 2010, Brenot *et al.*, 2008).

3.4. CONCLUSIONS SUR LA SALINITE EN FRANCE

En conclusion, il apparaît que même si une salinisation significative des masses d'eau en France ne concerne actuellement qu'un nombre restreint de nappes exploitées pour l'eau potable (22 sur 534 au total en France métropolitaine selon les critères retenus), ce phénomène est loin d'être marginal. Les **nappes alluviales** demeurent particulièrement sensibles à la salinisation du fait de la perméabilité des alluvions et la forte urbanisation des plaines alluviales.

Si le **biseau salé** est le vecteur principal de la salinisation en contexte insulaire (Corse, Guadeloupe, Martinique, La Réunion) il n'en est pas ainsi pour l'hexagone. Sur les 22 cas répertoriés, 15 se situent dans un contexte continental, hors de la portée potentiel

du biseau salé, et comprennent les masses d'eau qui comptabilisent le nombre le plus élevé de points d'eau au-dessus du seuil de 100 mg/L de Cl⁻. Les mécanismes impactant ces masses d'eau sont:

- La **dissolution naturelle d'évaporites** d'âge permien à tertiaire dans les bassins sédimentaires (est du bassin de Paris, fossé rhénan, bassin Aquitain, bassins provençaux)
- La **conservation d'eau de mer ancienne** ou de saumures issues de l'évaporation d'eau de mer (saumures primaires) dans des parties confinées des aquifères. La mise en place de ces fluides salins peut être synsédimentaire, donc synchrone à la mise en place des formations aquifères, ou postérieure à la sédimentation. Dans ce dernier cas, il peut s'agir de migrations de saumures à l'échelle du bassin, ou de l'impact de transgressions marines vers l'intérieur du continent. Plusieurs cas de salinisation par une eau de mer ancienne ont été révélés dans des masses d'eau côtières (Camargue, Marais Poitevin, calcaires jurassiques de la plaine de Caen, sables landéniens des Flandres...). Il s'agirait d'eaux de mer résiduelle mises en place lors de transgression d'âges divers, tertiaires à quaternaires. Dans certains cas, ce type de salinisation se superpose à des problèmes plus récents de biseau salé dans les mêmes aquifères.
- Diverses **sources ponctuelles industrielles** s'ajoutent (et souvent se superposent) à la salinisation d'origine naturelle, en premier lieu liées à des activités d'exploitation ou de valorisation de formations salifères. Il s'agit de l'extraction de la potasse (bassin potassique de Mulhouse) et de la halite, exploitée pour la production de soude, source révélée de salinisation en Lorraine et dans le Jura. Ces sources ponctuelles de salure peuvent engendrer des contaminations spectaculaires, aussi bien du réseau superficiel (Moselle, Rhin...) que des aquifères qui les accompagnent (nappe d'Alsace, alluvions de la Moselle, alluvions de la Durance et ses affluents).
- Des **sources diffuses d'origine anthropiques** créent un "bruit de fond" de salinisation, sans que les concentrations excèdent les seuils d'alerte. Il s'agit notamment des contaminations en chlorures d'origine agricole accompagnant celles, beaucoup plus problématiques, en azote et phytosanitaires et du salage des routes.

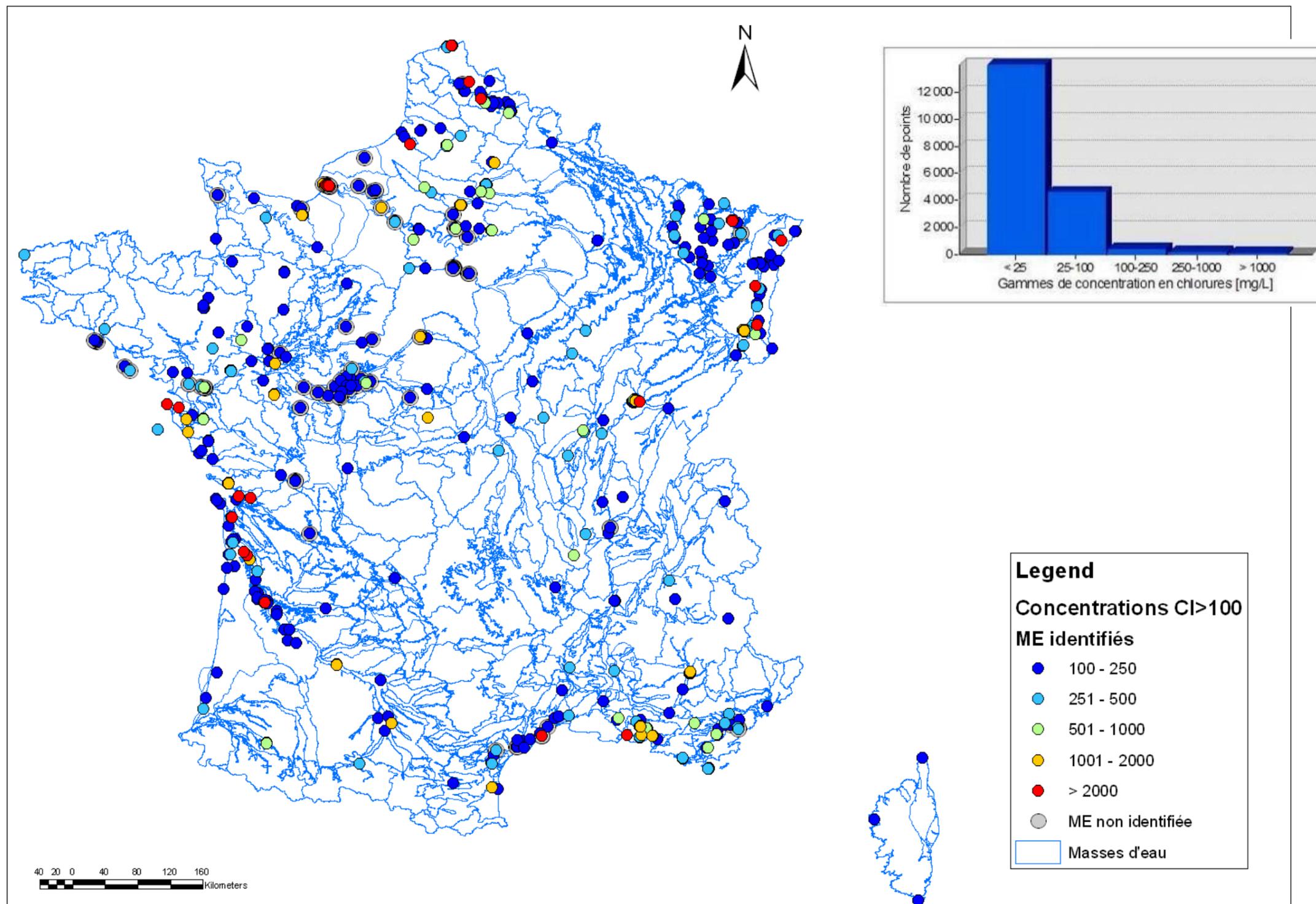


Illustration 4 : Points concernés par une salinisation (moyenne pluriannuelle 2005-2010 de Cl > 100mg/L) dont souligné en gris les points pour lesquels la masse d'eau n'a pas pu être identifiée avec certitude.

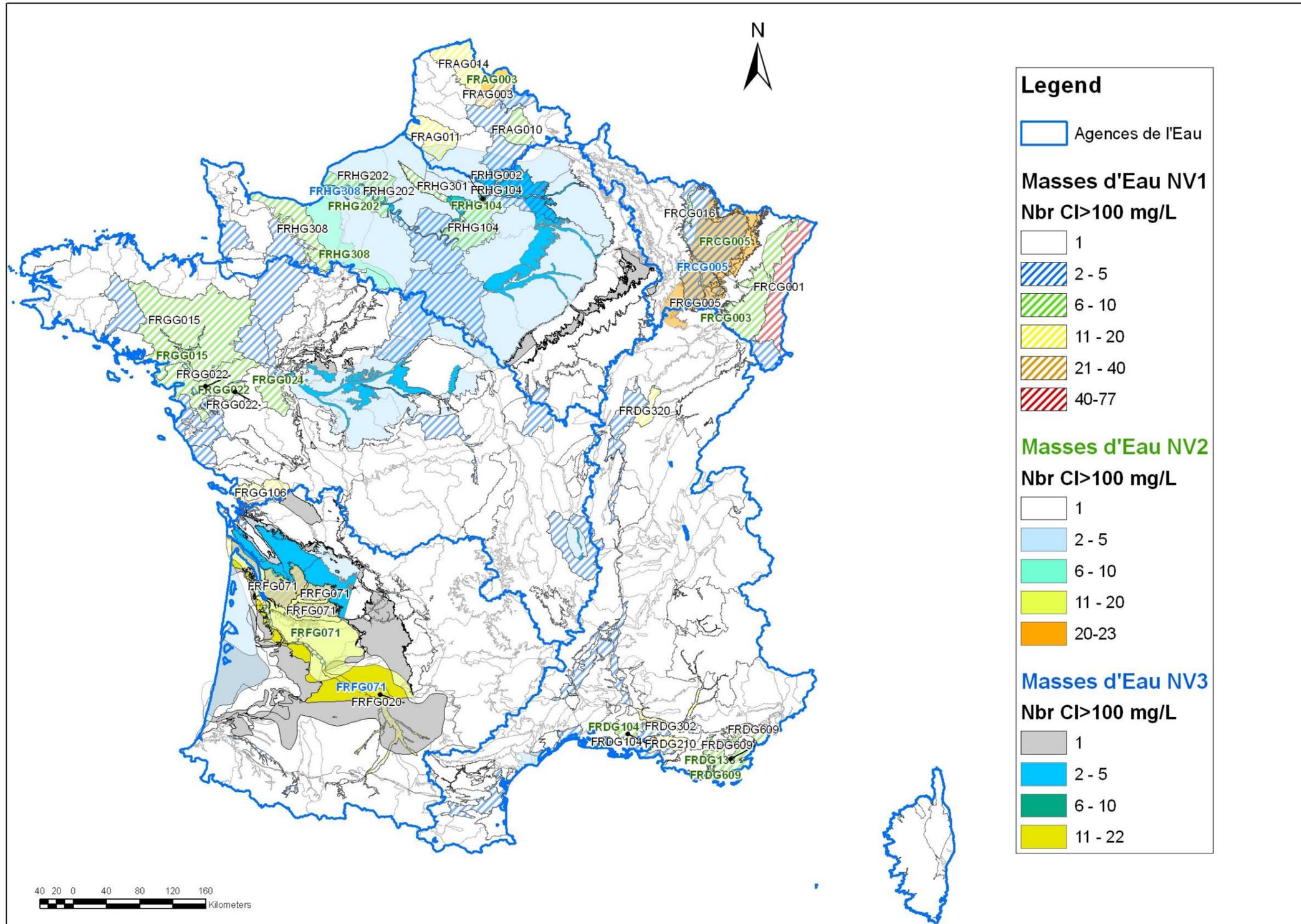


Illustration 5 : Nombre de points concernés par une salinisation (CI > 100mg/L) par masses d'eau (niveau 1 à 3), avec limite des districts hydrographiques des Agences de l'Eau.

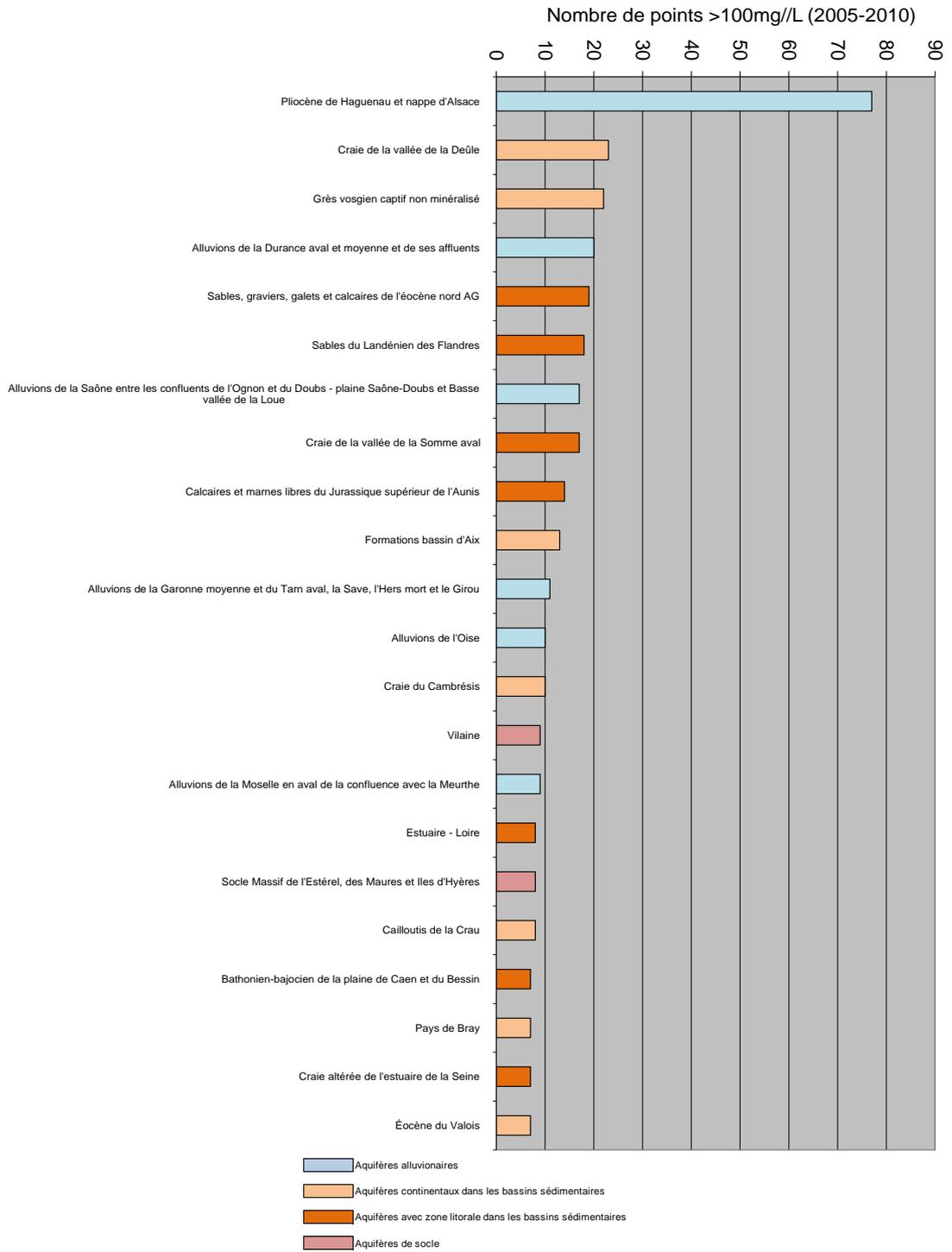


Illustration 6 : Les 22 masses d'eau les plus touchées par la salinisation en France métropolitaine sur (≥7 points concernés par des teneurs moyennes >100 mg/L en Cl).

4. Quelles questions se poser face à une salinisation?

Compte tenu de l'avancement considérable des connaissances sur la qualité des nappes en France métropolitaine, notamment suite à mise en œuvre de la DCE, compte tenu aussi de l'accessibilité à ces données il devient rare qu'on parte de zéro quant à l'évaluation du degré de contamination d'une nappe. Ceci est moins vrai dans certaines régions d'Outre-Mer pour lesquelles l'état de connaissance sur les eaux souterraines reste encore fragmentaire. On dispose donc d'une ligne de base pour l'ensemble des masses d'eau qui a permis d'identifier celles qui sont à risque quant aux phénomènes de salinisation. Il suffit néanmoins souvent d'une seule observation sur un point d'eau, exploité en AEP, de dépassement de seuil d'alerte en terme de salinité pour qu'une suite de questions se pose au gestionnaire de la masse d'eau.

Dans un premier temps on peut se demander s'il s'agit ou non d'un phénomène localisé ou si d'autres points sont ou étaient concernés par un phénomène de salinisation. Le périmètre circonscrit, une étude de la géométrie de la distribution de la salinité permet de tirer des premières hypothèses quant à la nature des phénomènes, les facteurs déclenchant et sur l'impact potentiel. Ces hypothèses doivent être vérifiées et peaufinées en identifiant les sources de la salinité ainsi que la nature de la salinisation. Une ou des sources naturelles peuvent être mobilisées par des actions humaines (exemples : remonté de l'interface eau douce-saumures dans un aquifère contenant des évaporites, déplacement du biseau salé par pompage...), des sources anthropiques peuvent se superposer à des sources naturelles, la distinction des facteurs naturels et anthropiques s'avère souvent complexe. Question cruciale pour la gestion d'une telle masse d'eau est l'aggravation potentielle du problème, on doit donc aborder la question de l'évolution de la salinisation, via l'étude de chroniques existantes, un monitoring de la nappe et l'établissement d'un modèle prédictif. Un tel outil permet ensuite d'établir une stratégie de remédiation via des simulations des effets et des actions correctives. La dernière étape, souvent longue, à l'échelle d'années voir de décennies, est un suivi de ces effets dans le temps pour établir la résorption de la salinisation et l'avancement vers un bon état qualitatif de la masse d'eau.

Face à cette succession logique de questions, nous disposons d'une panoplie d'outil de mesure et de modélisation qui permet d'avancer pas à pas dans une stratégie de diagnostic, suivi et actions correctives.

4.1. A QUEL DEGREE LA NAPPE EST-ELLE CONCERNEE PAR UNE SALINISATION ?

Constat du problème : Le déclencheur d'une étude sur la salinisation d'une ressource en eau souterraine est en général l'observation, sur des puits, piézomètres, sources ou autres points d'accès à l'eau souterraine, d'une salinité s'approchant ou excédant des

valeurs « seuils critiques ». Ces valeurs seuils sont définies par rapport à un ou plusieurs usages de la ressource. Afin de mettre cette observation dans un contexte plus général de l'état qualitatif de la nappe, on exploitera dans un premier temps des bases de données sur la qualité de la nappe (banque ADES pour l'ensemble de la France métropolitaine). L'analyse des données peut donner à la fois un aperçu du nombre des points actuellement concernés par le phénomène de salinisation, l'échelle du problème dans l'espace et son évolution dans le temps. Ce dégrossissement du problème, dans un premier temps sans acquisition de nouvelles données, permet de définir une stratégie de mesures, globales à l'échelle de la masse d'eau ou plus localisées dans les zones concernées.

4.2. QUELLE EST LA GEOMETRIE DE LA SALINISATION ?

Etablir la géométrie, en trois dimensions, de l'interface, souvent complexe, entre l'eau douce et l'eau saline est un premier pas vers l'établissement d'un modèle conceptuel de la salinisation. La troisième dimension, la profondeur, s'avère cruciale puisque des effets de densité font que les eaux salines se trouvent préférentiellement en profondeur, avec une transition plus ou moins nette vers des eaux douces sus-jacentes, interface qui peut se déplacer sous l'influence d'un pompage.

Des sources ponctuelles de salinité, en sous-sol ou en surface peuvent, notamment dans une nappe à flux rapide telle que les nappes alluviales d'accompagnement des rivières, induire la formation de panaches de contamination saline. L'exemple le plus spectaculaire en France est représenté par les **zones salinisées de la nappe d'Alsace**. En Alsace, l'exploitation du gisement de potasse dans les couches salifères de l'Oligocène supérieur a donné lieu à d'importants résidus solides stockés en surface. Leur dissolution a engendré une pollution de la nappe sous forme de trois grandes langues de sel, sur une longueur supérieure à 60 km, partant au Nord-Ouest de Mulhouse et se rejoignant à hauteur de Sélestat (Illustration 7). Les saumures issues de la dissolution des terrils en surface s'infiltrèrent d'abord verticalement, du fait de leur densité, et migrent ensuite latéralement, dans le sens du flux de la nappe, parallèlement au Rhin. La géométrie bien connue de ces panaches, notamment par un suivi de qualité sur un grand nombre de points d'observation et par des relevés géophysiques, permet de faire le lien direct entre les points de contamination (terrils) et la salinisation, même si de nombreuses questions persistent quant à la superposition de ces contaminations avec des sources de salinités naturelles et profondes (Kloppmann, 2010).

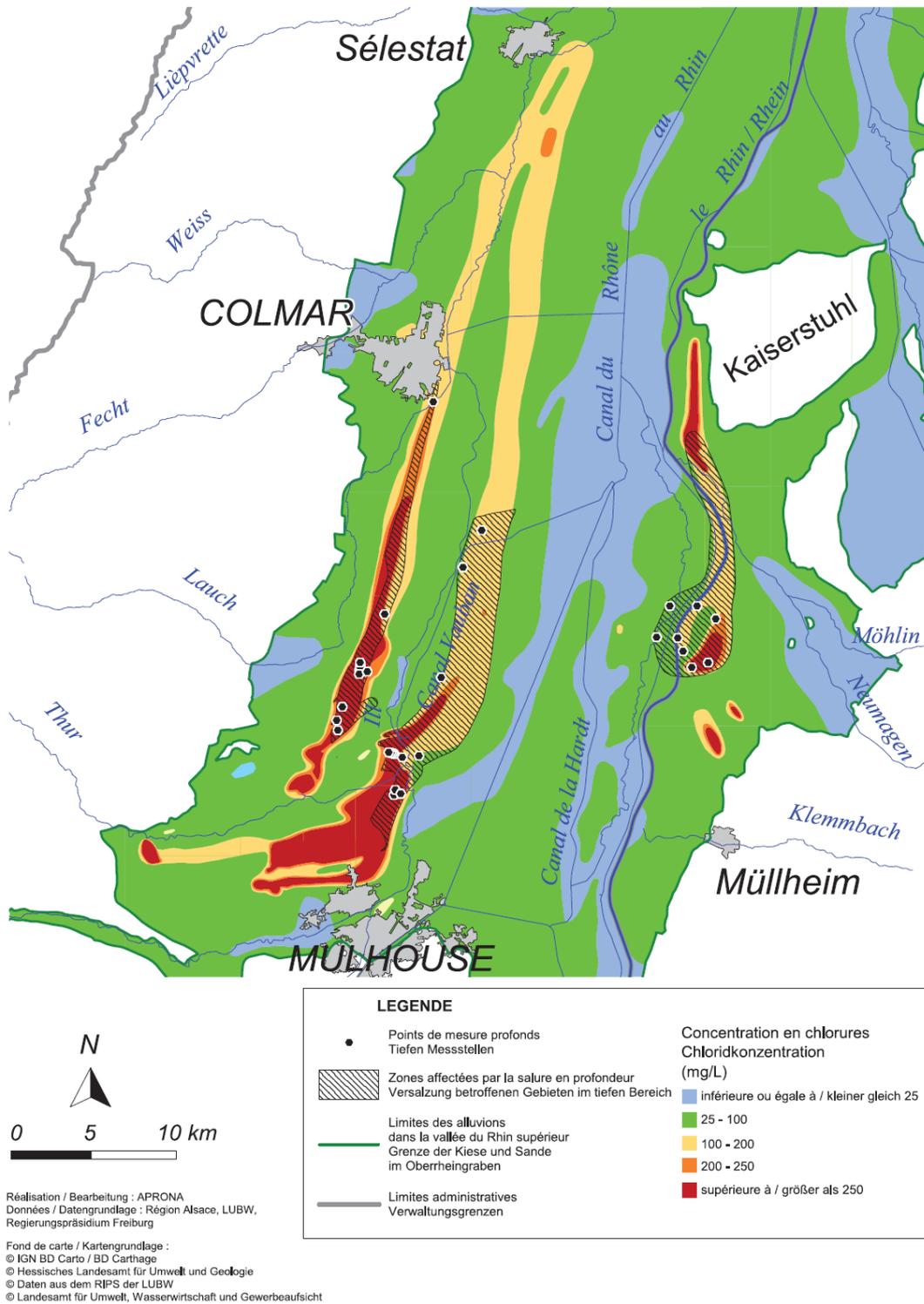


Illustration 7 : Panaches de pollution saline en Alsace et au Pays de Bade (Aprona, 2007)

Dans le contexte particulier des aquifères côtiers, l'eau douce, du fait de la différence de densité, s'installe sur une masse d'eau salée. Une zone d'interface, le **biseau salé**, se forme entre l'eau douce plus légère s'écoulant vers la mer et l'eau de mer sous-jacente plus lourde. Cette interface n'est pas statique, notamment en cas de surexploitation qui peut conduire à une **intrusion marine**. En première approximation, l'interface entre l'eau douce et l'eau de mer peut être assimilée à une limite franche, courbe. La géométrie réelle des interfaces eau douce-eau salée est généralement bien plus complexe que celle décrite par la loi de Ghyben-Herzberg étant donnée l'imbrication de strates de perméabilités différentes dans des nombreux aquifères côtiers, notamment dans un milieu deltaïque (Custodio, 2010, Illustration 8) et dans les milieux hétérogènes karstiques. La distribution souvent complexe des zones à forte et à faible salinité reflète également l'historique des transgressions-régressions antérieures qui ont pu laisser des lentilles d'eaux salées ou douces dans certaines parties de l'aquifère (de Montety, 2008).

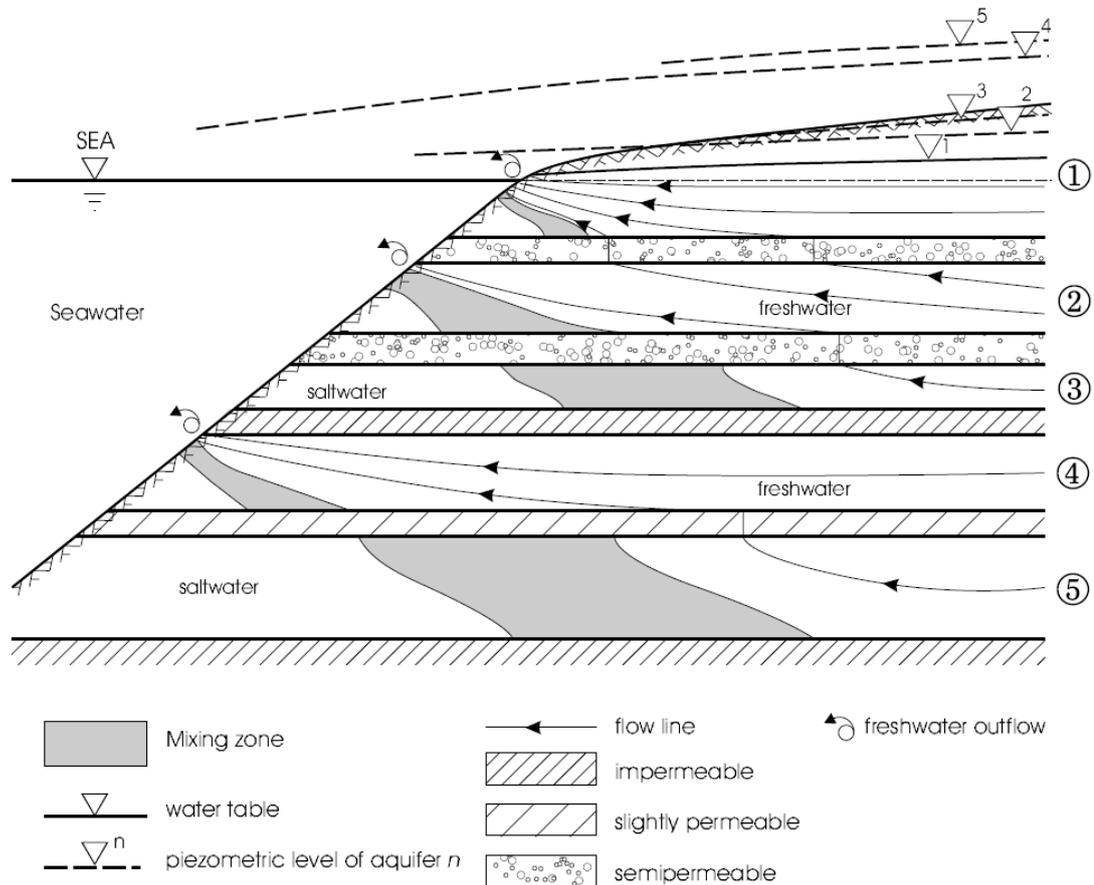


Illustration 8 : Géométrie des interfaces entre eaux saline et douce dans un aquifère multicouches épais. Aquifères alternent avec des acquicludes et chaque aquifère montre une pénétration différente, dépendant pro parte du potentiel dynamique en amont (Custodio, 2002).

Dans le milieu continental, les distributions des salinités peuvent se révéler aussi complexes qu'en milieu côtier, notamment quand il s'agit d'aquifères multicouches ou d'aquifères à forte hétérogénéité latérale et verticale comme les aquifères alluviaux.

Les paramètres de base de toute étude de salinisation sont la conductivité électrique de l'eau et la concentration en chlorures. Le plus souvent, des valeurs élevées de ces deux paramètres, couramment mesurés en routine lors des suivis de qualité des masses d'eau, donnent l'alerte sur un risque de salinisation de la nappe. Comme ils sont mesurés de façon quasi-systématique, il devient possible d'établir des cartes de conductivité, des profils de conductivité au sein de puits, ainsi que des chroniques de l'évolution de la salinité dans des ouvrages individuels. On obtient ainsi une image en trois dimensions de l'étendue du problème ainsi que de son évolution dans le temps.

Une contrainte majeure pour l'étude de la géométrie de la salinisation d'une nappe est l'accessibilité à l'information. En règle générale, on ne dispose que d'un accès ponctuel à la qualité des eaux souterraines via des prélèvements dans des puits, piézomètres, forages, ou encore des sources. Les informations obtenues sur ces points d'accès sont généralement trop fragmentaires pour rendre compte de la complexité des interfaces eaux douces – eaux salines fréquemment observée. Les méthodes géophysiques permettent d'interpoler entre ces observations ponctuelles, dans les parties de l'aquifère non accessibles à l'observation directe. Il devient alors possible d'augmenter la résolution des observations sur des zones ciblées, comme l'interface eau douce-eau marine dans les aquifères côtiers.

4.3. QUELLES SONT LES SOURCES DE LA SALINITE ?

La meilleure connaissance de la distribution d'eau douce et saline dans un aquifère ne donne qu'une première indication sur l'origine ou les origines de la salinité. Des saumures peuvent en effet migrer sur des distances importantes (voir discussion dans Cendon *et al.* (2008) sur la formation du gisement de potasse du bassin de Mulhouse). Des panaches de salure d'origine anthropique sur des dizaines de km ont été rencontrés dans des aquifères alluviaux. On recherchera donc des indices dans la composition chimique et isotopique des eaux salines qui permettraient de remonter à celle des fluides les plus salins dans le système. Selon le mode de formation de ces saumures (dissolution d'évaporites, fluides salines issues de l'évaporation d'eau de mer, eau de mer récente ou ancienne...) les caractéristiques chimiques et isotopiques ne seraient pas les mêmes.

L'identification de ces sources et mécanismes de salinisation nécessite souvent une méthodologie complexe, notamment dans le cas de sources de salinité multiples qui affectent la même masse d'eau. Dans de nombreux cas il devient possible de discriminer les sources et vecteurs de salure en combinant :

- des modèles hydrodynamiques capables de prendre en compte le transport d'éléments dissous ainsi que les effets de densité,

- des méthodes géophysiques, y compris celles de la géophysique aéroportée,
- des méthodes géochimiques, isotopiques et radioisotopiques.

A partir des simples mesures physico-chimiques (conductivité), en passant par l'analyse chimique des chlorures, puis des autres éléments majeurs, puis mineurs et traces, on arrive à des premières conclusions quant à l'origine de la salinité.

L'interprétation des éléments majeurs en termes de faciès chimique s'avère précieux quand il s'agit de distinguer des groupes d'eau de chimisme et de minéralisation (salinité) différents au sein d'un aquifère ou système d'aquifères. On peut également identifier des relations entre ces familles notamment en cas de mélanges entre des eaux douces et salines. La représentation des concentrations en éléments majeurs sous forme de diagrammes binaires peut faire apparaître plusieurs éléments utiles pour l'identification des sources de salinité tels que des corrélations linéaires entre le pôle salin et le pôle d'eau douce indiquant une source de salinité unique, diluée par une eau douce unique. Les rapports de concentration entre éléments majeurs et entre éléments traces et chlorures (exemple Br/Cl) ont été largement utilisés dans les études de salinisation mais aussi de contamination par des eaux usées ou autres polluants. On a pu, dans de nombreuses études, distinguer des sources de salinité liées à l'influence marine (biseau salée, précipitations et aérosols marins, paléo-eaux marines), à la dissolution d'évaporites et à l'infiltration d'eaux usées. Souvent, on cible ensuite un nombre restreint des points de mesures ou d'observation pour une caractérisation plus fine (éléments traces, isotopes) dans des secteurs clefs identifiés auparavant.

4.4. QUELS SONT LES MECANISMES DE SALINISATION, NATURELS OU ANTHROPIQUES ?

Cette distinction s'avère cruciale quant à la définition des mesures à prendre. Une source anthropique de la salinité (irrigation, fertilisation, résidus miniers, eaux usées, sel de route...) implique automatiquement une origine humaine du problème et, éventuellement, la possibilité d'agir directement sur les sources en les éliminant ou en restreignant certaines pratiques. L'identification d'une source naturelle, en sous-sol, tel que des dépôts de sel (évaporites), l'eau de mer ou des saumures sédimentaires n'exclue pas que des actions humaines soient à l'origine de la salinisation. Une modification du champ de flux par l'exploitation de la nappe, par des injections (ex. CO₂ ou autres gaz) ou par l'exploitation géothermale, peut entraîner un déplacement de l'interface eau douce-eau saline. Dans ce cas, on ne peut pas éliminer la source ; on peut agir en revanche sur les actions ayant déclenché la salinisation. Une autre configuration, avec des sources ET des vecteurs de salinisation naturels, rendrait la gestion plus complexe encore. Souvent la fermeture de captage s'avère la seule option, mais selon les cas, une gestion active de l'aquifère avec recharge d'eaux douces de la surface peut être envisagée.

La distinction de salinisation naturelle et anthropique peut s'appuyer sur la chronologie des événements : L'existence d'un pôle salin ancien (supérieur à quelques dizaines

d'années) peut démontrer le caractère naturel de la salinisation. Il existe des moyens de datation des eaux, notamment les radio-isotopes ^{14}C et ^3H et des traceurs chimiques tel que les CFC et le SF_6 qui permettent d'estimer les temps de résidence des eaux dans le système aquifère et donc d'établir une chronologie de la salinisation. Il a été ainsi démontré que certaines « intrusions salines » dans des aquifères côtiers français sont en fait des vestiges d'invasions marines anciennes. Citons à titre d'exemples les nappes du Jurassique supérieur de l'Aunis (Marais Poitevin) où l'on rencontre à la fois un biseau salé récent et une salinisation ancienne d'environ 7000 ans (Anongba, 2007) et la partie captive du Bathonien-Bajocien de la plaine de Caen et du Bessin (Barbecot *et al.*, 1998, 2000). Dans les deux cas, les invasions marines sont liées à des transgressions pendant la période Atlantique (entre 8000 et 4700 ans d'âge) et ne sont donc pas à assimiler à des intrusions salines récentes induites par une surexploitation de la nappe côtière.

4.5. QUEL A ETE ET SERA L'EVOLUTION DE LA SALINISATION ?

A une échelle annuelle à décennale, l'état de salinisation d'une nappe peut évoluer, notamment dans le cas d'une nappe fortement impactée par l'activité humaine (surexploitation). Un suivi de la qualité de la nappe à cette échelle de temps peut se révéler important pour trois raisons :

1. L'évolution de la salinité dans le passé peut être mise en relation causale avec les variations des paramètres qui relèvent de l'exploitation (volumes prélevés, évolution des niveaux piézométriques) ou des variations hydroclimatiques (recharge efficace...).
2. L'extrapolation des tendances de salinité permet d'estimer à quelle échéance on risque de dépasser certains seuils liés aux usages de la masse d'eau.
3. Le suivi de la salinisation est indispensable pour évaluer l'impact de la stratégie de remédiation aux problèmes de salinisation.

Aborder l'évolution de la salinité nécessite un suivi, sur les mêmes points d'observation, à l'échelle pluriannuelle. L'exploitation des bases de données telles que ADES, permet d'extraire ce type d'information pour un secteur et une période donnée du passé, dont on n'est pas maître. Il peut donc se révéler nécessaire d'instaurer un suivi spécifique pour une nappe pour laquelle un problème de salinisation a été identifié. Ainsi, le "Pliocène de Hagueneau et la nappe d'Alsace", qui constitue la masse d'eau la plus concernée par la salinisation en France, a fait l'objet d'un programme continu de suivi de la qualité depuis le début des années 1970 (Krebs, 1991; Chabart et Elsass, 1999; Schomburgk et Elsass, 2008). Ce suivi a notamment permis d'évaluer l'efficacité des mesures de remédiation conséquentes mises en place.

4.6. QUELLE STRATEGIE A METTRE EN PLACE POUR LA REMEDIATION ?

Les actions à entreprendre peuvent se classer en deux catégories. Il s'agit d'une part d'agir sur les causes anthropiques directes (exemple : résidus miniers en surface, saumures d'origine industrielle) et indirectes (sur-pompage entraînant une intrusion saline, irrigation en climat aride...) qui ont déclenché la salinisation. D'autre part, des actions directes sur l'aquifère concerné par la salinisation sont envisageables, notamment la recharge artificielle par de l'eau douce de provenance variée (eaux de pluie, eaux superficielles, eaux usées traitées). Ces actions, relevant du concept de la « gestion active », auraient pour effet soit de créer un écran hydraulique empêchant une progression d'une intrusion marine, soit de créer une « bulle d'eau douce » pouvant être exploitée au sein d'un aquifère qui autrement ne serait pas exploitable du fait de sa salinité.

A titre d'exemple, nous citons à nouveau la nappe d'Alsace, très impactée dès le début de l'exploitation de la potasse par une salinisation importante. Les déchets solides des Mines de Potasse d'Alsace (MDPA) sont la cause principale de la salinisation de cette nappe, avec la dissolution des déchets solides de l'exploitation de la potasse stockés en surface (terrils). Les saumures produites lors du traitement des sels bruts ont également contribué à la salinisation, notamment de la partie allemande de la nappe, via les bassins de stockage temporaires de l'île de Fessenheim. Des **mesures de contrôle et de remédiation** ont été entreprises à partir des années 1970 pour réduire l'impact des terrils sur la nappe. Ces mesures ont d'ores et déjà conduit à une résorption partielle des salinisations, même si l'inertie du système avec des temps de résidence de l'ordre de plusieurs décennies interdit une diminution rapide des zones impactées. Dans certains secteurs, des puits AEP situés en aval des terrils montrent en effet une constante augmentation des teneurs en chlorures depuis environ 1980 en dépit des pompages de fixation et de dépollution qui interceptent la salure provenant des terrils. Pour certains de ces cas, on soupçonne, par ailleurs, des sources naturelles qui se superposeraient à la contamination anthropique. Les mesures prises comprennent :

- des puits de fixation, situés directement en aval des terrils et agissant comme barrières hydrauliques en pompant les saumures qui sont par la suite transportées vers le Rhin via le saumoduc,
- la dissolution accélérée et contrôlée des terrils avec une récupération des saumures résultantes (élimination vers le Rhin),
- la neutralisation des terrils à faibles teneurs en sel par étanchéifiasson/végétalisation.

L'exemple cité est celui d'une salinisation anthropogénique sur laquelle on peut agir directement en éliminant ou atténuant les sources de salinité (terrils, bassins de rétention). D'autres configurations nécessiteront d'autres stratégies, telle qu'une diminution des volumes pompés dans des puits côtiers, l'établissement d'écrans hydrauliques via des galeries de puits d'injection le long du littoral, la création de

« bulles d'eau douce » dans les aquifères impactés dans leur totalité ou en grande partie et donc irrécupérable à une échelle de temps raisonnable.

5. Quels sont les outils de diagnostic pour répondre aux questions ?

Comme souligné, les sources et mécanismes qui peuvent conduire à une salinisation des masses d'eau sont multiples et liés aussi bien à des processus naturels qu'induits par l'homme. On rencontre fréquemment des situations complexes où plusieurs sources et vecteurs de salinisation se superposent. Les méthodes géophysiques, géochimiques et isotopiques s'intègrent dans une méthodologie de diagnostic et de suivi à plusieurs niveaux et dans différentes phases, commençant avec le constat initial et passant par l'établissement et le peaufinage du modèle conceptuel, la mise en place éventuelle d'un modèle de prédiction, jusqu'au suivi des actions de remédiation. Les deux domaines, géochimie et géophysique, offrent un choix très large d'outils et de techniques individuelles, qui peuvent être choisis et combinés selon le cas à traiter et au fur et à mesure que l'acquisition des connaissances avance.

De façon très générale, ces outils permettent :

1. de **définir la géométrie** de la salinisation et d'en déduire des hypothèses sur les mécanismes en jeu,
2. de **caractériser les pôles de mélange**, eaux salines et douces, au sein de l'hydrosystème et de les attribuer à des sources de salinité et mécanismes de salinisation,
3. d'**établir la structure des « âges » des eaux salines** et douces dans l'aquifère concerné par la salinisation et d'en conclure l'origine anthropique ou naturelle de la salinité.

5.1. POTENTIEL DES OUTILS GEOPHYSIQUES

La **géophysique** permet d'investiguer la répartition de la résistivité/conductivité et donc du phénomène de la salinisation dans une dimension (logs de puits/forages/piézomètres), deux dimensions (profils verticaux, carte de conductivité...), voire trois dimensions (tomographie). Une contrainte majeure pour l'étude de la salinisation d'une nappe est l'accessibilité à l'information. En règle générale, on ne dispose que d'un accès ponctuel à la qualité des eaux souterraines via des prélèvements dans des puits, piézomètres, forages ou encore des sources. Les informations obtenues sur ces points d'accès sont généralement trop fragmentaires

pour rendre compte de la complexité des interfaces eaux douces – eaux salines fréquemment observée. Les méthodes géophysiques permettent d'interpoler entre ces observations ponctuelles, dans les parties de l'aquifère non accessibles à l'observation directe. Il devient alors possible d'augmenter la résolution des observations sur des zones ciblées, comme l'interface eau douce-eau marine dans les aquifères côtiers.

5.2. POTENTIEL DES OUTILS GEOCHIMIQUES

La géochimie élémentaire et isotopique a pu fournir un certain nombre d'outils et les assembler dans une "boîte à outils" spécifique aux problèmes de la salinisation. Il s'agit notamment des isotopes stables des éléments constituant l'eau (O, H) ainsi que ceux des éléments dissous (B, Sr, Li, S, O...). On les combine souvent avec des traceurs du temps de résidence de l'eau et de la salinité dans les aquifères, notamment les radioéléments (^{14}C , tritium,...) et, pour des eaux récentes, les CFCs, SF_6 et autres traceurs anthropogéniques. Ces derniers peuvent donner des informations précieuses sur la chronologie de la salinisation et donc sur l'impact relatif des mécanismes naturels et anthropiques.

En ce qui concerne les **paramètres géochimiques et isotopiques**, certains sont facilement mesurables sur le terrain ou en laboratoire à des coûts permettant de larges séries d'analyses et donc une caractérisation spatiale et temporelle des phénomènes de salinisation à l'échelle d'une masse d'eau. Il s'agit notamment de la **conductivité** et des concentrations en **chlorures**. La première reflète la minéralisation sous forme ionique, sachant que la conductivité est essentiellement déterminée par les ions Cl^- , à un moindre degré par les autres ions. Sa mesure par sonde rend possible des diagraphies dans des forages. Des mesures systématiques de la conductivité permettent d'établir la répartition de la salinisation (latérale ou verticale), en complément des méthodes géophysiques. Les **chlorures** sont un indice direct de la salinisation, même s'il existe des eaux assez fortement minéralisées non chlorurées (sulfatées notamment) mais leurs salinités sont limitées par la solubilité des phases minérales. Les concentrations des **éléments majeurs**, Na, K, Ca, Mg, Cl, SO_4 , HCO_3^- , NO_3^- , déterminent le faciès chimique de l'eau. Leur interprétation graphique permet d'identifier des mélanges et pôles de mélange, donc de caractériser le ou les pôles salins, notamment celui de l'eau de mer (pure, évaporée et/ou diagénétiquement modifiée) ou celui des saumures issues de la dissolution d'évaporites. Il est également possible de distinguer une salinisation en progression d'une salinisation en régression.

Une fois l'ampleur et la géométrie de la salinisation établies sur la base des techniques géophysiques et par des outils géochimiques simples, les premières hypothèses sur les sources et les mécanismes de salinisation peuvent être testés et peaufinés de façon ciblée, au moyen de certains **éléments traces** (Br, B, F, Sr, Rb, As, Li...) et **traceurs isotopiques**.

Souvent interprétés sous forme de rapports X/Cl ou dans des diagrammes binaires X vs. Cl, ou bien X/Cl vs. Cl, les **éléments traces** permettent de mieux différencier saumures primaires et secondaires, eau de mer, eau de mer évoluée par interaction eau-roche... Seuls le Br peut être considéré comme conservatif dans la plupart des nappes, le comportement des autres éléments traces dépend de la présence de

certaines minéraux (notamment argiles et hydroxydes de Fe et Mn, sulfures), de la matière organique et de l'activité bactérienne.

Les **terres rares** ont été utilisées dans quelques cas comme indicateur indirect des sources de salinité. Elles renseignent en effet sur les mélanges entre masses d'eau ayant interagit avec les minéraux du sol/des aquifères et indiquent donc des flux/échanges entre aquifères. Les eaux usées, qui peuvent être sources de salinité, sont marquées par une anomalie en Gd dans les pays développés.

Les **isotopes stables de l'eau** $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ sont des traceurs conservatifs de la molécule d'eau en dehors du contexte des eaux géothermales ou carbogazeuses. Elles permettent l'identification d'eau marine ou d'eau marine évaporée ainsi que celle de l'évaporation d'eaux de surface. Ils constituent des traceurs parfaits de mélanges entre masses d'eau. Les **isotopes stables du S et O des sulfates** ($\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{18}\text{O}$) permettent d'identifier les sources de sulfates (gypse, anhydrite, S organique, oxydation de sulfures), de tracer de l'eau de mer actuelle ou ancienne (changement de signature au cours du temps), d'estimer l'âge géologique des évaporites dissoutes si elles sont à l'origine de la salinisation. Leur signature peut être impactée par réduction bactérienne des sulfates. Les **isotopes stables du B** ($\delta^{11}\text{B}$) constituent un co-traceur de la salinisation avec la possibilité de distinguer l'eau de mer (évaporée ou non) de la dissolution d'évaporites. Certaines sources anthropiques de la salinisation sont marquées par des signatures spécifiques du bore notamment les eaux usées et la salinisation d'origine agricole (irrigation). Les **isotopes du Sr** ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) sont des traceurs fiables des interactions eau-aquifère et permettent donc d'identifier des mélanges et la nature des pôles salins (dissolution d'évaporites, eau de mer). Ils ne montrent pas de fractionnement lors de l'évaporation de l'eau de mer mais des variations caractéristiques selon l'âge géologique, ce qui permet de les utiliser pour aborder la question de l'âge des évaporites ou saumures primaires.

En complément de ces outils bien établis par des centaines d'études partout dans le monde, certains isotopes émergent comme nouveaux traceurs de la salinité. Il paraît au premier regard particulièrement séduisant d'utiliser les **isotopes stables du Cl** ($\delta^{37}\text{Cl}$) comme traceur direct et conservatif de la chlorinité. Mais ils ne paraissent que de faibles variations isotopiques dans les différentes sources de salinité et le fractionnement est surtout lié à des processus physiques (diffusion...). En conséquence on observe une superposition des signatures des évaporites et des saumures marines résiduelles ce qui limite fortement l'utilisation de cet outil. Les **isotopes stables du Li** ($\delta^7\text{Li}$), portent un potentiel certain comme co-traceur de la salinisation, avec leur large gamme de variations naturelles et le bon pouvoir discriminant qui en résulte. Mais, loin d'être un traceur conservatif, le lithium est très sensible aux interactions eau-roche en fonction de la température.

Au-delà de la question des sources de salinité on peut s'interroger sur la **chronologie** et donc sur les raisons d'une salinisation. Les outils de « datation » des eaux, qui permettent d'estimer leur temps de résidence dans l'aquifère, offrent la possibilité de séparer des zones dans l'aquifère où potentiellement un impact humain est envisageable pour expliquer la salinisation. Nous disposons d'un certain nombre d'indicateurs d'eaux récentes (<50 ans, Tritium ^3H , ^{129}I , ^{36}Cl , CFC, SF_6) qui marquent

les composantes jeunes, salines (ex. eau de mer actuelle) ou douces (précipitations), dans un système salinisé. Ils se révèlent utiles notamment dans l'étude du biseau salé et des systèmes anthropisés (irrigation, salage des routes...) et donc dans la distinction de salinisation anthropogénique et géogénique.

A une échelle temporelle beaucoup plus longue, les isotopes stables et radioactifs du carbone ($\delta^{13}\text{C}$, A^{14}C) ont été utilisés comme indicateur d'eaux anciennes (centaines à milliers d'années) pour lesquels on doit assumer une salinisation d'origine naturelle, géogénique. Ils aident notamment à distinguer une intrusion marine récente dans des aquifères côtiers d'intrusion anciennes (transgressions, eau de mer « fossile »).

Ces renseignements influent directement sur le choix des options d'action et de remédiation face à une salinisation d'un aquifère. C'est notamment l'identification de pôles de salinité géogéniques qui pose des contraintes graves sur les possibilités d'agir. Si la source de la salinité se situe au sein même de la masse d'eau ou dans les aquifères sous- ou sus-jacents, il s'avère impossible de l'éliminer, contrairement aux sources anthropiques, situées en surface, dont on peut restreindre l'impact par des actions directes. Les options de gestion seront donc plutôt de nature indirecte, on peut essentiellement jouer sur les prélèvements afin d'éviter des remontées d'eaux salines et/ou les mélanges entre eaux douces et eaux salines. La recharge active d'un aquifère salin par des eaux douces de surface (y compris des eaux non conventionnelles comme les eaux usées) est une autre piste, exploitée de plus en plus fréquemment face à des situations où l'état de salinisation est trop grave pour toute autre remédiation.

6. Concept général de diagnostic et remédiation de la salinisation d'une masse d'eau

L'application des méthodes géophysiques et géochimiques (comprenant les outils isotopiques) s'inscrit dans une démarche générale face à des problèmes de salinisation des aquifères, allant du constat du problème jusqu'à sa simulation numérique et à la mise en place et au suivi des actions de remédiation :

1. **Constat du problème** : Le déclencheur d'une étude sur la salinisation d'une ressource en eau souterraine est en général l'observation, sur des puits, piézomètres, sources ou autres points d'accès à l'eau souterraine, d'une salinité s'approchant ou excédant des valeurs « seuils critiques ». Ces valeurs seuils sont définies par rapport à un ou plusieurs usages de la ressource.
2. **Suivi du problème** : Une première mesure à mettre en place peut être un suivi de la salinité dans le temps sur un ou plusieurs points d'observation. Ce suivi permet d'évaluer des variations temporelles et notamment des tendances d'aggravation du problème, par rapports aux seuils prédéfinis.
3. **Modèle conceptuel de la salinisation** : Un premier modèle conceptuel hydrogéologique et hydrochimique sera basé sur l'ensemble des informations géologiques, hydrogéologiques, géophysiques et géochimiques/minéralogiques disponibles sur le système. Il prendra également en compte les observations initiales sur la salinisation et l'ensemble des sources potentielles (naturelles et anthropiques) soupçonnées dans le contexte local et régional. Au fur et à mesure que l'acquisition de nouvelles données avance, ce modèle sera adapté et peaufiné.
4. **Modèle numérique de simulation et prédiction des phénomènes de salinisation** : Un tel modèle sera basé sur le modèle conceptuel évolutif défini auparavant. Il devrait, à minima, prendre en compte l'hydrodynamique de l'aquifère et le transport conservatif de la salinité. Souvent, il s'avère indispensable d'inclure des effets densitaires. Dans certaines conditions, on ne peut négliger des réactions chimiques qui se déroulent dans l'aquifère (par exemple : dissolution d'évaporites, autres échanges avec l'encaissant...). Compte tenu de la relative lourdeur de l'approche, un modèle numérique ne peut être établi systématiquement pour tout problème de salinisation d'aquifère. Néanmoins, il s'agit d'un outil incontournable s'il on souhaite simuler les processus de salinisation et les extrapoler dans le temps. Notamment, il permettra de prédire les effets d'actions de remédiation, souvent coûteuses, avant et pendant leur mise en place. Il sera également possible de simuler l'effet de variations hydro-climatiques sur le phénomène de salinisation.

5. **Actions de remédiation et suivi de leurs effets** : Les actions à entreprendre peuvent se classer en deux catégories. Il s'agit d'une part d'agir sur les causes anthropiques directes (exemple : résidus miniers en surface, saumures d'origine industrielle) et indirectes (sur-pompage entraînant une intrusion saline, irrigation en climat aride...) qui ont déclenché la salinisation. D'autre part, des actions directes sur l'aquifère concerné par la salinisation sont envisageables, notamment la recharge artificielle par de l'eau douce de provenances diverses (eaux de pluie, eaux superficielles, eaux usées traitées). Ces actions, relevant du concept de la « gestion active », auraient pour effet soit de créer un écran hydraulique empêchant une progression d'une intrusion marine, soit de créer une « bulle d'eau douce » pouvant être exploitée au sein d'un aquifère qui autrement ne serait pas exploitable du fait de sa salinité.

La combinaison de méthodes géophysiques et géochimiques peut donc contribuer à plusieurs étapes de la méthodologie générale esquissée ci-dessus. Elles servent à mieux définir le système et donc mieux contraindre le modèle conceptuel initial. Ensuite, c'est l'acquisition progressive de données qui permet de peaufiner le modèle conceptuel par itérations successives et de valider ou invalider des hypothèses sur les sources et mécanismes de la salinisation. En même temps, ces méthodes peuvent apporter leur appui aux modèles prédictifs censés reproduire voire prédire les phénomènes observés, en fournissant des contraintes supplémentaires à ces modèles.

L'illustration 9 montre la place des méthodes géophysiques et géochimiques comme outils complémentaires pour le diagnostic et la remédiation d'une salinisation de masse d'eau. Leur utilisation intervient en général après des mesures ou observations initiales qui mettent en évidence des phénomènes ou risques de salinisation et donc après le constat du problème. C'est souvent pour vérifier un premier modèle conceptuel qu'on fait appel à ces outils de caractérisation. Ce modèle conceptuel de la salinisation va évoluer au fur et à mesure que des nouvelles données géophysiques et géochimiques permettent de corriger ou peaufiner la compréhension du phénomène. Si un modèle numérique prédictif est mis en place, il sera basé sur un des modèles conceptuels et évoluera à son tour au gré de l'amélioration des modèles conceptuels. Des actions de remédiation pourront être entreprises sur la base de simulations d'un tel modèle prédictif. Dans cette phase, les méthodes géophysiques et géochimiques ont à nouveau leur place, cette fois pour suivre et contrôler l'efficacité des mesures entreprises. Le suivi géochimique se limitera à une sélection de paramètres indicateurs qui se sont révélés pertinents lors des phases de diagnostic. Un tel suivi doit permettre d'évaluer et de quantifier la régression de la salinisation en fonction du temps.

Des boucles de rétroaction entre suivi, modèle numérique et mesures de contrôle de la salinité permettront par la suite d'adapter et d'optimiser les actions entreprises.

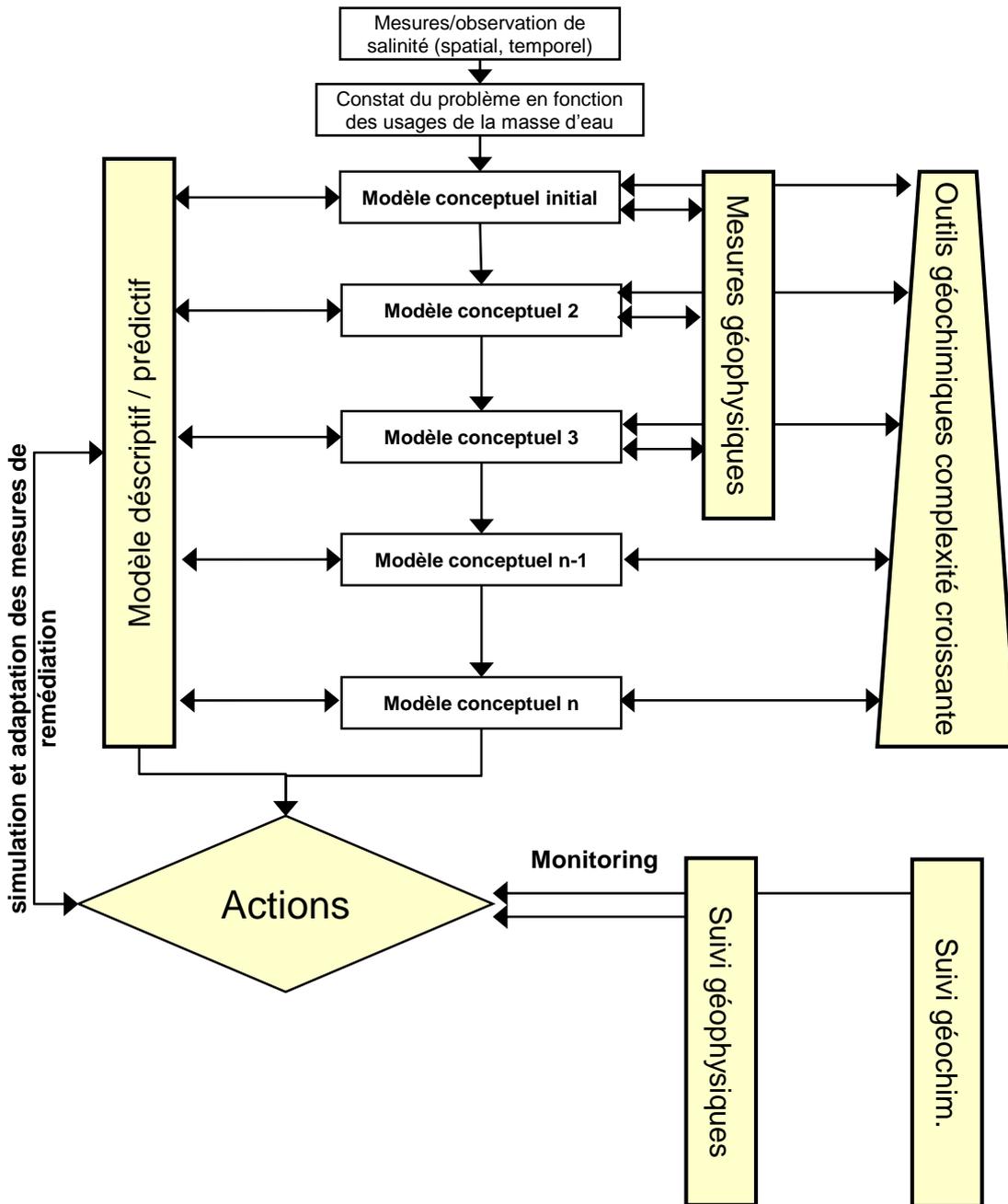


Illustration 9 : Rôle des méthodes géophysiques et géochimiques dans un plan de diagnostic et remédiation d'une salinisation de masse d'eau

7. Bibliographie

- Anongba B. (2007) Identification du système hydrogéologique des formations quaternaires et callovo-oxfordiennes du Marais Poitevin par approche couplée minéralogique, hydrodynamique et géochimique. PhD thesis, Université de Poitiers, Poitiers, 379 pp.
- Aprona (2007) Indicateurs transfrontaliers pour la protection de la nappe dans le Fossé rhénan supérieur Grenzüberschreitende Indikatoren zum Schutz des Grundwassers im Oberrheingraben. Rapport final INTERREG III, 188pp.
- Barbecot F., Marlin C., Gibert E., and Dever L. (1998) Identification and characterization of a saline wedge in the Bajocian-Bathonian coastal aquifer of the area of Caen (France). *Comptes Rendus Acad. Sci. Ser II-A* 326, 539-544.
- Barbecot F., Marlin C., Gibert E., and Dever L. (2000) Hydrochemical and isotopic characterisation of the Bathonian and Bajocian coastal aquifer of the Caen area (northern France). *Appl. Geochem.* 15, 791-805.
- Brenot A., Allier D., et Dumon A. (2008) Identification des zones à risque de fond géochimique élevé dans les cours d'eau et les eaux souterraines en Guadeloupe. Report RP-55709-FR, BRGM Orléans, 102 pp.
- Cendón D. I., Ayora C., Pueyo J. J., Taberner C. et Blanc-Valleron M. M. (2008) The chemical and hydrological evolution of the Mulhouse potash basin (France): Are "marine" ancient evaporites always representative of synchronous seawater chemistry? *Chem. Geol.* 252, 109-124.
- Chabart M. et Elsass P. (1999) Contrôle et surveillance de la salinité de la nappe phréatique d'Alsace - Rapport de synthèse des mesures effectuées en 1998. Rapport BRGM/RR-40663-FR, BRGM.
- Custodio E. (2002) Coastal aquifers as important natural hydrogeological structures. In: Bocanegra, Martínez, and Massone Eds.), *Groundwater and Human Development*.
- Custodio E. (2010) Coastal aquifers of Europe: an overview. *Hydrogeol. J.* 18, 269-280.
- Daessle M., Join J.L, (1988), Cliché de salinité des nappes souterraines de la côte Ouest de l'Île de la Réunion. BRGM/88-REU-005.
- De Montety V. (2008) Salinisation d'un Aquifère Captif Côtier en Contexte Deltaïque - Cas de La Camargue (Delta du Rhône, France), Thèse, Université d'Avignon.
- Frissant N., René-Corail C., coll Bonnier J. et De La Torre Y. (2005) : Le phénomène d'intrusion saline à La Réunion : état des connaissances et synthèse des données disponibles. Rapport BRGM/RP-54330-FR, 64 p., 27 ill., 4 tabl.
- Kharaka, Y. K. and J. S. Hanor (2005). "5.16 - Deep Fluids in the Continents: I. Sedimentary Basins " *Treatise on Geochemistry*. v. 5, chapter 16, p. 499-540.

- Kloppmann W. (2010) - Synthèse des travaux scientifiques portant sur la salure de l'aquifère rhénan (méthodes géochimiques et isotopiques). Rapport final BRGM/RP-59171-FR
- Kloppmann W., Bourhane A., Asfirane F. (2011) Méthodologie de diagnostic de l'origine de la salinité des masses d'eau. Emploi des outils géochimiques, isotopiques et géophysiques. BRGM/RP-60026-FR .
- Kloppmann W., Bourhane A., Schomburgk S. (2010), Salinisation des masses d'eaux en France métropolitaine et dans l'Outre-mer. Rapport BRGM/RP-59496-FR.
- Krebs G. (1991) Contrôle et surveillance de la salinité de la nappe phréatique dans le Département du Haut-Rhin. Rapport de synthèse des mesures effectuées en 1990. Rapport R32689 ALS 4S91, BRGM SGALS.
- Ratsimihara T., et Dörfliger N., (2010), Étude des conséquences du changement climatique sur l'intrusion saline dans les aquifères côtiers de la Guadeloupe, état de la salinisation des différents systèmes aquifères. Rapport d'avancement, Juin 2010.
- Schomburgk S. et Elsass P. (2008) Contrôle et surveillance de la salinité de la nappe phréatique d'Alsace dans le Bassin Potassique et à l'aval (68) Rapport de synthèse des mesures effectuées en 2007. Rapport BRGM/RP-56420-FR BRGM, Orléans.
- Vittecoq B., Mathieu F., Lachassagne P., Brugeron A. (2007), Localisation du biseau salé sur la nappe du Lamentin : apport de la méthode géophysique par panneau électrique. Rapport final, BRGM/RP-55554-FR.



**Centre scientifique et technique
Service EAU**

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34