

**THESE
POUR LE DIPLOME D'ETAT
DE DOCTEUR EN PHARMACIE**

**Soutenue publiquement le 5 décembre 2019
Par M. DELMOTTE Victor**

**Les ions perchlorate dans les eaux :
Impact sanitaire et environnemental**

Membres du jury :

Président :

M. CHEVALIER Dany, Maître de Conférences des Universités, Laboratoire de Toxicologie, Université Lille

Directeur, conseiller de thèse :

Mme GRAVE Béatrice, Maître de Conférences des Universités, Laboratoire de Toxicologie, Santé Publique et Environnement, Université Lille

Assesseurs :

Mme HUS Céline, Docteur en Pharmacie, Pharmacien titulaire, Le Quesnoy
Mme LANCEL Mathilde, Docteur en Pharmacie, Pharmacien hospitalier, hôpital privé Arras
Les Bonnettes

3, rue du Professeur Laguesse - B.P. 83 - 59006 LILLE CEDEX

☎ 03.20.96.40.40 - 📠 : 03.20.96.43.64

<http://pharmacie.univ-lille2.fr>

Université de Lille

Président :	Jean-Christophe CAMART
Premier Vice-président :	Damien CUNY
Vice-présidente Formation :	Lynne FRANJIÉ
Vice-président Recherche :	Lionel MONTAGNE
Vice-président Relations Internationales :	François-Olivier SEYS
Directeur Général des Services :	Pierre-Marie ROBERT
Directrice Générale des Services Adjointe :	Marie-Dominique SAVINA

Faculté de Pharmacie

Doyen :	Bertrand DÉCAUDIN
Vice-Doyen et Assesseur à la Recherche :	Patricia MELNYK
Assesseur aux Relations Internationales :	Philippe CHAVATTE
Assesseur à la Vie de la Faculté et aux Relations avec le Monde Professionnel :	Thomas MORGENROTH
Assesseur à la Pédagogie :	Benjamin BERTIN
Assesseur à la Scolarité :	Christophe BOCHU
Responsable des Services :	Cyrille PORTA

Liste des Professeurs des Universités - Praticiens Hospitaliers

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
Mme	ALLORGE	Delphine	Toxicologie
M.	BROUSSEAU	Thierry	Biochimie
M.	DÉCAUDIN	Bertrand	Pharmacie Galénique
M.	DEPREUX	Patrick	ICPAL
M.	DINE	Thierry	Pharmacie clinique
Mme	DUPONT-PRADO	Annabelle	Hématologie
M.	GRESSIER	Bernard	Pharmacologie
M.	LUYCKX	Michel	Pharmacie clinique
M.	ODOU	Pascal	Pharmacie Galénique
M.	STAELS	Bart	Biologie Cellulaire

Liste des Professeurs des Universités

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
M.	ALIOUAT	EI Moukhtar	Parasitologie
Mme	AZAROUAL	Nathalie	Physique
M.	BERTHELOT	Pascal	Onco et Neurochimie
M.	CAZIN	Jean-Louis	Pharmacologie – Pharmacie clinique
M.	CHAVATTE	Philippe	ICPAL
M.	COURTECUISSÉ	Régis	Sciences végétales et fongiques
M.	CUNY	Damien	Sciences végétales et fongiques
Mme	DELBAERE	Stéphanie	Physique
M.	DEPREZ	Benoît	Lab. de Médicaments et Molécules
Mme	DEPREZ	Rebecca	Lab. de Médicaments et Molécules
M.	DUPONT	Frédéric	Sciences végétales et fongiques
M.	DURIEZ	Patrick	Physiologie
M.	FOLIGNE	Benoît	Bactériologie
M.	GARÇON	Guillaume	Toxicologie
Mme	GAYOT	Anne	Pharmacotechnie Industrielle
M.	GOOSSENS	Jean François	Chimie Analytique
M.	HENNEBELLE	Thierry	Pharmacognosie
M.	LEMDANI	Mohamed	Biomathématiques
Mme	LESTAVEL	Sophie	Biologie Cellulaire
M.	LUC	Gerald	Physiologie
Mme	MELNYK	Patricia	Onco et Neurochimie
M.	MILLET	Régis	ICPAL
Mme	MUHR – TAILLEUX	Anne	Biochimie
Mme	PAUMELLE-LESTRELIN	Réjane	Biologie Cellulaire
Mme	PERROY	Anne Catherine	Législation
Mme	ROMOND	Marie Bénédicte	Bactériologie
Mme	SAHPAZ	Sevser	Pharmacognosie
M.	SERGHÉRAERT	Eric	Législation
Mme	SIEPMANN	Florence	Pharmacotechnie Industrielle
M.	SIEPMANN	Juergen	Pharmacotechnie Industrielle
M.	WILLAND	Nicolas	Lab. de Médicaments et Molécules

Liste des Maîtres de Conférences - Praticiens Hospitaliers

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
Mme	BALDUYCK	Malika	Biochimie
Mme	GARAT	Anne	Toxicologie
Mme	GOFFARD	Anne	Bactériologie
M.	LANNOY	Damien	Pharmacie Galénique
Mme	ODOU	Marie Françoise	Bactériologie
M.	SIMON	Nicolas	Pharmacie Galénique

Liste des Maîtres de Conférences

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
Mme	ALIOUAT	Cécile Marie	Parasitologie
M.	ANTHERIEU	Sébastien	Toxicologie
Mme	AUMERCIER	Pierrette	Biochimie
Mme	BANTUBUNGI	Kadiombo	Biologie cellulaire

Mme	BARTHELEMY	Christine	Pharmacie Galénique
Mme	BEHRA	Josette	Bactériologie
M	BELARBI	Karim	Pharmacologie
M.	BERTHET	Jérôme	Physique
M.	BERTIN	Benjamin	Immunologie
M.	BLANCHEMAIN	Nicolas	Pharmacotechnie industrielle
M.	BOCHU	Christophe	Physique
M.	BORDAGE	Simon	Pharmacognosie
M.	BOSC	Damien	Lab. de Médicaments et Molécules
M.	BRIAND	Olivier	Biochimie
M.	CARNOY	Christophe	Immunologie
Mme	CARON	Sandrine	Biologie cellulaire
Mme	CHABÉ	Magali	Parasitologie
Mme	CHARTON	Julie	Lab. de Médicaments et Molécules
M	CHEVALIER	Dany	Toxicologie
M.	COCHELARD	Dominique	Biomathématiques
Mme	DANEL	Cécile	Chimie Analytique
Mme	DEMANCHE	Christine	Parasitologie
Mme	DEMARQUILLY	Catherine	Biomathématiques
M.	DHIFLI	Wajdi	Biomathématiques
Mme	DUMONT	Julie	Biologie cellulaire
Mme	DUTOUT-AGOURIDAS	Laurence	Onco et Neurochimie
M.	EL BAKALI	Jamal	Onco et Neurochimie
M.	FARCE	Amaury	ICPAL
Mme	FLIPO	Marion	Lab. de Médicaments et Molécules
Mme	FOULON	Catherine	Chimie Analytique
M.	FURMAN	Christophe	ICPAL
Mme	GENAY	Stéphanie	Pharmacie Galénique
M.	GERVOIS	Philippe	Biochimie
Mme	GOOSSENS	Laurence	ICPAL
Mme	GRAVE	Béatrice	Toxicologie
Mme	GROSS	Barbara	Biochimie
M.	HAMONIER	Julien	Biomathématiques
Mme	HAMOUDI	Chérifa Mounira	Pharmacotechnie industrielle
Mme	HANNOTHIAUX	Marie-Hélène	Toxicologie
Mme	HELLEBOID	Audrey	Physiologie
M.	HERMANN	Emmanuel	Immunologie
M.	KAMBIA	Kpakpaga Nicolas	Pharmacologie
M.	KARROUT	Youness	Pharmacotechnie Industrielle
Mme	LALLOYER	Fanny	Biochimie
M.	LEBEGUE	Nicolas	Onco et Neurochimie
Mme	LECOEUR	Marie	Chimie Analytique
Mme	LEHMANN	Hélène	Législation
Mme	LELEU-CHAVAIN	Natascha	ICPAL
Mme	LIPKA	Emmanuelle	Chimie Analytique
Mme	MARTIN	Françoise	Physiologie
M.	MOREAU	Pierre Arthur	Sciences végétales et fongiques
M.	MORGENROTH	Thomas	Législation
Mme	MUSCHERT	Susanne	Pharmacotechnie industrielle
Mme	NIKASINOVIC	Lydia	Toxicologie
Mme	PINÇON	Claire	Biomathématiques
M.	PIVA	Frank	Biochimie
Mme	PLATEL	Anne	Toxicologie
M.	POURCET	Benoît	Biochimie

M.	RAVAUX	Pierre	Biomathématiques
Mme	RAVEZ	Séverine	Onco et Neurochimie
Mme	RIVIERE	Céline	Pharmacognosie
Mme	ROGER	Nadine	Immunologie
M.	ROUMY	Vincent	Pharmacognosie
Mme	SEBTI	Yasmine	Biochimie
Mme	SINGER	Elisabeth	Bactériologie
Mme	STANDAERT	Annie	Parasitologie
M.	TAGZIRT	Madjid	Hématologie
M.	VILLEMAGNE	Baptiste	Lab. de Médicaments et Molécules
M.	WELTI	Stéphane	Sciences végétales et fongiques
M.	YOUS	Saïd	Onco et Neurochimie
M.	ZITOUNI	Djamel	Biomathématiques

Professeurs Certifiés

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
M.	HUGES	Dominique	Anglais
Mlle	FAUQUANT	Soline	Anglais
M.	OSTYN	Gaël	Anglais

Professeur Associé - mi-temps

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
M.	DAO PHAN	Hai Pascal	Lab. Médicaments et Molécules
M.	DHANANI	Alban	Droit et Economie Pharmaceutique

Maîtres de Conférences ASSOCIES - mi-temps

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
M.	BRICOTEAU	Didier	Biomathématiques
Mme	CUCCHI	Malgorzata	Biomathématiques
M.	FRIMAT	Bruno	Pharmacie Clinique
M.	GILLOT	François	Droit et Economie pharmaceutique
M.	MASCAUT	Daniel	Pharmacie Clinique
M.	ZANETTI	Sébastien	Biomathématiques
M.	BRICOTEAU	Didier	Biomathématiques

1.

AHU

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
Mme	DEMARET	Julie	Immunologie
Mme	HENRY	Héloïse	Biopharmacie
Mme	MASSE	Morgane	Biopharmacie

Année 2017-2018 (mise à jour 4 décembre 2019)

Faculté de Pharmacie de Lille

3, rue du Professeur Laguesse - B.P. 83 - 59006 LILLE CEDEX
Tel. : 03.20.96.40.40 - Télécopie : 03.20.96.43.64
<http://pharmacie.univ-lille2.fr>

L'Université n'entend donner aucune approbation aux opinions émises dans les thèses ; celles-ci sont propres à leurs auteurs.

Remerciements :

À M. Chevalier Dany, pour m'avoir fait l'honneur de présider ce jury. Merci pour l'intérêt que vous avez porté à mon travail et pour votre confiance.

À Mme Grave Béatrice, pour m'avoir suivi tout au long de la rédaction de cette thèse. Merci d'avoir pris du temps pour me conseiller et m'aider, notamment à organiser mes nombreuses idées, bien souvent dans le désordre. Un grand merci pour votre disponibilité et vos enseignements.

À Céline, ainsi qu'à toute l'équipe de la pharmacie du centre, Sarah, Hélène, Florence. Merci pour tout ce que vous m'avez appris pendant mon stage, et d'avoir formé avec patience un jeune padawan, que la force soit avec vous.

À Mathilde et Ludovic, pour avoir accepté de faire partie de mon jury. Merci pour votre amitié qui m'est chère, je vous souhaite beaucoup de bonheur avec l'arrivée du futur petit plongeur.

À ma mère, merci pour m'avoir soutenu tout au long de ces années, et ce lien infailible peu importe la distance qui nous sépare.

À mon père et Sabine, merci pour votre soutien, les conseils apportés depuis mes premières années dans le cursus de santé, et surtout les nombreuses coupes de champagne, passées et à venir, qui m'ont beaucoup aidées à rédiger de cette thèse.

À mes frères, merci pour tout ce que vous avez fait pour moi depuis le début, pour m'avoir ouvert la voie dans cette jungle qu'est la vie, et pour votre soutien maintenant que je trace la mienne.

À Capucine et Augustin, pour la joie que j'ai de vous connaître, profitez et vivez votre vie comme vous l'entendez, ne laissez personne vous limiter ou vous empêcher de vivre vos rêves.

À ma famille, mes amis, merci d'avoir cru en moi et pour tous ces moments partagés.

À Charlotte, merci pour ton amour et ton soutien infailible. Merci de constamment me pousser à aller au bout des choses, de mes rêves et pour tous ses projets. La vie serait bien plus banale sans ta lumière.

Table des matières

Introduction :.....	1
Abréviations :.....	3

Première partie : Généralités sur les ions perchlorate

1. Présentation de l'ion perchlorate.....	5
1.1. Structure.....	5
1.2. Classification et étiquetage.....	5
1.3. Principales utilisations des ions perchlorate.....	6
1.4. Méthodes de détection et de mesure des ions perchlorate.....	6
2. Impact sanitaire des ions perchlorate.....	8
2.1. Données toxicologiques.....	8
2.1.1. Toxicocinétique.....	8
2.1.2. Toxicodynamique.....	8
2.2. Données épidémiologiques.....	15
2.2.1. Exposition directe via la consommation de l'eau de boisson.....	15
2.2.2. Exposition indirecte via la consommation d'aliments contaminés.....	16
2.2.3. Études épidémiologiques.....	22
3. Conclusion de la première partie.....	35

Seconde partie : Les ions perchlorate et l'environnement

1. Les rejets.....	37
1.1. Sources de contamination.....	37
1.1.1. Contaminations d'origine naturelle.....	38
1.1.2. Sources de contamination d'origine anthropique.....	40
1.2. Comportement des ions perchlorate dans l'environnement.....	43
1.2.1. Généralités.....	43
1.2.2. Le grand cycle de l'eau.....	43
1.2.3. Persistance dans l'environnement.....	44
2. Les ions perchlorate et les milieux aquatiques.....	45
2.1. Eaux de surface.....	45
2.2. Eaux souterraines.....	48
2.3. EDCH/Eau brute.....	49
3. Conclusion de la deuxième partie.....	51

Troisième partie : Les ions perchlorate dans les eaux destinées à la consommation humaine et leur mise en évidence

1. La persistance des ions perchlorate : de l'eau brute à l'eau destinée à la consommation humaine.....	53
1.1. Le cycle de l'eau urbain ou petit cycle de l'eau.....	53
1.2. L'efficacité des traitements de potabilisation et des traitements d'épuration pour éliminer les ions perchlorate.....	54
1.2.1. Le captage de l'eau et les traitements de potabilisation.....	54
1.2.2. Les traitements des eaux usées en station d'épuration.....	56
2. La gestion et les normes de qualité des EDCH en vigueur en France.....	57
2.1. Les différents types d'eau.....	57
2.2. Les exigences de qualité.....	58
2.3. Le suivi sanitaire.....	62

2.4. Les modalités de contrôles et les différentes analyses.....	63
2.5. Paramètres microbiologiques et chimiques.....	66
2.5.1. La qualité microbiologique de l'eau.....	66
2.5.2. La qualité chimique de l'eau.....	67
2.6. La protection des captages.....	70
2.7. La gestion des dépassements des exigences de qualité :.....	71
2.8. La délivrance des dérogations.....	72
2.9. Information du public.....	74
3. Historique des ions perchlorate en France.....	76
3.1. La mise en évidence des ions perchlorate en France.....	76
3.2. État des lieux de la présence des ions perchlorate en France et plus particulièrement dans la région des Hauts-de-France :.....	76
3.3. Origines probables de la contamination par les ions perchlorate.....	79
3.3.1. Origine historique.....	79
3.3.2. Origine mixte.....	83
4. Conclusion de la troisième partie.....	86

Quatrième partie : Les actions mises en place et les procédés techniques étudiés

1. Les actions mises en place sur le territoire français.....	87
1.1. Historique des recommandations de l'Anses.....	87
1.2. Actualisation des connaissances et des recommandations effectives de l'Anses.....	87
1.3. Les plans nationaux.....	90
2. Les arrêtés préfectoraux en France : vers une uniformisation de la réglementation ?.....	93
2.1. Une exception régionale.....	93
2.2. Une problématique régulièrement ré-évaluée.....	94
2.3. L'impact climatique : un nouveau paramètre à prendre en compte dans la problématique des ions perchlorate.....	95
3. Les moyens d'élimination des ions perchlorate dans les EDCH.....	97
3.1. Les freins à la mise en place des procédés d'élimination des ions perchlorate de l'EDCH.....	97
3.2. Les méthodes d'élimination reposant sur des principes physiques.....	98
3.2.1. Les résines échangeuses d'ions.....	98
3.2.2. Les procédés de filtration sur membranes.....	100
3.2.3. L'adsorption sur des filtres à charbon.....	101
3.3. Les méthodes d'élimination reposant sur des principes chimiques et biologiques.....	102
3.3.1. La réduction chimique et électro-chimique.....	102
3.3.2. La biodégradation.....	103
3.4. Une méthode prometteuse : l'utilisation des nanoparticules de fer zéro-valent ou « nanoscale zero-valent iron » (nZVI).....	103
3.5. Synthèse sur les méthodes d'élimination des ions perchlorate de l'EDCH et la notion d'hybridation des méthodes.....	104
4. Conclusion de la quatrième partie.....	105

Cinquième partie : Le rôle du pharmacien d'officine dans la problématique des ions perchlorate

1. Résultats du questionnaire.....	107
1.1. Profil des répondants.....	107

1.2. La perception de la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine.....	112
1.3. Connaissances des contaminants de l'eau en général.....	115
1.4. Connaissances sur les ions perchlorate.....	121
1.5. Voies d'information des patients.....	124
1.6. Constats.....	126
2. Le rôle du pharmacien d'officine concernant les ions perchlorate.....	126
2.1. L'analyse du lieu d'exercice.....	127
2.2. Repérer les personnes à risque.....	127
2.3. La prévention en elle-même.....	127
2.4. Les ions perchlorate uniquement ?.....	129
Conclusion :.....	131
Annexes :.....	133
Bibliographie :.....	149

Introduction :

De nos jours, la société doit faire face à la mise en évidence régulière de nombreux polluants, perturbateurs endocriniens ou substances cancérigènes. Elles sont retrouvées dans l'air, dans l'alimentation, mais également dans l'eau, dont la qualité interpelle de plus en plus chaque jour. En effet, l'eau du robinet est régulièrement décriée pour son goût, ou la peur de ses nombreux contaminants. Or, si cela permet de vendre toujours plus d'accessoires pour la « purifier », comme les carafes filtrantes ou les bâtons de charbons actifs, l'inquiétude quant à la qualité de l'eau se focalise essentiellement sur des contaminants régulièrement cités par les médias : les nitrates, les pesticides ou encore les résidus de médicaments.

D'autres contaminants, moins connus sont en revanche ignorés, tant par les consommateurs que par les professionnels de santé, tels les ions perchlorate, dont la présence a été mise en évidence en France en 2011, dans de nombreuses régions. Dès lors, les habitants de plus de 500 communes du Nord et du Pas-de-Calais ont vu fleurir des restrictions de consommation de l'eau distribuée à leur robinet. La raison : la présence de ces ions, ayant potentiellement des effets sur la santé des nourrissons et des femmes enceintes, dans l'eau de certaines villes à des concentrations bien supérieures aux recommandations établies par les autorités sanitaires. Le plus surprenant, pour la population, fut que la principale cause mise en avant pour expliquer cette pollution était la première guerre mondiale.

Ainsi, plus d'un siècle après la guerre 14-18, et moins d'une dizaine d'années après leur mise en évidence en France, les ions perchlorate sont toujours d'actualité et font l'objet de nombreuses études, comme l'attestent les saisines régulières de l'Anses, ainsi que les études réalisées à l'étranger. Cependant, la problématique des ions perchlorate reste peu connue de la grande majorité de la population française et les concentrations mesurées dans l'eau du robinet des consommateurs n'ont pas, ou très peu évolué depuis 2011. En cette fin d'été 2019, les conditions climatiques des dernières années ont remis les ions perchlorate sur le devant de la scène médiatique dans le Nord de la France, avec non pas la diminution, mais l'augmentation du nombre de restrictions de consommation liées aux ions perchlorate.

Au cours de cette thèse, l'objectif est de faire le point sur l'état des connaissances actuelles relatives aux ions perchlorate et de présenter l'ampleur de la problématique qu'ils engendrent tant d'un point de vue sanitaire et environnemental que technique.

La première partie de ce travail présente les ions perchlorate et leur impact sanitaire. Dans la seconde partie sont décrits le comportement des ions perchlorate dans l'environnement, ainsi que les sources de rejet potentiellement responsables de leur présence. La troisième partie permet d'établir un bilan quant à la présence de ces ions en France compte tenu de l'organisation de la gestion de l'eau sur notre territoire. La quatrième partie présente les actions mises en place en France au niveau réglementaire, et les moyens techniques en cours d'étude pour tenter de gérer les risques liés à la contamination de l'eau par ces ions perchlorate. La dernière partie aborde la prévention et le rôle du pharmacien d'officine dans cette problématique de santé publique en s'appuyant notamment sur les résultats d'un questionnaire soumis aux pharmaciens d'officine sur la qualité de l'eau en général et les ions perchlorate.

Abréviations :

- ANSES : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
- AFSSA : Agence française de sécurité sanitaire des aliments
- ARS : Agence Régionale de Santé
- ATU : Autorisation temporaire d'utilisation
- ATS : Anti-thyroïdien de synthèse
- BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières
- CAG : Charbon actif en grain
- CAP : Eaux brutes / de captage
- CAS : Chemical abstract service
- CES : Comités d'experts spécialisés
- CIRC : Centre international de recherches sur le cancer
- Cire : Cellule d'intervention en région
- CMC : Carboxy-méthyl-cellulose
- CMV : Chlorure de vinyle monomère
- CSP : Code de la santé publique
- DGS : Direction générale de la santé
- DGCCRF : Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes
- DREAL : Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement
- EDCH : Eau destinée à la consommation humaine
- EMI : Eau de provenance mixte
- EMN : Eau minérale naturelle
- ENNS : Étude nationale nutrition santé
- EFSA : Autorité Européenne de Sécurité des Aliments
- ERPT : Eau rendue potable par traitement
- ESO : Eau souterraine
- ES : Eau de source
- ESU : Eau de surface
- FDA : Food and drug administration
- FP2E : Fédération Professionnelle des Entreprises de l'Eau
- HB : Hypothèse basse
- HH : Hypothèse haute
- IFOP : Institut français d'opinion publique
- IMC : Indice de masse corporelle
- INCA2 : Étude individuelle et Nationale en population générale sur les Consommations Alimentaires numéro 2
- LHN : Laboratoire d'Hydrologie de Nancy
- LoD : Limite de détection
- LQ : Limite de quantification
- MEL : Métropole Européenne de Lille
- MER : Eau provenant de la mer
- NAS : Académie des Sciences Américaines
- nZVI : Nanoscale zero-valent iron
- NIS : symporteur Iode-sodium
- OEHA : Office of environmental health hazard assessment
- OMS : Organisation mondiale de la santé

- Pka : Constante de dissociation
- PNSE 3 : Plan National Santé Environnement n°3
- PPE : Périmètre de protection éloignée
- PPI : Périmètre de protection immédiate
- PPR : Périmètre de protection rapprochée
- PPRDE : Personne publique ou privée responsable de la distribution d'eau
- RP : Ressource profonde
- RS : Ressource superficielle
- SDN : Société des eaux du Nord
- SERDP : Strategic Environmental Research and Development Program
- SVHC : Substance of very high concern
- T3 : Tri-iodothyronine
- T4 : Tétrai-iodothyronine
- TDS : Total diet study (étude)
- TGF : Facteur de croissance tumorale (tumoral growth factor)
- TNF : Facteur de nécrose tumorale (tumoral necrosis factor)
- TTP : Eaux traitées / en sortie d'installation de traitement
- TRH : Hormone thyroïdienne
- TSH : Thyroïdostimuline ou thyroïd stimulating hormone
- UDI : Unité de distribution d'eau potable
- UE : Union Européenne
- US EPA : United States Environmental Protection Agency
- VTR : Valeur toxicologique de référence

Première partie : Généralités sur les ions perchlorate

1. Présentation de l'ion perchlorate

1.1. Structure

L'ion perchlorate est un oxyanion de masse molaire 99,451 g/mol. Il est référencé sous un numéro d'enregistrement unique auprès de la banque de données de « Chemical Abstracts Service » (CAS) 7790-98-9.

La formule de l'anion perchlorate est ClO_4^- (figure 1). Il est principalement présent sous forme de sels. Des ions lui sont associés, ce sont majoritairement les ions ammonium (NH_4^+), potassium (K^+), magnésium (Mg^{2+}) et sodium (Na^+), pour former respectivement les sels de perchlorate d'ammonium, de potassium, de magnésium et de sodium. Néanmoins, il faut retenir que tous les sels de perchlorate sont extrêmement solubles dans l'eau et sont donc totalement dissociés. L'ion perchlorate se présente sous forme de cristaux incolores et inodores à l'état solide (1). C'est un ion relativement stable dans les conditions ambiantes, de par sa disposition tétraédrique (2). En conséquence, les ions perchlorate peuvent persister pendant de nombreuses années, voire des décennies, dans des conditions typiques d'eau de surface et d'eau souterraine (3).

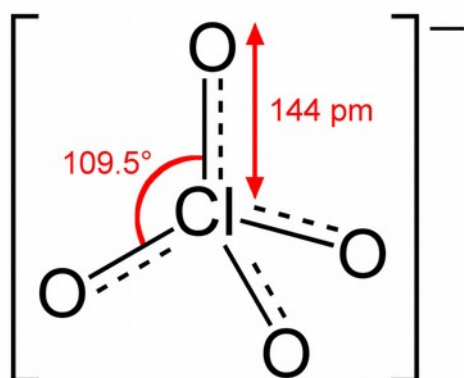


Figure 1 : Représentation de l'ion perchlorate (4)

1.2. Classification et étiquetage

Les ions perchlorate d'ammonium sont concernés par la directive européenne SEVESO II (directive 96/82/CE concernant la maîtrise des dangers liés aux accidents majeurs impliquant des substances dangereuses) et ils sont classés 3 : comburants et explosifs (tableau 1).

Tableau 4. Signification des codes de danger et des Informations additionnelles attachées au perchlorate d'ammonium, d'après la Commission Européenne (2011) ainsi que des pictogrammes.


Code de danger et information additionnelle	
H201	Explosif ; danger d'explosion en masse.
H271	Peut provoquer un incendie ou une explosion; comburant puissant.
Pictogrammes	
	SGH01 : Explosif

Tableau 1 : Codes de dangers des ions perchlorate d'ammonium (1)

1.3. Principales utilisations des ions perchlorate

Les ions perchlorate peuvent être synthétisés par l'homme, mais ils ont également une voie de synthèse naturelle.

De nos jours, les principales utilisations de ces ions s'observent en industrie et dans le domaine militaire, notamment pour leur pouvoir oxydant. Ils sont par exemple utilisés dans le carburant des fusées, missiles et dans tous les dispositifs à base de poudre (munition, explosifs, dispositifs pyrotechniques). Des utilisations plus anciennes ont été observées en agriculture dans les années 1940, via la découverte de gisements naturels d'ions perchlorate au Mexique. Les ions perchlorate servaient alors d'engrais.

1.4. Méthodes de détection et de mesure des ions perchlorate

Le développement de méthodes de mesure et d'analyse des ions perchlorate est difficile, du fait des faibles concentrations généralement observées dans l'eau, de l'ordre du µg/L.

Il n'y a pas, en France, de laboratoire agréé ou accrédité pour l'analyse des ions perchlorate. De plus, il n'existe pas de méthodes de référence pour doser les ions perchlorate, excepté celles publiées par l'United States Environmental Protection Agency (US EPA), qui font appel à des méthodes de chromatographie ionique variant selon les pré-traitements appliqués ou par les principes de détection (tableau 2).

Les méthodes développées après l'EPA 314.0 permettent de détecter des concentrations d'ions perchlorate de l'ordre du nano-gramme par litre.

Méthode EPA n°	Méthode	Limite de détection minimale (µg/L)
314.0	Chromatographie ionique avec détection de conductivité	0,53
314.1	Chromatographie ionique sur colonne avec détection de conductivité avec supprimeur	Environ 0,03
314.2	Chromatographie ionique bidimensionnelle avec détection de conductivité avec supprimeur	0,012–0,018
331.0	Chromatographie en phase liquide avec spectrométrie de masse à ionisation par électro-spray	0.008 (spectrométrie de masse à une étape) 0.005 (spectrométrie de masse Tandem)
332.0	Chromatographie ionique avec conductivité avec supprimeur et spectrométrie de masse à ionisation par électro-spray	0,02

Tableau 2 : Méthodes de détection des ions perchlorate dans l'eau (5).

La méthode EPA 314.0 est la méthode principalement retrouvée dans les laboratoires de contrôle des eaux. Elle repose sur une chromatographie ionique avec détection de conductivité sans pré-traitement. Cependant, la détection de conductivité a une spécificité faible et détecte d'autres composés non recherchés (6).

Pour augmenter la spécificité de la méthode, EPA 314.1 a recours au préalable à l'analyse, à des méthodes dites de pré-concentration afin d'obtenir des solutions concentrées en ions perchlorate via l'utilisation de colonnes échangeuses d'ions. Le but de ce traitement préalable est de réduire les interférences causées par d'autres ions potentiellement présents dans la solution analysée (7) (8).

La méthode EPA 314.2 est une méthode de chromatographie ionique bi-dimensionnelle. Elle repose sur une première séparation sur colonne, afin d'éliminer les ions interférents, puis l'éluant correspondant au temps de rétention de l'ion perchlorate est collecté et injecté sur une colonne de pré-concentration et envoyé vers une colonne de chromatographie, de sélectivité différente de la première (9).

À noter que la chromatographie ionique utilise des éluants fortement ioniques (présentant donc une forte conductivité) qui peuvent perturber le signal lors de l'analyse de faibles concentrations d'ions perchlorate. Aussi, pour pallier à cet inconvénient et améliorer la sensibilité de cette technique, le détecteur peut être couplé à un dispositif (réacteur post-colonne) appelé supprimeur d'ions qui remplace les ions initiaux de la phase mobile par des ions possédant une plus faible conductivité, diminuant ainsi les interférences.

Les méthodes EPA 331.0 et 332.0 associent la chromatographie ionique ou la chromatographie liquide haute performance à la spectrométrie de masse (simple ou en tandem) afin d'améliorer la détection de l'ion perchlorate et d'éviter les interférences liées à d'autres ions présents (5).

Chaque méthode possède ses propres inconvénients et avantages. Il est à noter que les méthodes utilisant un principe de chromatographie ionique (314.0,

314.1, 314.2, 332.0) ont pour principale limite un temps de préparation important des échantillons et il faut veiller à leur non dispersion sur le terrain (10).

2. Impact sanitaire des ions perchlorate

2.1. Données toxicologiques

Les études toxicologiques ont été pour la plupart réalisées avec les ions perchlorate de sodium, pour leur solubilité plus élevée que les autres sels de perchlorate (tableau 3). Les données concernant le métabolisme et l'aspect cinétique peuvent donc être amenées à varier et doivent être interprétées avec prudence.

Formule	Masse molaire (g/mol)	Solubilité à 20°C (10 ³ mg/L)	Source
NH ₄ ClO ₄	117.49	200	HSDB, 2011
NaClO ₄	122.44	2096	HSDB, 2011
KClO ₄	138.55	15	HSDB, 2011

Tableau 3. Solubilité des différents sels de perchlorate (4) (11) (12) (13) (14) (15) (16) (17) (18) (19) (20) (21) (22) (23) (24) (25) (26) (27) (28) (29) (30) (31) (32) (33) (34) (35) (36) (37) (38) (39) (40) (41) (42) (43) (44) (45) (46) (47) (48) (49) (50) (51) (52) (53) (54) (55) (56) (57) (58) (59) (60) (61) (62) (63) (64) (65) (66) (67) (68) (69) (70) (71) (72) (73) (74) (75) (76) (77) (78) (79) (80) (81) (82) (83) (84) (85) (86) (87) (88) (89) (90) (91) (92) (93) (94) (95) (96) (97) (98) (99) (100) (101) (102) (103) (104) (105) (106) (107) (108) (109) (110) (111) (112) (113) (114) (115) (116) (117) (118) (119) (120) (121) (122) (123) (124) (125) (126) (127) (128) (129) (130) (131) (132) (133) (134) (135) (136) (137) (138) (139) (140) (141) (142) (143) (144) (145) (146) (147) (148) (149) (150) (151) (152) (153) (154) (155) (156) (157) (158) (159) (160) (161) (162) (163) (164) (165) (166) (167) (168) (169) (170) (171) (172) (173) (174) (175) (176) (177) (178) (179) (180) (181) (182) (183) (184) (185) (186) (187) (188) (189) (190) (191) (192) (193) (194) (195) (196) (197) (198) (199) (200) (201) (202) (203) (204) (205) (206) (207) (208) (209) (210) (211) (212) (213) (214) (215) (216) (217) (218) (219) (220) (221) (222) (223) (224) (225) (226) (227) (228) (229) (230) (231) (232) (233) (234) (235) (236) (237) (238) (239) (240) (241) (242) (243) (244) (245) (246) (247) (248) (249) (250) (251) (252) (253) (254) (255) (256) (257) (258) (259) (260) (261) (262) (263) (264) (265) (266) (267) (268) (269) (270) (271) (272) (273) (274) (275) (276) (277) (278) (279) (280) (281) (282) (283) (284) (285) (286) (287) (288) (289) (290) (291) (292) (293) (294) (295) (296) (297) (298) (299) (300) (301) (302) (303) (304) (305) (306) (307) (308) (309) (310) (311) (312) (313) (314) (315) (316) (317) (318) (319) (320) (321) (322) (323) (324) (325) (326) (327) (328) (329) (330) (331) (332) (333) (334) (335) (336) (337) (338) (339) (340) (341) (342) (343) (344) (345) (346) (347) (348) (349) (350) (351) (352) (353) (354) (355) (356) (357) (358) (359) (360) (361) (362) (363) (364) (365) (366) (367) (368) (369) (370) (371) (372) (373) (374) (375) (376) (377) (378) (379) (380) (381) (382) (383) (384) (385) (386) (387) (388) (389) (390) (391) (392) (393) (394) (395) (396) (397) (398) (399) (400) (401) (402) (403) (404) (405) (406) (407) (408) (409) (410) (411) (412) (413) (414) (415) (416) (417) (418) (419) (420) (421) (422) (423) (424) (425) (426) (427) (428) (429) (430) (431) (432) (433) (434) (435) (436) (437) (438) (439) (440) (441) (442) (443) (444) (445) (446) (447) (448) (449) (450) (451) (452) (453) (454) (455) (456) (457) (458) (459) (460) (461) (462) (463) (464) (465) (466) (467) (468) (469) (470) (471) (472) (473) (474) (475) (476) (477) (478) (479) (480) (481) (482) (483) (484) (485) (486) (487) (488) (489) (490) (491) (492) (493) (494) (495) (496) (497) (498) (499) (500) (501) (502) (503) (504) (505) (506) (507) (508) (509) (510) (511) (512) (513) (514) (515) (516) (517) (518) (519) (520) (521) (522) (523) (524) (525) (526) (527) (528) (529) (530) (531) (532) (533) (534) (535) (536) (537) (538) (539) (540) (541) (542) (543) (544) (545) (546) (547) (548) (549) (550) (551) (552) (553) (554) (555) (556) (557) (558) (559) (560) (561) (562) (563) (564) (565) (566) (567) (568) (569) (570) (571) (572) (573) (574) (575) (576) (577) (578) (579) (580) (581) (582) (583) (584) (585) (586) (587) (588) (589) (590) (591) (592) (593) (594) (595) (596) (597) (598) (599) (600) (601) (602) (603) (604) (605) (606) (607) (608) (609) (610) (611) (612) (613) (614) (615) (616) (617) (618) (619) (620) (621) (622) (623) (624) (625) (626) (627) (628) (629) (630) (631) (632) (633) (634) (635) (636) (637) (638) (639) (640) (641) (642) (643) (644) (645) (646) (647) (648) (649) (650) (651) (652) (653) (654) (655) (656) (657) (658) (659) (660) (661) (662) (663) (664) (665) (666) (667) (668) (669) (670) (671) (672) (673) (674) (675) (676) (677) (678) (679) (680) (681) (682) (683) (684) (685) (686) (687) (688) (689) (690) (691) (692) (693) (694) (695) (696) (697) (698) (699) (700) (701) (702) (703) (704) (705) (706) (707) (708) (709) (710) (711) (712) (713) (714) (715) (716) (717) (718) (719) (720) (721) (722) (723) (724) (725) (726) (727) (728) (729) (730) (731) (732) (733) (734) (735) (736) (737) (738) (739) (740) (741) (742) (743) (744) (745) (746) (747) (748) (749) (750) (751) (752) (753) (754) (755) (756) (757) (758) (759) (760) (761) (762) (763) (764) (765) (766) (767) (768) (769) (770) (771) (772) (773) (774) (775) (776) (777) (778) (779) (780) (781) (782) (783) (784) (785) (786) (787) (788) (789) (790) (791) (792) (793) (794) (795) (796) (797) (798) (799) (800) (801) (802) (803) (804) (805) (806) (807) (808) (809) (810) (811) (812) (813) (814) (815) (816) (817) (818) (819) (820) (821) (822) (823) (824) (825) (826) (827) (828) (829) (830) (831) (832) (833) (834) (835) (836) (837) (838) (839) (840) (841) (842) (843) (844) (845) (846) (847) (848) (849) (850) (851) (852) (853) (854) (855) (856) (857) (858) (859) (860) (861) (862) (863) (864) (865) (866) (867) (868) (869) (870) (871) (872) (873) (874) (875) (876) (877) (878) (879) (880) (881) (882) (883) (884) (885) (886) (887) (888) (889) (890) (891) (892) (893) (894) (895) (896) (897) (898) (899) (900) (901) (902) (903) (904) (905) (906) (907) (908) (909) (910) (911) (912) (913) (914) (915) (916) (917) (918) (919) (920) (921) (922) (923) (924) (925) (926) (927) (928) (929) (930) (931) (932) (933) (934) (935) (936) (937) (938) (939) (940) (941) (942) (943) (944) (945) (946) (947) (948) (949) (950) (951) (952) (953) (954) (955) (956) (957) (958) (959) (960) (961) (962) (963) (964) (965) (966) (967) (968) (969) (970) (971) (972) (973) (974) (975) (976) (977) (978) (979) (980) (981) (982) (983) (984) (985) (986) (987) (988) (989) (990) (991) (992) (993) (994) (995) (996) (997) (998) (999) (1000)

2.1.1. Toxicocinétique

La principale voie d'exposition aux ions perchlorate est la voie orale par l'ingestion de nourriture et d'eau. Ces ions ne sont pas métabolisés, ne se comportent pas in-vivo comme un oxydant, ne se bio-accumulent pas dans le corps. L'absorption intestinale des ions perchlorate est rapide, les concentrations maximales sanguines sont alors atteintes en quelques heures après ingestion. Ces ions ont une demi-vie courte (8 heures) et sont éliminés sous forme inchangée par les reins (>90%) (13) (14).

Après administration d'une dose fixe de 0,5mg/Kg p.c/j d'ions perchlorate chez des sujets sains, ils ont été retrouvés au niveau sanguin, dans le sérum et le plasma, mais aussi dans les urines, la salive et le lait maternel. Ils sont captés par la thyroïde de manière sélective mais aussi par les glandes salivaires et mammaires (15).

Les effets des ions perchlorate sont réversibles et brefs en cas de suppression de l'exposition (13) (15)

2.1.2. Toxicodynamique

Le mécanisme principal d'action des ions perchlorate est la perturbation de la fonction thyroïdienne, via l'inhibition réversible de l'incorporation de l'iode au niveau du symporteur iode-sodium (NIS) (figure 2) (16) (17). NIS est une glycoprotéine transmembranaire des cellules épithéliales thyroïdiennes qui permet le passage actif de l'iode sanguin vers la thyroïde via une Na⁺/K⁺-ATPase (deux Na⁺ permettent l'absorption d'un I⁻). NIS n'est pas exclusif de la thyroïde, il est présent au niveau des cellules épithéliales et pariétales du placenta, des testicules, au niveau des tissus mammaires pendant la lactation, au niveau des glandes salivaires et lacrymales, au niveau des cellules épithéliales pulmonaires et au niveau des entérocytes intestinaux (18).

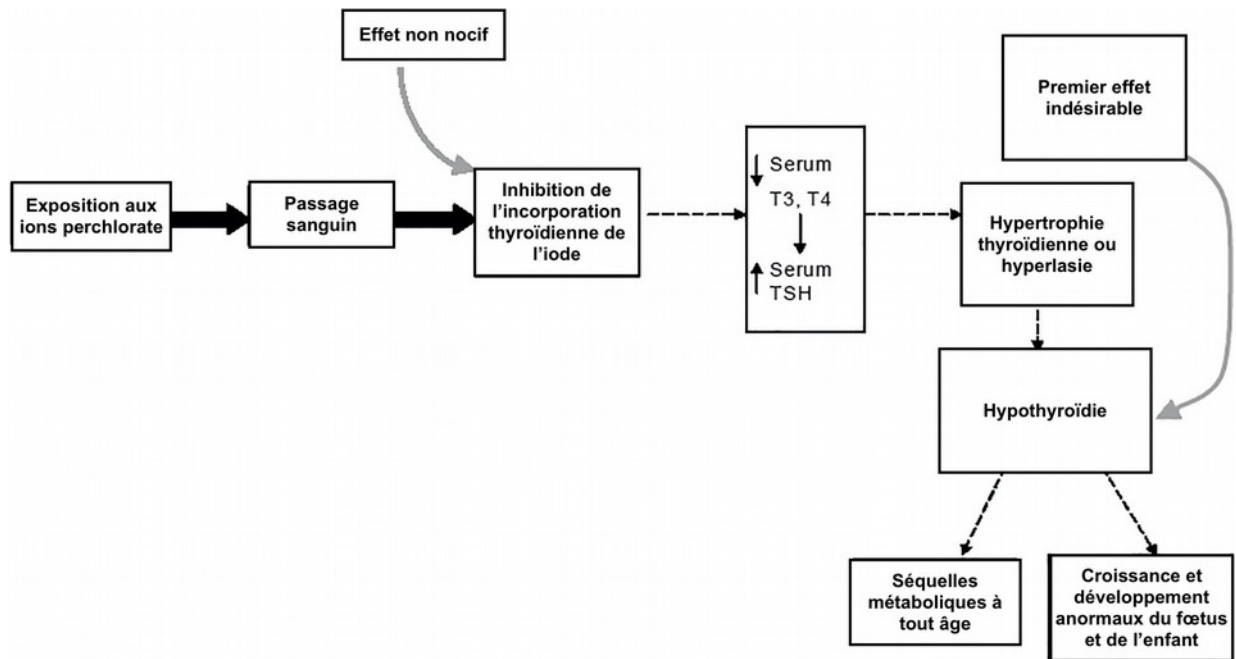


Figure 2 : Mécanisme principal d'action des ions perchlorate (schéma traduit de (16))

2.1.2.1. La thyroïde

La thyroïde est une glande située à la base du cou. Son rôle principal est la production des hormones thyroïdiennes Tri-iodothyronine (T3) et tétra-iodothyronine (T4).

Chez le fœtus, ces hormones permettent le développement et la différenciation des cellules, notamment au niveau du système nerveux central, en facilitant la neurogenèse, la migration neuronale et la régulation des dendrites. Chez l'adulte, T3 et T4 interviennent dans le processus de croissance, de maturation cellulaire, de la synthèse protéique, de thermogenèse, mais aussi dans la régulation du profil glucidique et lipidique.

Physiologiquement, l'hypothalamus sécrète l'hormone thyrotrope (TRH), qui va stimuler l'hypophyse (figure 3). Cette dernière sécrète l'hormone thyrostimuline (TSH), qui va stimuler la thyroïde pour induire la production des hormones T3 et T4. Une fois sécrétées, T3 et T4 vont passer dans la circulation sanguine pour avoir un effet systémique. À une certaine concentration sanguine, T3 et T4 opèrent un rétrocontrôle négatif sur leur propre synthèse en diminuant la synthèse des hormones TRH et TSH.

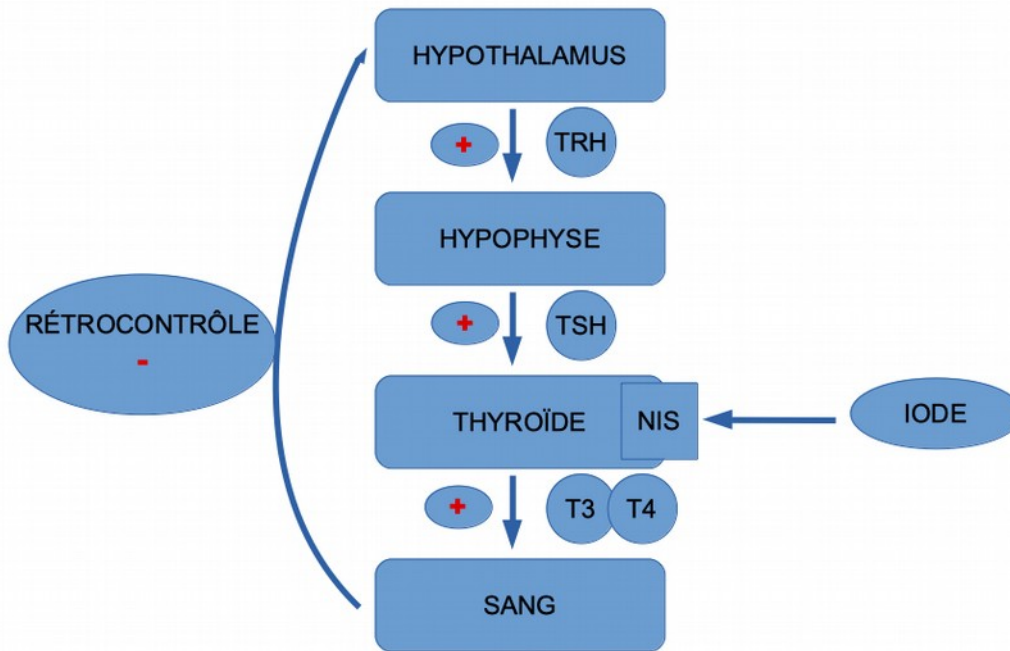


Figure 3 : Schéma de l'axe hypothalamo-thyroïdien (Réalisé par Victor Delmotte)

Pour permettre la synthèse des hormones T3 et T4, il est indispensable d'avoir un apport en iode sous forme d'iodure, notamment grâce au symporteur NIS (17).

L'iode est stocké dans les cellules folliculaires de la thyroïde. C'est un oligo-élément essentiel d'origine alimentaire. L'apport journalier recommandé est de 150 µg/j pour les adultes d'après les Besoins Nutritionnels Moyens (BNM) (tableau 4), ce qui correspond, quelque soit le sexe, à une iodurie d'environ 100 µg/L et à une concentration plasmatique d'environ 1 µg/L. On retrouve l'iode principalement dans les poissons, les crustacés et les fruits de mer. Le lait est également une source d'iode, c'est d'ailleurs en France la source principale d'iode selon l'étude INCA2 (19), qui expose que le lait représente 25,7 % des apports en iode chez les adultes en France, suivi par les poissons à 9,9 % puis le pain 7 %.

Tableau 18. Bilan des références nutritionnelles pour l'iode (µg/j)

	Afssa (2001)	D-A-CH (2015)	Efsa (2014)	IOM (2001)	NHMRC (2006)	NCM (2014)	OMS (2004)
Hommes							
âge	+ de 18	19-50 + de 51	+ de 18	+ de 19	+ de 19	+ de 18	+ de 13
BNM	ND	ND	ND	95	100	100	ND
Référence populationnelle	150*	200* 180*	150*	150	150	150	150*
Femmes							
âge	+ de 18	19-50 + de 51	+ de 18	+ de 19	+ de 19	+ de 18	+ de 13
BNM	ND	ND	ND	95	100	100	ND
Référence populationnelle	150*	200* 180*	150*	150	150	150	150*

*Apport satisfaisant

Tableau 4 : Besoins nutritionnels moyens en iode (20)

2.1.2.2. Les effets d'une carence en iode

L'iode étant un constituant des hormones thyroïdienne, une carence en iode entraîne donc une diminution de la synthèse des hormones T3 et T et par

conséquence une augmentation de la synthèse des hormones TRH et TSH. Cela peut se traduire par une hypothyroïdie, le crétinisme et d'autres troubles liés à la carence iodée. À l'inverse, un apport excessif en iode peut entraîner une hyperthyroïdie.

1. In utero

Le fœtus en développement est le stade de la vie le plus sensible aux agents chimiques qui affectent l'absorption de l'iode au niveau thyroïdien. La thyroïde immature ne peut s'adapter à la diminution de synthèse des hormones thyroïdiennes. Or, elle a un rôle primordial pour le développement intra-utérin. Une perturbation de la fonction thyroïdienne du fœtus ou de celle de la mère pendant la grossesse peut avoir des conséquences sur le développement neurologique du bébé (13).

On voit apparaître chez le fœtus, dès la moitié du 1^{er} trimestre, des récepteurs aux hormones thyroïdiennes, qui permettent ainsi à la T4 maternelle, via le placenta, d'augmenter la synthèse de T3 fœtale. À partir du 2^{ème} trimestre, la thyroïde commence à synthétiser ses propres hormones. Cependant, la glande reste immature et a peu de réserves, il est donc indispensable d'avoir un apport augmenté d'hormones maternelles jusqu'à la naissance d'environ 20-40 % par rapport à la normale (21).

Les troubles engendrés par une diminution de l'activité thyroïdienne du fœtus, notamment suite à une exposition chronique aux ions perchlorate, sont l'apparition d'un goitre (22), ainsi que des troubles mentaux. Il a ainsi été observé des formes d'autisme, des troubles de l'attention, une hyperactivité ou encore une diminution du quotient intellectuel (23) (24) (25) (26) (27).

2. Péri-natal

La thyroïde d'un nouveau-né ne peut également pas s'adapter à la diminution de synthèse de T3 et T4 que cause une carence en iode. En plus des effets cités in utero qui s'exprimeront dès les premières semaines de vie, une carence iodée expose à l'apparition d'un goitre eu-thyroïdien, une hypothyroïdie clinique ou subclinique, une diminution des facultés adaptatives d'attention et de compréhension, un retard staturo-pondéral et un retard pubertaire (28).

3. Chez l'adulte

L'hypothyroïdie chez l'adulte se traduit par des signes cliniques peu spécifiques et s'apparente à un ralentissement du métabolisme de base du corps : une asthénie, une prise de poids modérée, une frilosité, une sécheresse cutanée, une constipation, un syndrome dépressif et un ralentissement psychomoteur. Une hypothyroïdie expose au long terme, si elle n'est pas prise en charge, à l'augmentation du LDL-cholestérol se traduisant par une augmentation du risque cardiovasculaire et à un syndrome occlusif par le ralentissement du transit intestinal.

Le diagnostic de l'hypothyroïdie repose sur le dosage de la TSH, puis hormones thyroïdiennes T3-T4.

2.1.2.3. Mécanisme d'action toxique aigu des ions perchlorate

Les ions perchlorate sont des inhibiteurs compétitifs de l'incorporation de l'iode au niveau thyroïdien : ils entrent en compétition pour se fixer au niveau du même site de liaison, NIS (figure 4). La carence en iode thyroïdien entraîne la diminution de la synthèse des hormones T3-T4. La toxicité des ions perchlorate nécessite une certaine dose, dépendante de l'âge, du sexe, du profil iodé et du poids de la personne.

Elle est néanmoins contrecarrée par la forte capacité d'adaptation de la régulation thyroïdienne, se traduisant premièrement, lors de la baisse de l'iode au niveau des cellules thyroïdiennes, par une augmentation de l'activité et de l'expression du symporteur de l'iode. Secondairement, il se produit une élévation de la TSH au niveau hypothalamo-hypophysaire (figure 5), ce qui permet de maintenir la synthèse hormonale par le maintien de la pénétration thyroïdienne de l'iode. Cependant, on peut observer que, par la compensation de l'effet antithyroïdien, les ions perchlorate peuvent avoir un effet goitrigène.

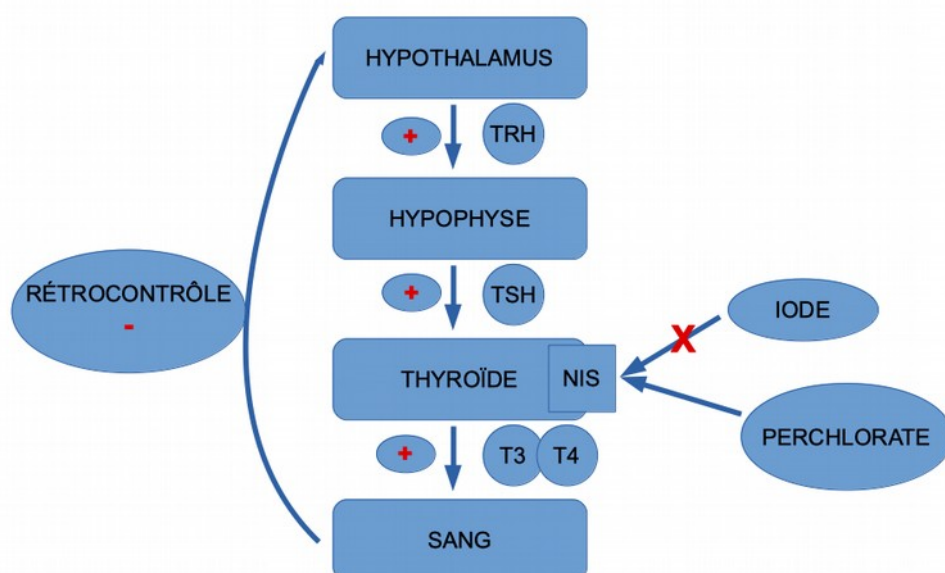


Figure 4 : Schéma de l'axe hypothalamo-thyroïdien perturbé par les ions perchlorate (Réalisé par Victor Delmotte)

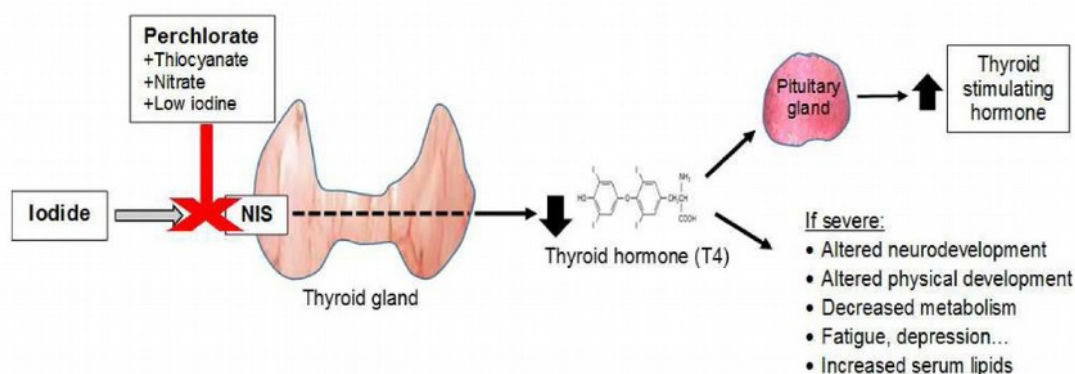


Figure 5 : Mécanisme d'action des ions perchlorate au niveau de la thyroïde (29).

Ce mécanisme d'action toxique aiguë a été utilisé dans les années 1950-1960 pour traiter l'hyperthyroïdie (13). Les dosages allaient de 100 mg à 2000 mg de perchlorate de potassium par jour, pour des durées pouvant varier entre quelques jours et plusieurs mois. Cependant, un effet indésirable grave a été mis en évidence durant ces décennies : l'apparition d'anémies aplasiques, qui ont entraîné l'arrêt de l'utilisation de cette thérapeutique à dosage élevé.

Les ions perchlorate sont utilisés de nos jours à des doses variant entre 600 et 1000 mg sur de courtes périodes, notamment en service de médecine nucléaire pour protéger la glande thyroïde des effets indésirables de l'iode radioactif utilisé dans différents examens médicaux, dans des cas de thyrotoxicose induite par un traitement d'amiodarone (Cordarone®), ainsi que pour des tests de décharge thyroïdienne (30).

2.1.2.4. Mécanismes d'action toxique à long terme

1. Au niveau thyroïdien

Les ions perchlorate ont une action sur la synthèse des hormones thyroïdiennes fœtales via deux processus : direct, sur le fœtus, et indirect, via un effet sur la synthèse thyroïdienne de la mère.

Le processus direct est permis par le passage de la barrière placentaire des ions perchlorate via des récepteurs NIS placentaires, permettant normalement le transport actif de l'iode. Ainsi, il s'effectue une diminution du passage de l'iode au niveau placentaire et une diminution de l'incorporation de l'iode au niveau de la thyroïde fœtale (31) (32) (33). Or la thyroïde fœtale ne peut s'adapter à ces diminutions de l'apport iodé. Néanmoins, les concentrations amniotiques en ions perchlorate sont apparemment bien moins importantes que les concentrations sanguines de la mère (34).

Le processus indirect s'observe au niveau de la thyroïde maternelle. Les femmes enceintes sont plus sensibles à l'action des ions perchlorate que la population globale par l'augmentation de leur clairance iodée. Normalement, cette augmentation est compensée par une augmentation de la synthèse thyroïdienne associée à un apport en iode suffisant. En conséquence, une diminution de la captation en iode engendrée par les ions perchlorate empêche l'adaptation de la thyroïde maternelle (35) (36).

De nouveau, ce mécanisme ne serait pas réellement effectif. Pearce et al. (2010) (37) l'ont démontré en incluant dans une étude des femmes enceintes venant de différents pays, avec des apports en iode différents. En effet, bien qu'il ait été retrouvé des traces d'ions perchlorate au niveau urinaire chez toutes les femmes incluses, il n'a été retrouvé aucun lien significatif entre les sels de perchlorate et une perturbation des marqueurs de la synthèse thyroïdienne. Les ions perchlorate ne pourraient donc pas induire de diminution de la synthèse thyroïdienne chez les femmes enceintes, qu'elles soient carencées ou non en iode, ou souffrant déjà d'une hypothyroïdie (37) (38) (39). Néanmoins ce constat est celui d'une seule étude et ne peut donc pas permettre de conclure négativement sur l'efficacité du second processus d'action.

2. Effets sur le métabolisme du fer

Schreinemachers et al. (2015) (40) ont mis en évidence les effets des ions perchlorate sur le métabolisme du fer, ainsi que leur interaction avec des marqueurs de stress oxydatifs. Cette étude reprend les résultats d'enquêtes nationales sur des examens de santé et de nutrition « National Health and Nutrition Examination Surveys », réalisées entre 2005 et 2008, portant sur des hommes en bonne santé, des femmes enceintes et non enceintes. Le degré d'exposition aux ions perchlorate a été mesuré dans la matrice urinaire.

Les résultats ont permis d'établir un lien entre les ions perchlorate et plusieurs biomarqueurs :

- Les biomarqueurs de l'homéostasie du fer (azote uréique et fer sérique),
- Les biomarqueurs des lipides,
- Le nombre de cellules sanguines,
- Les biomarqueurs du métabolisme du glucose.

Le mécanisme potentiel des ions perchlorate sur le fer se situerait au niveau de l'absorption du fer d'origine alimentaire. Le passage du fer s'effectue normalement sous forme ferreux (Fe^{2+}), via la transferrine, au niveau des membranes apicales et basolatérales des cellules épithéliales intestinales, afin de rejoindre la circulation sanguine (41). Le fer alimentaire étant sous forme ferrique (Fe^{3+}), il doit être réduit, notamment grâce à l'action du cytochrome B duodénal, également localisé sur les membranes apicales des entérocytes intestinaux. Les ions perchlorate vont diminuer l'absorption du fer dans l'intestin humain via une interaction directe avec le fer, soit en se complexant avec, soit en oxydant le Fe^{2+} en Fe^{3+} . Ils vont aussi agir indirectement, en diminuant les facteurs de réduction du fer (42).

Le fer sérique étant un marqueur important de santé, en ayant un lien direct avec le nombre de globules rouges (43), il serait intéressant d'approfondir les études de l'impact des ions perchlorate sur ce dernier. En effet, les ions perchlorate pourraient induire la diminution du taux et de la disponibilité du fer, ce qui aura ensuite des répercussions sur d'autres marqueurs en lien avec le fer comme l'urée, l'hémoglobine et le cholestérol. Ces résultats sont néanmoins discutables compte tenu de la demi-vie courte des ions perchlorate et de leur faible réactivité.

3. Autres effets

L'administration quotidienne durant 24 mois de doses d'ions perchlorate de sodium et de potassium à des doses variant entre 928 et 2573 mg/Kg p.c/j chez le rat et la souris a conduit à la formation de tumeurs thyroïdiennes sous formes d'adénomes ou de carcinomes folliculaires (44). Cependant, l'Académie des Sciences Américaines (NAS) estime, que sur la base des connaissances de la biologie des tumeurs thyroïdiennes chez les rongeurs et chez l'homme, il n'est que peu probable que les ions perchlorate présentent un risque cancérigène chez l'homme. De plus, les ions perchlorate ne sont classés cancérigènes par aucun organisme international (13) (45).

Aucune étude de génotoxicité des ions perchlorate via une exposition par voie respiratoire, orale ou cutanée chez l'homme n'a été réalisée à ce jour. Les études

réalisées chez les animaux ne mettent pas en évidence un effet mutagène ou clastogène (rupture dans la molécule d'ADN/aberration chromosomique) (44).

Les données toxicologiques des ions perchlorate sont néanmoins susceptibles d'évoluer.

2.2. Données épidémiologiques

Il a été mis en évidence que la voie principale d'exposition en France aux ions perchlorate est l'ingestion. Celle-ci peut être directe via la consommation d'eau destinée à la consommation humaine (EDCH) contaminée par les ions perchlorate ou indirecte, via l'ingestion d'aliments contaminés par des eaux elles-mêmes contaminées par les ions perchlorate lors du développement, de la culture ou de la fabrication de ces aliments (46). Les autres voies d'exposition comme les voies respiratoire ou cutanée sont négligeables du fait de la faible présence des ions perchlorate dans l'air, hors rares cas d'exposition professionnelle (47) (48) (49).

2.2.1. Exposition directe via la consommation de l'eau de boisson

L'Anses a été saisie par la direction générale de la santé (DGS) le 27 avril 2012 afin d'évaluer l'exposition aux ions perchlorate et ses effets potentiels sur la santé lors du dépassement des limites de qualité établies. L'Anses a donc mis en place des groupes d'expertises collectives, qui analysent les données scientifiques existantes afin de réaliser leurs études pour proposer une valeur toxicologique de référence (VTR). Cette VTR correspond à une dose d'ions perchlorate sans effets observables, via l'ingestion hydrique de 0,7 µg/Kg p.c/j, correspondant à 15 µg/L pour un adulte pesant 70 Kg et consommant 2 litres d'eau par jour. La dose de 4 µg/L a été établie pour les enfants de moins de 6 mois ce qui correspond à 0,75 L d'eau de boisson par jour pour un poids de 5 Kg selon l'organisation mondiale de la santé (OMS). L'ANSES précise : « L'adoption de la VTR de 0,7 µg/Kg p.c/j constitue un choix conservateur, dans le sens où l'effet retenu ne s'appuie pas sur une observation clinique (hypothyroïdie) ou sur une altération biologique (diminution des taux des hormones thyroïdiennes) mais sur un indicateur précoce d'une modification de la fonction thyroïdienne (l'inhibition significative du captage de l'iode radioactif). Comme pour d'autres VTR calculées selon le même type d'approche, il est donc difficile d'estimer le risque sanitaire lié à un dépassement de cette VTR en termes d'effets cliniquement observables ». Le dépassement des limites fixées via l'application de la VTR établie ne signifie donc pas que l'on observera des effets cliniques chez les populations exposées mais permettra de mettre en place des restrictions de consommation avant leur apparition, d'où l'utilisation du sens « conservateur » (50).

Les sels de perchlorate ne sont pas recherchés lors des contrôles de qualité des eaux des réseaux de distribution français. Cependant leur présence a été mise en évidence dans des eaux brutes de plusieurs stations de pompage de la région Haut-De-France et avec des taux dépassant les valeurs de gestion dans les eaux de brutes et distribuées dans de nombreuses villes de cette région.

L'exposition de la population en France provient ainsi majoritairement de la consommation de l'eau dite du robinet, administrée par le réseau de distribution régional/local pour la consommation directe, la préparation des aliments ou encore la préparation des biberons. Il a été établi par l'Anses que l'exposition est la même que

l'eau soit filtrée ou non par une carafe dite filtrante (exemple Brita®), laissée reposée plusieurs heures après prélèvement ou qu'elle soit passée par un adoucisseur d'eau.

Suite à cette prise de conscience, les ions perchlorate ont été également dosés dans des eaux embouteillées retrouvées dans les commerces français. Sur 70 marques d'eaux minérales et 8 marques d'eaux de source testées, aucune eau ne présentait de teneur supérieure en ions perchlorate à 4 µg/L (51). Le même constat a été fait pour des eaux embouteillées en Angleterre, avec la détection d'ions perchlorate, mais à des taux non significatifs (52).

2.2.2. Exposition indirecte via la consommation d'aliments contaminés

Les aliments peuvent être contaminés par les ions perchlorate via l'eau utilisée pendant leur croissance (arrosage, eau de pluie, etc), leur nettoyage (eau du robinet, eau de rivière) ou leur préparation, mais aussi via le sol de leur lieu de croissance, le sol où ils sont entreposés ou conservés, et via les fertilisants utilisés tout au long du cycle de leur développement (46). L'Autorité Européenne de Sécurité des Aliments (EFSA) juge que l'exposition alimentaire aux ions perchlorate est potentiellement nocive lors d'une exposition chronique et notamment chez les populations sensibles comme les nourrissons (53). Néanmoins, compte tenu du nombre limité de données de contaminations, aucune teneur maximale réglementaire d'ions perchlorate dans les denrées alimentaires n'a été établie en France à ce jour. Les principales données proviennent de publications en rapport avec des études américaines. Cependant des valeurs de références ont été mises en place par la Commission Européenne pour le commerce intra-européen (tableau 5). Elles ont été établies sous forme de concentrations et concernent les denrées alimentaires non transformées, qu'elles soient séchées, diluées, transformées et/ou composées. Les concentrations utilisées comme valeurs de référence concernent la partie comestible de la denrée.

<u>Aliments</u>	<u>Concentration (Mg/Kg)</u>
Fruits et légumes	0,1
À l'exception des	
→ Cucurbitacées et des légumes à feuilles à l'exception des	0,2
→ Epinards, céleris ayant poussé sous serre	0,5
→ Herbes, laitue et autres salades, incluant la roquette, ayant poussé sous serre	1,0
Epices sèches (à l'exception des herbes sèches et du paprika), houblon sec	0,5
Thé séché (<i>Camellia sinensis</i>)	0,75
Herbes et fruits séchés pour infusion	0,75
Aliments destinés aux enfants et nourrissons préparés « ready-to-eat »	0,02
Autres aliments	0,05

Tableau 5: Valeurs de références pour les ions perchlorate éditées par la Commission Européenne pour le commerce intra-européen (54)

Des études ont analysé de nombreux échantillons de fruits, de légumes, de produits laitiers, de boissons et d'aliments en général, comme les œufs, les huiles ou encore la viande. Elles ont mis en évidence que près de la moitié des échantillons alimentaires analysés contenaient des sels de perchlorate (par exemple : 625 aliments contaminés sur 1065 lors de l'étude de la FDA (2004-2005) (55)). Il faut néanmoins noter que certains aliments étaient certes contaminés mais ne contenaient que des traces d'ions perchlorate alors que dans d'autres la concentration approchait 400 µg/Kg (56) (57).

Les ions perchlorate ont été principalement retrouvés dans les aliments à forte teneur en eau comme le lait ou les légumes par exemple, en fonction de leur affinité pour l'eau. Cependant, des études plus récentes indiquent que les ions perchlorate sont bien plus largement distribués dans l'alimentation. En effet, des taux détectables d'ions perchlorate (tableau 6) ont été trouvés dans 74% des 285 aliments testés lors d'une étude réalisée par la « Total Diet Study » (TDS) (58) (59). Néanmoins, cette étude est basée sur un petit nombre d'échantillons composites (deux ou quatre) par aliment. La FDA prévoit donc d'analyser la gamme complète d'aliments afin de disposer à l'avenir d'un ensemble de données plus robustes sur les niveaux d'ions perchlorate dans les aliments.

Tableau II : Concentration en ion perchlorate dans divers aliments, d'après Murray et al. (2008)

Aliments	n	Moyenne (µg/kg)*	Source
Lait	125	5,8	Étude exploratoire FDA
	8	7	FDA TDS
Salade iceberg	43	8,1	Étude exploratoire FDA
	4	2,1	FDA TDS
Salade verte	26	10,6	Étude exploratoire FDA
	2	4,4	FDA TDS
Epinards	36	115	Étude exploratoire FDA
	4	40	FDA TDS
Chou	13	95,1	Étude exploratoire FDA
	4	17,7	FDA TDS
Concombre	20	6,6	Étude exploratoire FDA
	4	19,1	FDA TDS
Tomate	73	13,6	Étude exploratoire FDA
	4	78	FDA TDS
Melon	48	28,6	Étude exploratoire FDA
	4	24,4	FDA TDS
Orange	10	3,4	Étude exploratoire FDA
	4	2,7	FDA TDS
Raisin	4	0,5	FDA TDS

* moyennes des concentrations avec estimation des données non détectées à la moitié de la valeur de la limite de détection.

Tableau 6 : Concentrations en ions perchlorate de différents aliments mesurées lors de l'étude TDS (58)

En France, la direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes (DGCCRF) a effectué une enquête (60) afin d'obtenir des données supplémentaires de contamination des aliments par les ions perchlorate (recommandation UE 2015/682), dans le but de contribuer à l'établissement ou à la révision de mesures de gestion des risques. Parmi 177 échantillons analysés de légumes (laitue, épinard, roquette et d'autres légumes) de boissons, d'aliments destinés à des enfants/nourrissons, d'herbes aromatiques, de thés et d'épices, 3 échantillons ont été déclarés « à surveiller ». Ce sont les épinards frais, les épinards lavés prêts à l'emploi et la coriandre avec une concentration en ions perchlorate supérieure à la valeur de référence européenne (tableau 5) de 0,5 mg/Kg pour les épinards et de à 1mg/Kg pour la coriandre.

Les ions perchlorate sont donc majoritairement présents dans notre alimentation. Cependant, une des problématiques majeures est leur présence dans les laits destinés à la préparation des biberons pour les nourrissons et les jeunes enfants. Cette population s'avérant la plus vulnérable aux conséquences cliniques d'une exposition aux ions perchlorate, des études se sont donc focalisées sur les taux d'ions perchlorate dans les aliments destinés aux nouveau-nés et aux laits destinés à être reconstitués dans des biberons.

Il a été mis en évidence que l'exposition majoritaire des enfants de 0 à 6 mois résultait de l'alimentation (61) : 81 % des sources d'ions perchlorate alimentaires auxquels les enfants de 6 à 11 mois étaient exposés provenaient des aliments pour bébés, c'est-à-dire les laits pour bébés et les produits laitiers en général (tableau 7).

Table 4. Contribution (%) by food groups to total estimated daily intake of perchlorate for 2005–2006.

Food group	Intake (% of total)						
	Infants 6–11 months	Children 2 years	Children 6 years	Children 10 years	Teenage girls 14–16 years	Teenage boys 14–16 years	Women 25–30 years
Baby food	49	0	0	0	0	0	0
Beverage	1	3	3	4	7	7	12
Dairy	32	51	50	47	29	37	20
Egg	0	0	0	0	0	0	0
Fat/oil	0	0	0	0	0	0	0
Fruit	4	15	11	9	11	7	8
Grain	2	6	8	8	8	9	8
Legume	0	0	0	0	0	0	0
Mixture	6	8	9	10	14	12	14
MPF	1	4	6	5	7	7	11
Sweets	0	1	1	1	1	1	1
Vegetable	5	12	12	16	23	20	26
	Men 25–30 years	Women 40–45 years	Men 40–45 years	Women 60–65 years	Men 60–65 years	Women 70+ years	Men 70+ years
Baby food	0	0	0	0	0	0	0
Beverage	12	12	11	9	9	6	7
Dairy	20	17	21	17	19	23	22
Egg	0	0	0	0	0	0	0
Fat/oil	0	0	0	0	0	0	0
Fruit	5	11	8	12	9	12	12
Grain	8	8	9	8	8	8	9
Legume	0	0	0	0	0	0	0
Mixture	16	13	13	9	10	10	10
MPF	9	7	8	7	8	5	7
Sweets	0	1	1	0	0	0	0
Vegetable	30	31	29	38	37	36	33

MPF, meat, poultry, fish.

Tableau 7 : Sources d'expositions aux ions perchlorate des enfants de 6 à 11 mois (59)

Il a plus largement été établi que les produits laitiers contribuaient à la moitié de l'exposition totale alimentaire aux ions perchlorate des enfants de 2, 6 et 10 ans et que, les légumes et produits laitiers représentaient 46 à 59 % de l'exposition alimentaire des adolescents et des adultes (59).

Cependant, l'exposition alimentaire aux sels de perchlorate de toutes les catégories de population (âge, sexe...) est en dessous de la VTR (tableau 8). Parmi toutes les classes d'âge (de la naissance aux âges adultes), ce sont les enfants entre 2 et 10 ans qui sont le plus exposés aux ions perchlorate par l'alimentation. En effet, ils consomment généralement plus de nourriture par kilos de poids et ont des habitudes de consommation différentes : essentiellement composée de produits laitiers. Par exemple, l'alimentation des enfants de 2 ans est composée en général à 51 % de produits laitiers.

Parmi les enfants entre 2 et 10 ans, ce sont les enfants de 2 ans les plus exposés : ils subissent en général une exposition de 0,35 à 0,39 µg/Kg p.c/j, ce qui représente 50 à 56 % de la valeur de gestion proposée par l'ANSES. Les enfants de 6 mois à 10ans sont généralement exposés entre 37 et 41 % de la valeur de gestion (59) :

- Les enfants de 6-11 mois sont exposés à une dose de 0,26 à 0,29 µg/Kg p.c/j,
- Les enfants de 6 ans sont exposés à une dose de 0,25 à 0,28 µg/Kg p.c/j,
- Les enfants de 10 ans sont exposés à une dose de 0,17 à 0,20 µg/Kg p.c/j.

Table 5. Range of estimated lower and upper bound average perchlorate intakes for 2005–2006.

Food group	Intake ($\mu\text{g}/\text{person}/\text{day}$)						
	Infants 6–11 month	Children 2 years	Children 6 years	Children 10 years	Teenage girls 14–16 years	Teenage boys 14–16 years	Women 25–30 years
Baby food	1.1–1.3	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0
Beverage	0.00–0.1	0.0–0.3	0.0–0.4	0.0–0.5	0.02–0.8	0.0–1.1	0.2–1.2
Dairy	0.8–0.8	2.6–2.6	2.9–2.9	3.1–3.1	1.6–1.6	3.1–3.1	1.2–1.2
Egg	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0
Fat/oil	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0
Fruit	0.1–0.1	0.7–0.9	0.6–0.7	0.5–0.6	0.6–0.7	0.5–0.6	0.5–0.6
Grain	0.0–0.1	0.3–0.3	0.4–0.5	0.5–0.5	0.4–0.5	0.7–0.8	0.4–0.5
Legume	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0
Mixture	0.1–0.1	0.4–0.5	0.5–0.6	0.6–0.7	0.8–0.8	1.0–1.1	0.9–0.9
MPP	0.0–0.0	0.2–0.2	0.3–0.3	0.3–0.4	0.3–0.4	0.5–0.6	0.7–0.7
Sweets	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.1	0.0–0.1	0.0–0.1	0.0–0.1	0.0–0.1
Vegetable	0.1–0.1	0.6–0.6	0.7–0.7	1.0–1.0	1.2–1.3	1.7–1.7	1.5–1.5
Total intake	2.4–2.7	4.9–5.5	5.4–6.1	6.1–6.9	5.1–6.1	7.7–9.1	5.4–6.8
Total intake ($\mu\text{g}/\text{kg bw}/\text{day}$)	0.26–0.29	0.35–0.39	0.25–0.28	0.17–0.20	0.09–0.11	0.12–0.14	0.09–0.11
	Men 25–30 years	Women 40–45 years	Men 40–45 years	Women 60–65 years	Men 60–65 years	Women 70+ years	Men 70+ years
Baby food	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0
Beverage	0.2–1.6	0.3–1.3	0.2–1.7	0.2–1.0	0.2–1.3	0.1–0.7	0.1–0.9
Dairy	1.5–1.5	1.1–1.1	1.8–1.8	1.1–1.1	1.5–1.5	1.4–1.4	1.7–1.7
Egg	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0
Fat/oil	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0
Fruit	0.3–0.4	0.7–0.8	0.6–0.7	0.7–0.8	0.6–0.8	0.7–0.8	0.8–1.0
Grain	0.6–0.7	0.5–0.6	0.7–0.8	0.5–0.5	0.6–0.7	0.5–0.6	0.6–0.7
Legume	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0
Mixture	1.2–1.3	0.8–0.9	1.1–1.1	0.6–0.6	0.8–0.9	0.6–0.6	0.7–0.8
MPP	0.7–0.7	0.5–0.5	0.6–0.7	0.4–0.5	0.6–0.7	0.3–0.4	0.5–0.6
Sweets	0.0–0.0	0.0–0.0	0.1–0.1	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0	0.0–0.0
Vegetable	2.2–2.2	1.9–2.0	2.4–2.4	2.4–2.4	2.8–2.9	2.2–2.2	2.5–2.5
Total intake	6.7–8.6	5.9–7.3	7.4–9.4	5.9–7.1	7.2–8.8	5.8–6.9	7.1–8.3
Total intake ($\mu\text{g}/\text{kg bw}/\text{day}$)	0.08–0.11	0.09–0.11	0.09–0.11	0.09–0.10	0.09–0.11	0.09–0.11	0.11–0.12

MPP, meat, poultry, fish.

The total intake for a specific age/sex group are provided in bold.

Tableau 8 : Doses journalières maximales et minimales d'ions perchlorate auxquels les différents groupes d'aliments peuvent exposer. (59)

Pour se focaliser sur l'exposition que peuvent apporter les laits infantiles, la DGCCRF a analysé, en 2012, un ensemble de 67 laits infantiles du marché français. Les dosages ont été réalisés sur des échantillons de laits prêts à être consommés après reconstitution avec une eau certifiée sans ions perchlorate. Sur ces 67 échantillons, 32 comportaient des concentrations supérieures ou égales à 2 $\mu\text{g}/\text{L}$ (tableaux 9 et 10) (62).

Tableau 9 : Teneurs moyennes en ions perchlorate dans les laits infantiles reconstitués commercialisés en France (DGCCRF)

	Nombre d'échantillons analysés (N)	N < LQ*	N > LQ*	Teneur moyenne en ions perchlorate ($\mu\text{g}/\text{L}$) estimée selon l'hypothèse « Middle bound » (MB**)	Teneurs minimales et maximales en ions perchlorate ($\mu\text{g}/\text{L}$) si N > LQ
Lait 1 ^{er} âge (0–6 mois)	24	19	5	1,8	2,0 – 8,7
Lait 2 ^e âge (6 mois - 1 an)	29	15	14	2,8	2,0 – 10,2
Lait de croissance (> 1 an)	14	1	13	7,0	3,0 – 12,8

* LQ = 2 $\mu\text{g}/\text{L}$ (Limite de quantification analytique)

** MB : les valeurs non quantifiées sont estimées à la moitié de la valeur de la LQ

Tableau 9 : Teneurs moyennes en ions perchlorate d'échantillons de laits infantiles (62)

Tableau XVI : Exposition des enfants âgés de 0 à 6 mois aux ions perchlorate au travers de la seule consommation de laits infantiles commercialisées en France.

Aliment	Population générale des enfants âgés de 0 à 6 mois				
	Nb d'individus	Consommation moyenne de lait en g.jour ⁻¹	Exposition aux ions perchlorate en µg/kg/jour		Taux de consommateurs (%)
			moy	P95	
lait 1 ^{er} âge	251	415	0,15	0,36	51
lait 2 ^e âge	251	289	0,10	0,42	47

Le 95^e percentile représente les 5 % de nourrissons les plus exposés aux ions perchlorate.

Le taux de consommateur est le % d'individu consommateur de lait 1^{er} ou 2^{ème} au sein de la population générale (cf. N=251)

Ces estimations ne prennent pas en compte l'apport éventuel d'ions perchlorate par l'eau de distribution.

Tableau 10 : Teneurs moyennes en ions perchlorate d'échantillons de laits 1^{er} et 2^{ème} âge (62)

Cette dernière étude, combinée à une enquête réalisée en 2005 par la société TNS-SOFRES portant sur les habitudes de consommation pour le Syndicat Français des Aliments de l'Enfance a permis de quantifier l'exposition aux ions perchlorate des enfants de 0 à 6 mois en France à une dose de 0,15 µg/Kg p.c/j en moyenne estimée d'après une consommation journalière de 415 grammes de lait 1er âge (reconstitué avec une eau sans sel de perchlorate). Cependant, il a été estimé que des enfants de 0 à 6 mois consommant uniquement des laits infantiles ne sont pas exposés à une dose d'ions perchlorate supérieure à la VTR de 0,7 µg/Kg p.c/j, et cela même avec des biberons reconstitués avec une eau pouvant contenir jusqu'à 1 µg/L d'ions perchlorate. Un dépassement est possible uniquement lorsqu'une eau contenant des concentrations supérieures ou égales à 4 µg/L en sels de perchlorate est utilisée via l'effet appelé « addition eau-aliment ».

Ces estimations sont rassurantes quant à l'exposition des nourrissons en France via l'alimentation et confirment la nécessité de la réglementation des ions perchlorate dans l'EDCH.

De plus, une étude portée sur la consommation de l'eau en France, montre la baisse du pourcentage de parents utilisant l'eau du robinet pour la reconstitution des biberons. Il s'élève seulement à 10 %. Cette baisse de consommation s'explique par les recommandations sanitaires qui préconisent la reconstitution des biberons de lait infantiles avec des eaux embouteillées, de qualité surveillée et stable dans le temps.

Tableau XVII : Consommation d'eau du robinet (hors eau de reconstitution des biberons) chez les enfants âgés de 0 à 3 ans en France (TNS-SOFRES, SFAE 2005 ; Fantino et Gourmèl, 2008)

Classes d'âge	Nombre d'enfants étudiés	Nombre d'enfants consommateurs d'eau du robinet	% d'enfants consommateurs	Consommation d'eau du robinet en mL/jour chez les enfants consommateurs	
				moyenne	maximum
0-6 mois	251	2	0,8	148	260
7-12 mois	195	14	7	73	237
13-36 mois	259	112	43	244	1650

Tableau 11 : Habitudes de consommation de l'eau du robinet chez les enfants (62)

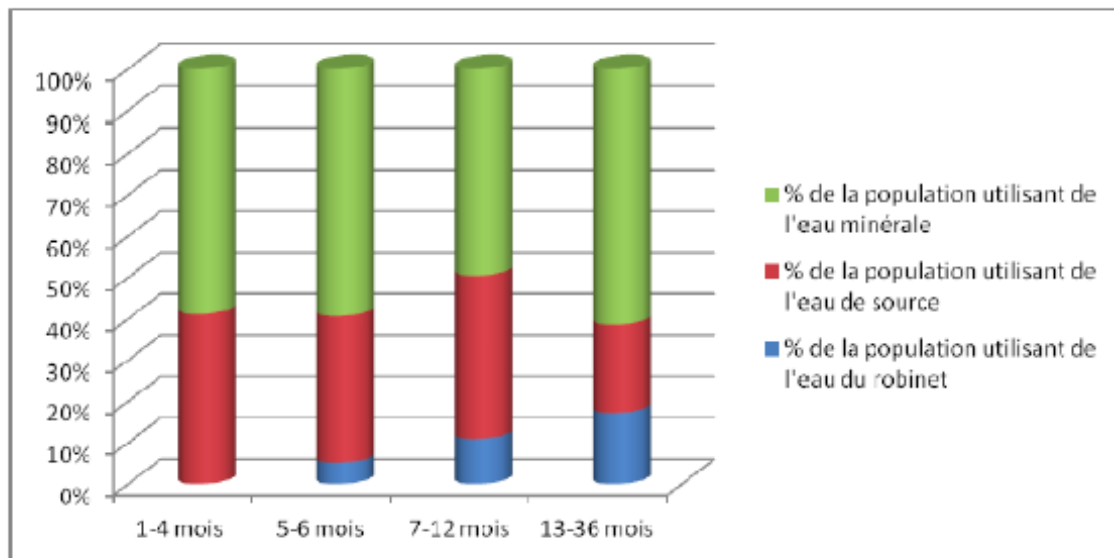


Figure 12 Figure 6. Consommation d'eau selon l'âge des nourissons (62) sée en février 2011 auprès de 429 foyers répartis sur l'ensemble du territoire français et concernant les pratiques de préparation des aliments destinés aux enfants âgés de moins de 3 ans - données en cours de publication)

De nombreuses études épidémiologiques ont été réalisées chez l'homme afin de déterminer si l'exposition aux ions perchlorate peut être responsable de perturbations thyroïdiennes. Celles présentées ici ont été réalisées sur différents sujets : adultes sans particularités de santé, femmes enceintes et nouveau-nés.

2.2.3.1. Études épidémiologiques relatives à l'association entre exposition aux ions perchlorate via l'eau de boisson et des perturbations des paramètres thyroïdiens chez l'adulte

Les sujets étant des adultes en bonne santé, leur statut iodé, quand il a été dosé au préalable, est en général normal. L'Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments (AFSSA) a d'ailleurs démontré que le risque de carence iodée était très faible en France, dans la population générale (63). Cela ne permet donc pas d'estimer les réels effets sur les populations sensibles comme les nouveau-nés, les femmes enceintes ou les personnes déficientes en iode.

Greer et al. (2002) (15) ont réalisé une étude sur 37 adultes en bonne santé, afin d'une part d'établir un profil dose-réponse de l'inhibition par les ions perchlorate de l'absorption de l'iode au niveau thyroïdien et d'autre part déterminer les effets à court terme sur les hormones thyroïdiennes. L'étude consistait en l'administration quotidienne de 0,007 ; 0,02 ; 0,1 ou 0,5 mg de perchlorate de potassium par kilo de poids corporel par jour pendant 14 jours, soit environ 35 mg par jour pour un adulte de 70 Kg (lors de l'administration de 0,5 mg/Kg). Cette étude a permis d'estimer une dose sans effet entre 5,2 et 6,4 $\mu\text{g}/\text{Kg}/\text{jour}$. La VTR actuelle de 0,7 $\mu\text{g}/\text{Kg p.c}/\text{j}$, repose sur cette unique étude expérimentale menée sur un faible nombre de volontaires en bonne santé et exposés aux ions perchlorate par voie hydrique, pendant une durée relativement courte. L'inhibition du passage de l'iode vers la thyroïde était croissante avec la dose de perchlorate ingérée. Une dose sans effet observable de 7 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{j}$ a été déterminée. Cette dose a ensuite été revue pour tenir compte des populations les plus fragiles (enfants notamment). Un facteur 10 a dès lors été appliqué ce qui a conduit à une VTR de 0,7 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{j}$.

Une autre étude sur des volontaires sains a été réalisée par la suite par Braverman et al. (2006) (64). Elle a consisté en l'administration d'une dose d'ions perchlorate allant entre 0,5 à 3mg/Kg sur une durée de 6 mois chez 13 volontaires sains. Les auteurs de l'étude n'ont pas mis en évidence de modification du statut hormonal thyroïdien des sujets, alors que la dose reçue pouvait pour une personne de 70 Kg être de 210 mg. Il aurait alors été intéressant de connaître le statut iodé des sujets de l'étude et d'augmenter leur nombre afin d'avoir des données réellement exploitables (64).

2.2.3.2. Études épidémiologiques relatives à l'association entre exposition aux ions perchlorate via l'eau de boisson et des perturbations des paramètres thyroïdiens chez les nouveau-nés et les femmes enceintes

De nombreuses études réalisées chez la femme enceinte (tableaux 13- A, B, C, D) et le nouveau-né (tableaux 12- A, B, C, D, E) cherchent à montrer l'implication des ions perchlorate dans la perturbation du bilan thyroïdien et donc en conséquence celle de la fonction thyroïdienne.

1. Aspect méthodologique :

Cette partie consiste à extraire les données de publications scientifiques, afin de les analyser, puis de faire une synthèse des différents résultats obtenus, quant à l'association entre les ions perchlorate et la perturbation de la fonction thyroïdienne chez les femmes enceintes et les nouveau-nés.

1.1. Types d'études :

Les études présentées ont été extraites de la littérature scientifique relatives aux ions perchlorate. Elles incluent celles sur lesquelles l'Anses s'appuie dans ses saisines (62) (65), et des études plus récentes comme celle de Pleus et Corey (2018) (13).

Au sein de ces études, nous allons retrouver :

- 7 études transversales : (29), (39), (66), (67), (68), (69), (70). Une étude transversale est une étude descriptive qui étudie simultanément l'exposition et l'apparition ou non d'un événement de santé à un instant donné. Cette étude se fait sur un échantillon de population dit représentatif d'une population cible à laquelle on souhaite extrapoler les résultats, ici un ensemble de nouveau-nés ou de femmes enceintes pour extrapoler à toute la population de nouveau-nés/femmes enceintes. On mesure donc ici le taux d'exposition, via par exemple le taux urinaire d'ions perchlorate et un état de santé, en analysant les hormones thyroïdiennes T3, T4 ou la TSH.

- 14 études de cohortes : (37), (38), (71), (72), (73), (74), (75), (76), (77), (78), (79), (80), (81), (82). Une étude de cohorte est une étude épidémiologique qui analyse un ensemble de sujets répartis en groupes ou sous cohortes en fonction de leur exposition, aux ions perchlorate dans ces études, selon différents degrés ; non exposés (ou à des valeurs non détectables), exposés à des taux modérés ou exposés à des taux jugés importants selon les normes établies. C'est la comparaison du taux de survenue de l'événement attendu, ici la perturbation du bilan thyroïdien, avec les différents degrés d'exposition qui va permettre de mesurer s'il y a une association entre l'exposition et l'événement. On compare ainsi la proportion de

nouveau-nés ou femmes enceintes atteintes par une perturbation du bilan thyroïdien avec leurs taux d'exposition aux ions perchlorate via l'eau de boisson afin d'établir ou non un lien exposition-effets sur la santé.

1.2. Populations étudiées

Les populations étudiées dans les études présentées dans les tableaux ci-dessous sont des femmes enceintes à différents stades de grossesse, des fœtus, des nouveau-nés et des enfants de 0 à 1 an. Les populations étudiées proviennent de :

- la même localité, et leur degré d'exposition aux ions perchlorate sera analysé,
- ou soit de localités différentes avec des taux d'ions perchlorate identifiés afin de séparer les populations en différentes sous cohortes.

Les effectifs varient entre 64 et 700 000 sujets.

1.3. Exposition

Les données concernant la présence ou non d'un lien entre la perturbation de la fonction thyroïdienne et les ions perchlorate peuvent être divisées en deux catégories d'exposition différentes :

- Exposition périnatale : (66), (67), (68) (71), (72), (73), (74), (75), (76), (77), (78),
- Exposition maternelle : (29), (37), (38), (39), (68), (69), (70), (79), (80), (81), (82).

Les études portant sur une exposition périnatale appréhendent les effets des ions perchlorate via une exposition prénatale/in utero, à la naissance, ainsi que dans les premières années de vie. Elles permettent de mettre en évidence ou non l'impact d'une exposition aux ions perchlorate via la mère in utero, via la mère par le lait maternel, puis via l'eau de boisson et/ou l'alimentation.

Les études portant sur une exposition maternelle intéressent aux effets des ions perchlorate sur les femmes enceintes durant leur grossesse. Elles permettent de mettre en évidence ou non l'impact d'une exposition aux ions perchlorate via l'eau de boisson ou via une exposition qualifiée d'environnementale (exposition environnementale/générale : eau de boisson, alimentation et toutes les voies possibles d'exposition aux ions perchlorate).

1.4. Variables sanitaires étudiées

L'analyse de l'impact des ions perchlorate sur le bilan thyroïdien a été réalisée via un examen clinique. C'est majoritairement l'analyse des taux d'hormones thyroïdiennes T3, T4 et TSH, ensemble ou séparément (29), (37), (38), (39), (66), (67), (68), (69), (70), (71), (72), (73), (74), (75), (76), (77), (78), (79), (80), (81), (82). Ces données ont été recueillies grâce à un prélèvement sanguin.

La seconde variable étudiée est l'analyse de l'apparition d'hypothyroïdie congénitale (66), (75), (76), (77).

L'iodurie a également été analysée afin de mettre en évidence une sensibilité à l'action des ions perchlorate (29), (37), (38), (39), (67), (68), (80), (81).

Dans une étude la variation du poids, la circonférence crânienne et la taille des nouveau-nés ont été mesurées (79).

Finalement l'analyse de l'apparition d'un goitre pouvant être un signe clinique d'une hypothyroïdie a été mis en évidence dans une étude (72).

1.5. Évaluation de l'exposition

La mesure de l'exposition se fait de deux manières :

- Via la mesure du taux d'ions perchlorate dans l'eau du réseau de distribution de la ou des villes de provenance des populations étudiées (29), (37), (38), (39), (66), (67), (68), (71), (72), (73), (74), (75), (76), (77), (78), (79), (80),

- Directement via la mesure du taux urinaire d'ions perchlorate des sujets pour confirmer ou pour évaluer leur exposition aux ions perchlorate (29), (37), (38), (39), (67), (68), (69), (70), (80), (81), (82).

2. Études épidémiologiques réalisées chez des nouveau-nés

Population étudiée	Méthode	Principaux résultats
<p>700 000 nouveau-nés (6 comtés de Californie et 1 comté du Nevada).</p> <p>Concentrations en ions ClO_4^- : de 4 à 16 $\mu\text{g/L}$</p>	<p>- type d'étude : Transversale</p> <p>- exposition : Eau de boisson</p> <p>- évaluation : Taux de TSH et prévalence d'hypothyroïdie congénitale</p>	<p>Absence de lien entre la présence de sels de perchlorate dans l'eau de consommation et la prévalence d'hypothyroïdie congénitale.</p> <p>- RR= 1 IC à 95 % [0,9 à 1,2]</p>
<p>1099 nouveau-nés (Yuma) et 443 nouveau-nés (Flagstaff en Arizona).</p> <p>Concentration en ions ClO_4^- :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Yuma : 6 $\mu\text{g/L}$ - Flagstaff : niveaux de détection non atteints avec une limite de détection (LoD) de 4 $\mu\text{g/L}$ 	<p>- type d'étude : Cohorte</p> <p>- exposition : Eau de boisson/ via la mère</p> <p>- évaluation : Taux de TSH et de T4</p>	<p>Association entre la présence de sels de perchlorate (à un taux détectable dans l'eau de boisson et l'augmentation du taux sanguin en TSH.</p> <p>Absence de lien entre la détection d'ions perchlorate et le taux de T4 sanguin.</p>

Tableau 12-A : Résultats des études épidémiologiques réalisées chez les nouveau-nés concernant l'

Population étudiée	Méthode	Principaux résultats
<p>163 enfants de 6 à 8 ans et 11 967 nouveau-nés (3 villes du Chili : Taltal, Chanaral, Antofagasta)</p> <p>Concentration en ions ClO_4^- :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Taltal : 112 $\mu\text{g/L}$ - Chanaral : 6,2 $\mu\text{g/L}$ - Antofagasta : taux non détectables 	<ul style="list-style-type: none"> - type d'étude : Cohorte - exposition : Eau de boisson/ via la mère - évaluation : Taux de TSH et de T4 libre 	<p>Absence d'association entre la présence d'ions perchlorate dans l'eau de boisson et une variation en hausse du taux de TSH chez les nouveau-nés et les écoliers (ou l'apparition de goitre).</p> <p>Association entre la présence d'ions perchlorate dans l'eau de boisson et une variation en hausse du taux de T4 libre (cependant jugée non significative sur le plan clinique).</p>
<p>17 308 nouveau-nés (Las Vegas) et 5882 nouveau-nés (Reno)</p> <p>Concentration en ions ClO_4^- :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Las Vegas : entre 9 et 15 $\mu\text{g/L}$ - Reno : absence de détection avec une LoD de 4 $\mu\text{g/L}$ 	<ul style="list-style-type: none"> - type d'étude : Cohorte - exposition : Eau de boisson/ via la mère - évaluation : Taux de T4 	<p>Absence de lien entre la présence d'ions perchlorate dans l'eau de boisson et une variation du taux de TSH chez le nouveau-né.</p>
<p>407 nouveau-nés (Las Vegas) et 133 nouveau-nés (Reno).</p> <p>Concentration en ions ClO_4^- :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Las Vegas : entre 9 et 15 $\mu\text{g/L}$ - Reno : absence de détection avec une LoD de 4 $\mu\text{g/L}$ 	<ul style="list-style-type: none"> - type d'étude : Cohorte - exposition : Eau de boisson/ via la mère - évaluation : Taux de TSH 	<p>Absence de lien entre la présence d'ions perchlorate dans l'eau de boisson et une variation du taux de T4 chez le nouveau-né.</p>

Tableau 12-B : Résultats des études épidémiologiques réalisées chez les nouveau-nés concernant l'e

Population étudiée	Méthode	Principaux résultats
<p>15 090 nouveau-nés (Redlands) et 685 161 nouveau-nés (comté de Riverside et San Bernardino).</p> <p>Concentration en ions ClO_4^- :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Redlands : entre LoD de 4 $\mu\text{g/L}$ et 9 $\mu\text{g/L}$ - comté de Riverside et San Bernardino : absence de détection avec LoD de 4 $\mu\text{g/L}$ 	<ul style="list-style-type: none"> - type d'étude : Cohorte - exposition : Eau de boisson/ via la mère - évaluation : Taux de TSH et taux d'apparition d'hypothyroïdies congénitales 	<p>Absence d'association entre la contamination de l'eau de boisson par les ions perchlorate et l'apparition d'hypothyroïdie congénitale ou avec une perturbation du taux de TSH</p>
<p>50 326 nouveau-nés (villes de Californie impactée par les ions ClO_4^-) et 291 931 nouveau-nés (autres villes de Californie non impactée par les ions ClO_4^- présentant des taux inférieurs à 5$\mu\text{g/L}$).</p> <p>Concentration en ions ClO_4^- :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Premières ville de Californie : supérieurs à 5 $\mu\text{g/L}$ - autres ville de Californie : inférieurs à 5$\mu\text{g/L}$ <p>(Les villes n'ont pas été précisées dans l'étude)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - type d'étude : Cohorte - exposition : Eau de boisson/ via la mère - évaluation : Survenue d'hypothyroïdie congénitale et mesure du taux de TSH 	<p>Absence de lien entre le taux d'ions perchlorate dans l'eau de boisson et l'apparition de cas d'hypothyroïdie congénitale ou avec une variation de taux de TSH chez le nouveau-né.</p>

Tableau 12-C : Résultats des études épidémiologiques réalisées chez les nouveau-nés concernant l'

Population étudiée	Méthode	Principaux résultats
<p>97 nouveau-nés (banlieue exposée de Ramat Hasharon), 216 nouveau-nés (banlieue moyennement exposée de Ramat Hasharon) et 843 nouveau-nés (banlieue peu exposée de Ramat Hasharon)</p> <p>Concentration en ions ClO_4^- :</p> <ul style="list-style-type: none"> - banlieue exposée de Ramat Hasharon : supérieure à 340 $\mu\text{g/L}$ - banlieue moyennement exposée de Ramat Hasharon : entre 42 et 94 $\mu\text{g/L}$ - banlieue peu exposée de Ramat Hasharon : inférieure à 3 $\mu\text{g/L}$. 	<ul style="list-style-type: none"> - type d'étude : Cohorte - exposition : Eau de boisson/ via la mère - évaluation : Survenue d'hypothyroïdie congénitale et mesure du taux de T4 	<p>Absence d'association entre la présence de sels de perchlorate dans l'eau de boisson et une variation du taux de T4 chez le nouveau-né.</p>
<p>497 458 nouveau-nés (villes de Californie)</p> <p>Concentration en ions ClO_4^- :</p> <ul style="list-style-type: none"> - villes exposées : supérieure à 5 $\mu\text{g/L}$ ou - villes non exposées : inférieure à 5 $\mu\text{g/L}$ 	<ul style="list-style-type: none"> - type d'étude : Cohorte - exposition : Eau de boisson/ via la mère - évaluation : Taux de TSH 	<p>Association entre la contamination de l'eau de boisson par des taux supérieurs à 5 $\mu\text{g/L}$ d'ions perchlorate et des variations du niveau de TSH chez le nouveau-né.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Odd ratio = 1,53 (P <0,0001) (Dans les 24 heures suivant la naissance) - Odd ratio = 1,27 (P <0,0001) (Autour de 24 heures)

Tableau 12-D : Résultats des études épidémiologiques réalisées chez les nouveau-nés concernant l'

Population étudiée	Méthode	Principaux résultats
92 enfants de moins d'1 an (Pennsylvanie).	<ul style="list-style-type: none"> - type d'étude : Transversale - exposition : Eau de boisson, alimentation et via la mère - évaluation : Taux de T4 et de TSH 	<p>Association faible mais significative entre une augmentation du taux d'ions perchlorate urinaire et une augmentation du taux de TSH urinaire observée chez des nourrissons présentant une iodurie qualifiée de faible (inférieure à 100 µg/L).</p> <p>Absence d'association entre une augmentation du taux d'ions perchlorate urinaire et une augmentation du taux de T4 ou de TSH dans le sérum.</p> <p>- IC = 95 %</p>
<p>64 mères et leurs enfants âgés de 1 à 3 mois (Boston).</p> <p>Concentration en ions ClO_4^- :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Urines maternelles : 3,1 µg/L en moyenne - Urines infantiles : 4,7 µg/L en moyenne - Lait maternel : 4,4 µg/L en moyenne 	<ul style="list-style-type: none"> - type d'étude : Transversale - exposition : Environnementale de la mère, conduisant à une exposition des nourrissons via le lait maternel (et via une réduction de l'iode passant par le lait maternel) - évaluation : Taux de TSH et de T4 libre 	<p>Absence d'association entre les taux de TSH ou de T4 chez le nourrisson et les niveaux d'iode et d'ions perchlorate dans le lait maternel, l'urine maternelle et l'urine infantile.</p>

Tableau 12-E : Résultats des études épidémiologiques réalisées chez les nouveau-nés concernant l'

3. Études épidémiologiques réalisées chez des femmes enceintes

Population étudiée	Méthode	Principaux résultats
<p>180 femmes enceintes (Taltal, Chañaral et Antofagasta)</p> <p>Concentration en ions ClO_4^- :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Taltal : 114 $\mu\text{g/L}$ - Chañaral : 6 $\mu\text{g/L}$ - Antofagasta : 0,5 $\mu\text{g/L}$ 	<ul style="list-style-type: none"> - type d'étude : Cohorte - exposition : Eau de boisson - évaluation : Taux de T3, T4 et de TSH 	<p>Absence de lien entre la contamination de l'eau de boisson par les ions perchlorate et une variation de T3, T4 libre ou TSH chez les femmes enceintes.</p> <p>Absence de lien entre la contamination de l'eau de boisson par les ions perchlorate et une variation du poids de naissance, de circonférence crânienne ou de la taille des nouveau-nés.</p>
<p>Femmes de l'étude de Tellez Tellez et al., soit 180 femmes enceintes (Taltal, Chañaral et Antofagasta)</p> <p>Concentration en ions ClO_4^- :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Taltal : 114 $\mu\text{g/L}$ - Chañaral : 6 $\mu\text{g/L}$ - Antofagasta : 0,5 $\mu\text{g/L}$ 	<ul style="list-style-type: none"> - type d'étude : Cohorte - exposition : Eau de boisson - évaluation : Taux de T4 libre et de TSH 	<p>Absence de lien entre la présence d'ions perchlorate dans les urines de femmes enceintes et les taux sanguins de T4 libre ainsi que de TSH, que ce soit avec une iodurie supérieure ou inférieure à 100 $\mu\text{g/L}$. (Cependant seules 17 mesures concernaient des femmes avec une iodurie inférieure à 100 $\mu\text{g/L}$)</p>

Tableau 13-A : Résultats des études épidémiologiques réalisées chez les femmes enceintes concern

Population étudiée	Méthode	Principaux résultats
<p>- 1ère sous cohorte : 374 femmes enceintes (Cardiff) et 261 femmes enceintes (Turin) : taux sanguins de T4 et TSH élevés au 1^{er} trimestre de grossesse,</p> <p>- 2ème sous cohorte de 480 femmes enceintes (Cardiff) et 526 femmes enceintes (Turin) : équilibre thyroïdien</p>	<p>- type d'étude : Cohorte</p> <p>- exposition : Environnementale</p> <p>- évaluation : Taux de T4 et de TSH comparés aux taux urinaires d'ions perchlorate</p>	<p>Absence dans les deux sous cohortes de liens entre la concentration en ions perchlorate urinaire et les taux sanguins de T4 libre et de TSH des femmes enceintes au premier trimestre de grossesse, que ce soit avec une iodurie supérieure ou inférieure à 100 µg/L.</p>
<p>134 femmes enceintes au 1^{er} trimestre de grossesse (Los Angeles) et 107 femmes enceintes au 1^{er} trimestre de grossesse (Cordoba).</p> <p>Concentration en ions ClO₄⁻ :</p> <p>- Los Angeles : 7,8 µg/L</p> <p>- Cordoba : 13,5 µg/L</p>	<p>- type d'étude : Cohorte</p> <p>- exposition : Eau de boisson</p> <p>- évaluation : Taux de TSH, de T4 libre et de T3 sanguins</p>	<p>Absence de lien entre les taux urinaires en ions perchlorate et les taux hormonaux sanguins thyroïdiens des femmes enceintes au 1^{er} trimestre de grossesse, même avec une iodurie inférieure à 100 µg/L.</p>
<p>120 femmes enceintes (Athènes).</p> <p>Concentration en ions ClO₄⁻ :</p> <p>- Urinaire : 4,1 µg/L en moyenne</p>	<p>- type d'étude : Transversale</p> <p>- exposition : Eau de boisson</p> <p>- évaluation : Taux de TSH, de T4 libre et de T3 sanguins</p>	<p>Absence de lien. Une faible exposition au perchlorate est omniprésente mais non associée à des modifications de la fonction thyroïdienne chez les femmes grecques légèrement carencées en iode au cours du premier trimestre de la grossesse.</p>

Tableau 13-B : Résultats des études épidémiologiques réalisées chez les femmes enceintes concernées

Population étudiée	Méthode	Principaux résultats
200 femmes enceintes avec un âge gestationnel de 14 semaines ou moins (Thaïlande).	<ul style="list-style-type: none"> - type d'étude : Transversale - exposition : Eau de boisson - évaluation : Hormones thyroïdiennes et ions perchlorate urinaires 	<p>Une faible exposition environnementale aux ions perchlorate est courante en Thaïlande.</p> <p>- Association positive à la TSH et négative à la T4 libre chez les femmes enceintes au premier trimestre.</p>
284 femmes enceintes au 1 ^{er} trimestre (New York).	<ul style="list-style-type: none"> - type d'étude : Transversale - exposition : Environnementale - évaluation : Concentrations urinaires en ions perchlorate, de TSH et de T4 	Lien entre l'exposition aux ions perchlorate (ainsi que nitrate et thiocyanate) et la variation de la TSH chez la femme enceinte.
<p>1880 femmes enceintes (San Diego)</p> <p>Concentration en ions ClO_4^- :</p> <p>- Colorado River : 4 à 8 $\mu\text{g/L}$</p>	<ul style="list-style-type: none"> - type d'étude : Transversale - exposition : Environnementale - évaluation : Concentrations sériques d'hormones thyroïdiennes, d'anticorps antithyroïdiens et concentrations urinaires en ions perchlorate et en iode 	Lien entre exposition aux ions perchlorate et la variation des taux de TSH et T4.

Tableau 13-C : Résultats des études épidémiologiques réalisées chez les femmes enceintes concernées

Population étudiée	Méthode	Principaux résultats
359 femmes enceintes au 3ème trimestre de grossesse. (New York, Caroline du Nord, Utah, Californie, Pennsylvanie, Wisconsin, Dakota du Sud, Minnesota)	<ul style="list-style-type: none"> - type d'étude : Cohorte - exposition : Environnementale - évaluation : Taux de TSH, de T4 libre sériques et taux urinaires d'ions perchlorate 	<p>Aucun effet des ions perchlorate sur les indicateurs thyroïdiens chez les femmes au troisième trimestre</p> <p>Aucune association entre les ions perchlorate urinaires et la TSH ou la T4 libre, même chez les femmes avec un taux d'iode urinaire inférieur à 100 µg/L.</p>
308 femmes enceintes avec un âge moyen de 35 ans (Exeter).	<ul style="list-style-type: none"> - type d'étude : Cohorte - exposition : Eau de boisson - évaluation : Taux de T3, de T4 et de TSH 	<p>Une exposition environnementale aux ions perchlorate engendre une diminution de T4 circulante chez les femmes enceintes au 3ème trimestre de grossesse, ayant des conséquences négatives sur le développement du fœtus.</p>

Tableau 13-D : Résultats des études épidémiologiques réalisées chez les femmes enceintes concern

4. Analyse des résultats

Concernant les résultats des études épidémiologiques portant sur les nouveau-nés, neuf études ((66), (68), (71), (72), (73), (74), (75), (76), (77)) sur onze concluent à une absence de lien entre une exposition aux ions perchlorate et une perturbation du bilan thyroïdien des nouveau-nés. Parmi ces études, six ((66), (68), (72), (73), (75), (76)) ne mettent également pas en évidence d'association entre une exposition aux ions perchlorate et une perturbation des taux d'hormone TSH, dont trois ((66), (75), (76)) qui montrent également l'absence de lien avec l'apparition d'une hypothyroïdie congénitale et une ((68)) qui montre également l'absence de lien avec une perturbation des taux de T4. Les études (71), (74) et (77) mettent, quant à elles, en évidence l'absence de lien seulement avec T4.

Parmi les quatre études ((67), (71), (72), (78)) qui concluent à une association entre l'exposition aux ions perchlorate et une perturbation du bilan thyroïdien, trois ((67), (71), (78)) mettent en évidence un lien entre exposition et TSH, et une (72) un lien avec la T4.

Concernant les résultats des études épidémiologiques portant sur les femmes enceintes, six études ((37), (38), (39), (79), (80), (81)) concluent à l'absence de lien entre une exposition aux ions perchlorate et une perturbation des taux d'hormones T3, T4 et TSH, dont quatre ((37), (38), (80), (81)) avec la prise en compte du statut iodé. L'étude (79) n'observe également aucun lien avec une modification de la circonférence crânienne du fœtus. Une septième étude ((69)) conclut à l'absence de lien entre l'exposition aux ions perchlorate et la variation des taux d'hormone T4 uniquement.

Parmi les études établissant un lien entre une exposition aux ions perchlorate et une perturbation du bilan thyroïdien, une étude ((29)) établit un lien avec une perturbation des taux de T3, T4 et de TSH, deux études ((69), (70)) observent un lien avec une variation des taux de TSH uniquement et une étude ((82)) un lien avec une variation des taux de T4 uniquement.

3. Conclusion de la première partie

Il est difficile face aux résultats ambivalents des études épidémiologiques présentées de conclure quant à l'absence ou à la présence de liens entre une exposition aux ions perchlorate via son mode d'exposition principal, identifié comme étant l'eau de boisson, et une perturbation du bilan thyroïdien que ce soit auprès des femmes enceintes ou des nouveau-nés, et ce, que l'iodurie soit supérieure ou inférieure à 100 µg/L.

Une étude récente, datant de 2018 (82), aboutit au fait que l'exposition environnementale aux ions perchlorate est associée à des taux sériques d'hormone T4 inférieurs chez la femme enceinte. Ceci peut engendrer un impact négatif sur le développement neurocognitif du fœtus et sur d'autres issues de la grossesse. Cette étude récente apporte des preuves plausibles quant à l'effet néfaste de l'exposition aux ions perchlorate des femmes enceintes avec des conséquences sur la grossesse et sur le fœtus.

Il faut cependant noter les limites de cette étude reconnues par les auteurs eux-mêmes. L'iodurie et les concentrations urinaires en ions perchlorate n'ont été mesurées que sur un unique échantillon. Il en est de même pour l'évaluation des taux d'hormones thyroïdiennes. De plus, la cohorte était majoritairement caucasienne du sud-ouest de l'Angleterre, ce qui réduit la possibilité de généraliser. Ces limites sont d'ailleurs applicables à l'ensemble des études, les taux individuels

d'ions perchlorate urinaires n'ont pas été dosés dans chacune d'entre elles. De plus, les habitudes de consommation de l'eau de boisson n'ont pas également été toujours relevées. Ainsi, par exemple, une femme enceinte ne consommant que de l'eau embouteillée, mais résidant dans une ville présentant des taux d'ions perchlorate élevés, sera considérée par l'étude comme exposée aux ions perchlorate, ce qui apportera un biais à l'étude.

Que les études soient favorables ou défavorables à l'existence d'un lien, on peut déplorer chez la plupart d'entre elles des limites :

- un nombre insuffisant de sujets,
- l'absence d'information sur le statut iodé des sujets,
- l'absence de données d'exposition personnelle et donc l'absence du niveau d'imprégnation individuelle,
- l'absence de données sur les habitudes de consommation.

Il serait donc intéressant, d'avoir des données plus valorisantes avec un nombre représentatif de sujets, ou le calcul du nombre de sujets requis afin de donner plus de valeur aux conclusions apportées. Définir l'exposition aux ions perchlorate de façon individuelle permettrait également d'éviter un biais dans l'établissement de la présence ou non d'un lien exposition/conséquences sanitaires.

Il est donc scientifiquement et objectivement impossible de conclure en l'état actuel des connaissances quant à l'association ou non entre l'exposition aux ions perchlorate et la perturbation du bilan thyroïdien des populations dites sensibles.

Il faut néanmoins noter que l'impossibilité d'établir un lien n'exclut pas un effet et impose donc la plus grande précaution quant à la présence des ions perchlorate dans les eaux des réseaux de distribution français, dans l'alimentation et dans les laits infantiles. Il est donc nécessaire de continuer les recherches et de mettre en place des restrictions de consommation pour limiter l'exposition de la population française aux ions perchlorate.

Seconde partie : Les ions perchlorate et l'environnement

1. Les rejets

1.1. Sources de contamination

La présence des ions perchlorate dans l'environnement résulte de deux sources ou deux origines de contamination : une naturelle et une anthropique (liée à l'activité humaine) (figure 7).

Il faut tout d'abord noter que de récentes méthodes de recherches en laboratoire appelées « Stable Isotopes Technique » ont permis de différencier les ions perchlorate d'origine naturelle de ceux d'origine anthropique (83).

Une de ces techniques consiste en l'estimation du ratio de trois isotopes de l'oxygène ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ et $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$). En effet, Bao et Gu (2004) ont démontré que les ions perchlorate retrouvés dans le sol du désert de l'Atacama dans le nord du Chili possédaient une signature isotopique différente de celle des ions perchlorate retrouvés dans le commerce, d'origine synthétique (84). Ainsi, il semblerait que l'oxygène d'un ion perchlorate lors de sa formation, dans des conditions environnementales dites normales, n'est pas échangé. L'ion conserve alors la signature isotopique de l'oxygène d'où il provient, et peut donc être tracé.

Une autre de ces techniques utilise un principe similaire avec le fractionnement au chlore $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ pour distinguer l'origine naturelle de l'origine anthropique des ions perchlorate.

Une étude menée par Böhlke et al. (2005) a combiné ces techniques d'isotopes avec le chlore et l'oxygène ($^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ et $^{18}\text{O}/^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$) afin d'optimiser la différenciation des ions perchlorate d'origine synthétique de ceux d'origine naturelle (85).

Ces techniques ont donc permis d'identifier, lors de la mise en évidence de la présence d'ions perchlorate, l'origine de la contamination afin de la caractériser et de permettre de la contrôler. Il faut rappeler que du fait de la solubilité importante des ions perchlorate dans l'eau, on peut retrouver ces derniers très loin de la zone de contamination source si une pluviosité suffisante est observée.

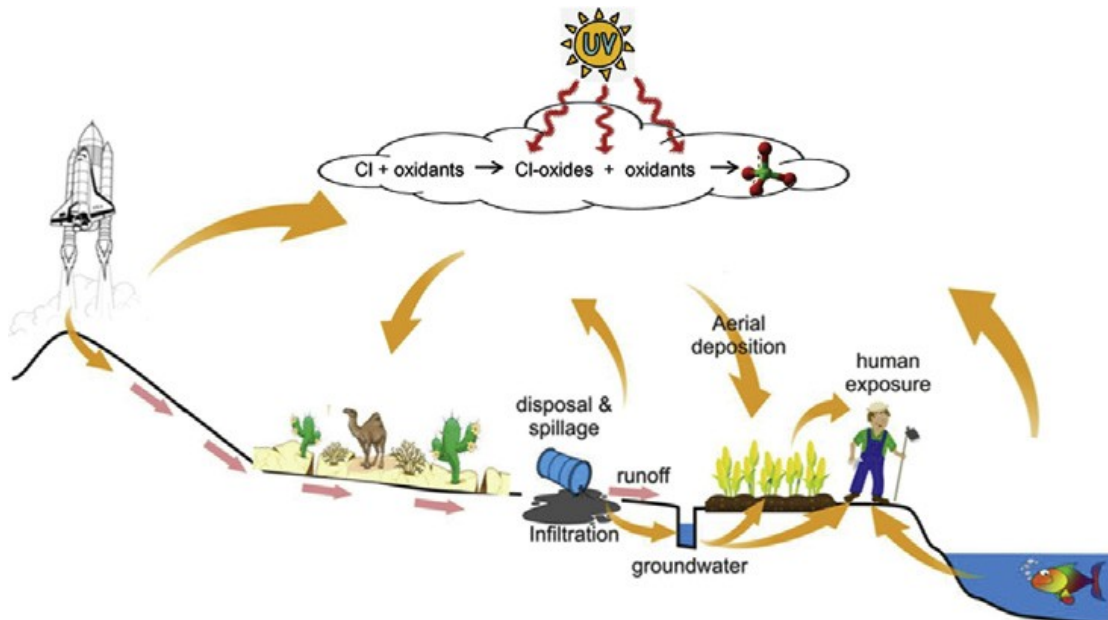


Figure 7 : Formations et sources de dissémination des ions perchlorate dans l'environnement (5)

1.1.1. Contaminations d'origine naturelle

Il a été mis en évidence que les sels de perchlorate peuvent être synthétisés dans l'environnement grâce à un processus naturel, sans intervention humaine. Ce processus correspond à une synthèse s'opérant en général dans des zones géographiques particulières, notamment dans des dépôts de nitrates d'évaporites situés dans des régions arides/semi-arides.

Les évaporites sont des dépôts naturels riches en chlorure, ils vont par exemple être retrouvés dans les déserts nord chiliens comme l'Atacama, bien connu pour ses sources de nitrates et pour être une des sources naturelles la plus importante en ions perchlorate (86). Ces sources d'ions perchlorate d'origines naturelles sont utilisées dans le monde entier. En effet, des engrais extraits des minerais et des saumures de ces gisements chiliens sont exportés depuis plus d'un siècle. On retrouve généralement dans ces gisements des concentrations en perchlorate oscillants entre 0,03 à 0,1% (87).

D'autres gisements naturels existent, Duncan et al. (2005) en ont identifié un certain nombre : un au Canada, un dans le Searles Lake en Californie, des croûtes en Bolivie, des dépôts en surface à l'ouest du Texas, et des gisements au Nouveau-Mexique, dans des régions semi-arides, provenant de dépôts atmosphériques et pour finir des dépôts marins retrouvés dans la formation de Mission Valley en Californie (87).

Les ions perchlorate ayant une solubilité élevée, ces gisements naturels contaminent les sources d'eaux environnantes. Il a été ainsi dosé dans les eaux souterraines proches de dépôts de nitrates, des concentrations d'ions perchlorate pouvant atteindre 10 000 µg/L (88). Il y a également été mis en évidence des traces d'ions perchlorate, dans des échantillons d'eau de pluie et de neige, loin de sources de contamination, en Antarctique (89).

Une représentation de la présence des ions perchlorate dans le monde a été réalisée par Cao et al. (2019) (90) (figure 8). Il y est représenté les différentes origines probables de contamination par les ions perchlorate selon la signature isotopique.

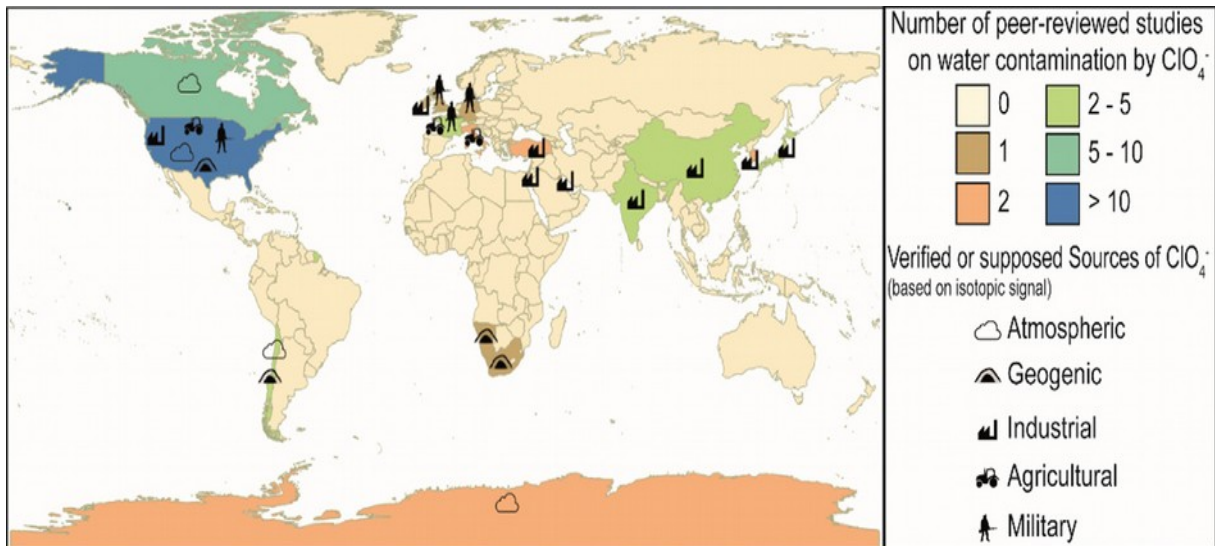
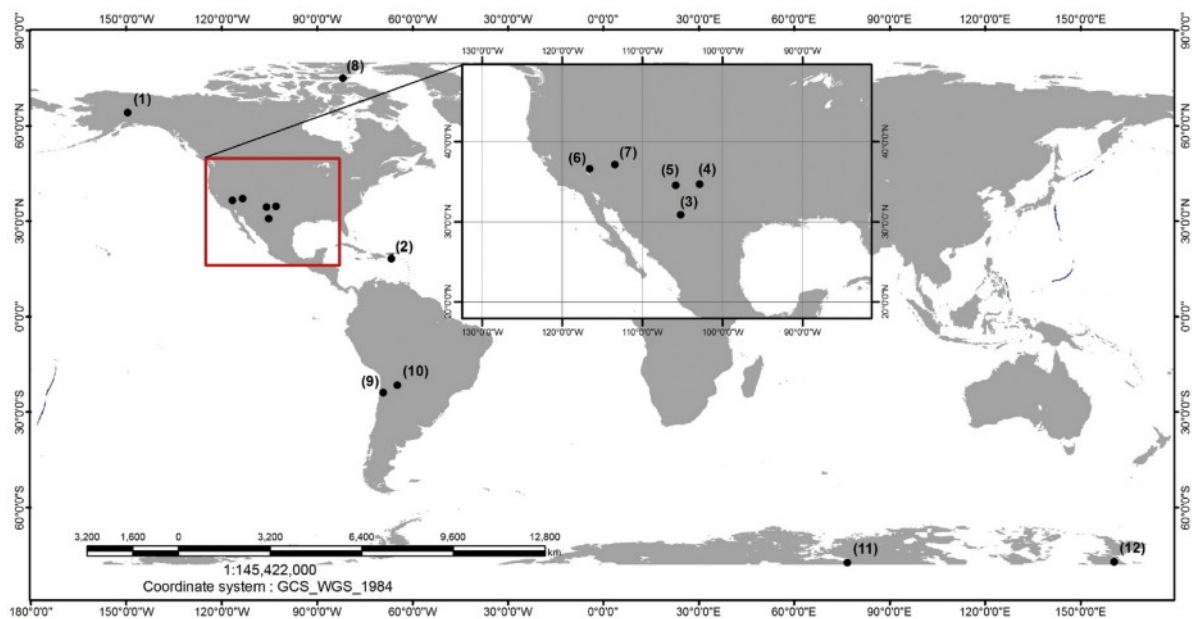


Figure 8 : Origines des ions perchlorate retrouvés dans le monde selon la signature isotopique observée (90).

Kumarathilaka et al. (2016) (5) ont également réalisé la représentation des localisations où des ions perchlorate d'origine naturelle ont été observés dans le monde, ainsi que les concentrations retrouvées dans les différents milieux (sol, neige/glace, eau de surface, eau souterraine) (figure 9).

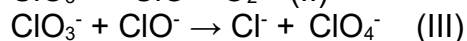
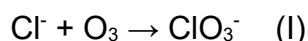


Note: 1. Alaska, USA 2. Puerto Rico, USA 3. Chihuahuan Desert, Texas, USA 4. High Plains, Texas, USA 5. New Mexico, USA 6. Amargosa Desert, Nevada, USA 7. Sand Hollow, Utah, USA 8. Devon Island ice cap, Canada 9. Atacama Desert, Chile 10. Bolivian playa crusts, Bolivia 11. Dome A region in Antarctica 12. Beacon Valley in Antarctica

Location	Concentration	Medium	Reference
Alaska and Puerto Rico, USA	<5–102 ng L ⁻¹	Wet deposition	Rajagopalan et al. (2008)
Texas, New Mexico, Nevada and Utah, USA	1.6–13 µg kg ⁻¹	Soil	Rao et al. (2007)
Atacama Desert, Northern Chile	290–2565 µg kg ⁻¹	Soil	Calderón et al. (2014)
Bolivian playa crusts, Bolivia	500 mg kg ⁻¹	Salt	Duncan et al. (2005)
Atacama Desert, Northern Chile	744–1480 µg L ⁻¹	Surface water	Calderón et al. (2014)
Atacama Desert, Chile	1–10 mg L ⁻¹	Surface water	Duncan et al. (2005)
Great Lake, USA	0.05–0.13 mg L ⁻¹	Surface water	Poghosyan et al. (2014)
Texas and New Mexico, USA	<4 µg L ⁻¹ to 200 µg L ⁻¹	Groundwater	Rajagopalan et al. (2006)
Texas, USA	8–21 µg L ⁻¹	Groundwater	Scanlon et al. (2008)
Middle Rio Grande Basin, North–central New Mexico, USA	0.12–1.8 µg L ⁻¹	Groundwater	Plummer et al. (2006)
Devon Island ice cap, Canada	1–18 ng L ⁻¹	Snow	Furdui and Tomassini (2010)
Dome A region, Antarctica	10–340 ng L ⁻¹	Snow and ice	Jiang et al. (2013)
Antarctic Dry Valleys	1100 µg kg ⁻¹	Soil and ice	Kounaves et al. (2010)

Figure 9 : Localisation des gisements naturels d'ions perchlorate autour du globe (5)

Dans une autre étude, Plummer et al. (2006) (91) ont détecté des niveaux d'ions perchlorate allant de 0,12 à 1,8 µg/L dans des eaux souterraines de régions reculées du bassin du Rio Grande, dans le centre-nord du Nouveau-Mexique, à distance de toute source d'ions perchlorate. Les auteurs en ont déduit que ces ions pourraient provenir de l'atmosphère. Des recherches ont d'ailleurs émis l'hypothèse d'une possible formation d'ions perchlorate à partir de chlorure provenant des océans ou de composés chlorés terrestre, soufflés dans l'atmosphère. Sous l'action des rayons UV, la réaction photochimique entre les chlorure et l'ozone atmosphérique conduirait à la formation d'ions perchlorate (92). Il faut cependant noter le fait que dans cette hypothèse de synthèse naturelle, l'ozone est lui un polluant d'origine anthropique. Or ces recherches ont été établies après l'observation de traces d'ions perchlorate dans des zones sans aucune activité anthropique utilisant des ions perchlorate recensée. Ce type de synthèse d'ions perchlorate a d'ailleurs été confirmé en laboratoire par l'oxydation de composés chlorés par de l'ozone, selon les réactions suivantes (93) :



1.1.2. Sources de contamination d'origine anthropique

Les ions perchlorate sont retrouvés dans de nombreuses et diverses applications, aussi bien dans l'industrie que dans l'agriculture, mais ils sont majoritairement utilisés dans les domaines militaires et de l'aérospatiale (26), avec plus de 50% de leur utilisation liée aux propulseurs de missiles. Néanmoins, il y a eu au cours des dernières décennies une diversification de leurs utilisations dans d'autres domaines d'application civile.

1.1.2.1. Domaine industriel :

Il y a moult utilisations des ions perchlorate dans le domaine industriel (tableau 14). Ils peuvent être utilisés dans le système de déclenchement des airbags, en tant que limitant de la réaction d'explosion lors de l'expansion du coussin. Ils sont également employés pour ajuster la force ionique des bains électrolytiques ou encore en tant qu'additif pour la fabrication des polychlorures de vinyle (PVC), mais aussi en tant qu'agent de blanchiment pour des textiles ou pour le tannage du cuir. On peut les retrouver en tant que composants d'adhésifs temporaires pour des plaques métalliques, dans les peintures et émaux, ainsi que dans le cadre de la fabrication de dioxyde de chlore pour l'industrie de la pâte à papier.

Cependant, la fabrication, le stockage et l'utilisation de produits de désinfection à base d'hypochlorite, est l'industrie la plus à risque, en termes de contamination tant environnementale qu'au niveau de l'eau. Il a été observé que les chlorate éventuellement formés, lors des étapes de stockage des solutions d'hypochlorite, ont la capacité d'être à l'origine de différents sous-produits, via des réactions avec des oxydants forts comme l'ozone, ou les ions perchlorate (93). Des mesures sur des solutions d'hypochlorite utilisées pour la désinfection de l'EDCH dans le Massachusetts mettent en évidence des teneurs pouvant atteindre 6 750 µg/L d'ions perchlorate, avec une augmentation des teneurs en lien avec la durée de stockage de l'hypochlorite (94).

Il faut noter que les apports liés aux produits de désinfection rejetés dans le milieu naturel, via les stations d'épuration, entraînent généralement un apport en ions perchlorate inférieur au microgramme par litre.

En effet, la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) d'Occitanie a, au cours de sa commission du 30 janvier 2015 ayant pour objet « le Perchlorate en Garonne », estimé les rejets d'eau de la société « SME-Safran », un producteur d'ions perchlorate d'ammonium, localisée à Toulouse (95). Cette entreprise a déclaré qu'entre janvier et juin 2011, ses rejets de perchlorate d'ammonium dans le réseau des eaux usées (à la sortie de l'atelier de production) étaient en moyenne de 1,06 kg/jour, durant ces 6 mois de l'année 2011. Cette année-là, l'usine a fonctionné 9 mois, ce qui a permis de produire 3000 tonnes de perchlorate d'ammonium. En 2012, l'entreprise a également fonctionné 9 mois et a produit 2600 tonnes. Cependant les rejets ont été 50 % inférieurs à ceux de l'année précédente grâce à l'installation d'une « station des effluents gazeux et liquides de l'atelier perchlorate avec recyclage des flux dans le procédé » (95).

1.1.2.2. Domaine militaire

Les ions perchlorate ont été employés dès la première guerre mondiale pour de nombreuses applications militaires (tableau 14).

Ils ont tout d'abord été utilisés comme oxydant pour les propulseurs de fusées sous forme de propergol (96). Les propergols sont des corps ou des ensembles de corps, dont la réaction chimique entraîne la libération d'une grande quantité d'énergie, sans avoir besoin d'oxygène, permettant ainsi d'entretenir la propulsion d'un engin. Ainsi, ils sont employés dans les fusées, les missiles, les propulseurs d'avions et autres engins utilisant des réacteurs. Les ions perchlorate représentaient d'ailleurs généralement plus de deux tiers en masse du carburant des missiles (1).

Ces ions sont également retrouvés pour la fabrication des dispositifs pyrotechniques militaires tels les fusées éclairantes, certains explosifs, les cartouches d'armes à feu ou encore, dans des fumigènes en mélange avec de l'acide sulfamique.

Finalement, plusieurs sels de perchlorate sont utilisés pour la fabrication de chandelles à oxygène. Ces dernières sont composées de chlorate, de perchlorate de lithium, de sodium et de potassium, pour leur pouvoir oxydant, combinés à des combustibles, comme de la limaille de fer qui, sous l'action de la chaleur, vont générer de l'oxygène. L'oxygène ainsi généré sera utile pour les cabines d'avions, les sous-marins et autres milieux clos.

Ces utilisations sont également sources de contamination de l'environnement. En effet, il a été observé aux États-Unis que l'utilisation de propergols, contenant des ions perchlorate, pollue de nombreuses eaux souterraines et eaux de surface avec des concentrations allant de 8 à 3700 µg/L. Elles peuvent même s'élever à 30.000 µg/L, comme observé dans des eaux de surface à proximité d'une usine de munitions au Texas. Des concentrations en perchlorate d'ammonium ont également été mesurées dans les eaux potables du réseau de distribution, de 4 à 24 µg/L dans le Nevada et de 4 à 820 µg/L en Californie (88).

L'utilisation des ions perchlorate dans les chandelles à oxygène est quant à elle problématique lors des différentes étapes de fabrication et de stockage, mais également lors de leur emploi dans les engins de guerre. En effet, durant la première ou la seconde guerre mondiale, de nombreux sous-marins ou avions ont été abattus

sur les champs de bataille ou en pleine mer. Les épaves ou carcasses d'avions qui n'ont pu être récupérées, de par leur profondeur, le coût du remorquage ou du désossage relarguent encore de nos jours de nombreux polluants dont des ions perchlorate qui diffusent dans les sols ou dans les eaux. Cette dernière pollution est d'autant plus importante qu'elle n'est pas encore effective. En effet les nombreuses épaves des différentes guerres sont des bombes à retardement écologique, avec une durée de vie des tôles estimée entre 50 et 70 ans, les épaves se dégradent et commencent à relarguer de plus en plus leurs hydrocarbures, mais aussi pour les engins dotés de chandelles à oxygène des ions perchlorate (97) (98) (99).

Activités	Types de sel de perchlorates	Origine potentielle d'émission
Poudres explosives et poudres expérimentales	NH ₄ ClO ₄ Ba(ClO ₄) ₂ Ba(ClO ₄) ₂ •3H ₂ O LiClO ₄ •3H ₂ O	Sites de production Sites d'essai de propulseurs Industrie de l'armement (sites militaires, sites d'utilisation, site d'essai et de stockage) Sites de lancements aérospatiaux
Explosifs et explosifs expérimentaux	KClO ₄ AgClO ₄ NaClO ₄	Sites de production Industries de l'armement (sites militaires, sites d'utilisation, sites d'essai et de stockage) Anciens champs de batailles Anciens dépôts de munitions Mines/carrières Anciens sites miniers et exhaures
Produits pyrotechniques/ Fusées d'alarmes	NH ₄ ClO ₄ Ba(ClO ₄) ₂ Mg(ClO ₄) ₂ KClO ₄ Sr(ClO ₄) ₂	Sites de production Sites d'utilisation (aires de tirs) Sites de stockage
Générateurs à oxygène	LiClO ₄ KClO ₄	Sites de production
Airbags	NH ₄ ClO ₄ KClO ₄ NaClO ₄	Sites de production / Casses automobiles
Métallurgie	HClO ₄	Sites de production Industries métallurgiques
Batterie	LiClO ₄ Mg(ClO ₄) ₂	Sites de production / Casses automobiles
Industries de plasturgie (fabrication de PVC)	NH ₄ ClO ₄ LiClO ₄	Sites de production Réseau de distribution
Activité pharmaceutique	KClO ₄ RbClO ₄	Sites de production
Industrie chimique (catalyseurs, agents déshydratants, électrolytes)	Ca(ClO ₄) ₂ Mg(ClO ₄) ₂ HClO ₄ KClO ₄ NaClO ₄	Sites de production
Production de papier/ Production de cuir (Impuretés)	HClO ₄ NaClO ₄	Sites de production

Tableau 14: Secteurs d'activités industrielles et militaires manipulant des ions perchlorate (100)

1.1.2.3. Domaine agricole

La principale utilisation des sels de perchlorate dans le domaine agricole fût en tant qu'engrais dans le salpêtre chiliens aux États-Unis, mais également en France 1880 et 1950 (44) (46). L'importation plus récente de cet engrais en France est très improbable. Il faut cependant rappeler que l'utilisation d'eau contaminée par des ions perchlorate, ou la culture sur des sols contaminés, de par la proximité de sites industriels ou sur des anciens sites de guerre peuvent être sources de contamination de denrées alimentaires.

1.1.2.4. Autre domaine :

Les ions perchlorate de potassium sont retrouvés en tant que comburant dans des dispositifs pyrotechniques de type feux d'artifices et vont être susceptibles de générer des retombées atmosphériques. En effet, Wilkin et al. (2007) (101) ont étudié l'impact d'un feu d'artifice sur les concentrations en perchlorate d'un lac dans l'état d'Oklahoma, aux États-unis. La concentration moyenne dans l'eau du lac était de 0,005 à 0,081 µg/L (avec une limite de détection de 0,003 µg/L), suite au feu d'artifice, elle a augmenté pour atteindre 44,2 µg/L après 14h et redescendre à son niveau initial dans les 20 à 80 jours suivants. D'autres études ont confirmés que les feux d'artifices entraînent une augmentation radicale du taux de perchlorate dans le milieu aquatique, mais de manière ponctuelle et limitée dans le temps après leur utilisation. Il est à noter cependant que si ce n'est pas l'utilisation de ces dispositifs qui pose problème, la fabrication, le stockage, ainsi que l'élimination des nombreux composants des feux d'artifices peuvent être source de pollution et de contamination de l'environnement par les ions perchlorate.

1.2. Comportement des ions perchlorate dans l'environnement

1.2.1. Généralités

De par leur forte solubilité dans l'eau, les sels de perchlorate se dissolvent rapidement en un anion perchlorate et son cation correspondant 4^+ (pour le perchlorate d'ammonium par exemple). De ce fait, lors de leur libération les ions perchlorate sont en général très mobiles dans le sol et migrent facilement vers les eaux de surface par ruissellement ou vers les eaux souterraines par infiltration (44). Ils ne sont que très peu ou pas adsorbés par les sédiments, les surfaces minérales, la matière organique environnante. Ils ne sont pas ou très peu dégradés.

Par ailleurs, ils ne sont que très peu susceptibles de se volatiliser vers l'atmosphère que ce soit à partir de l'eau ou du sol de par leur très faible pression de vapeur. Lors des processus d'érosion, les sels de perchlorate secs peuvent cependant se retrouver dans l'atmosphère sous forme sèche adsorbés sur des particules ou sous forme d'aérosol solide (44).

1.2.2. Le grand cycle de l'eau

L'eau évolue sur terre en suivant un cycle et y existe sous trois formes physiques ; liquide, gazeux et solide, selon la température et la pression à laquelle elle est exposée.

Le soleil va réchauffer via ses rayons ultraviolets l'eau des lacs, mers, rivières et océans, ce qui va causer son évaporation. L'eau va s'élever dans l'air, c'est la vaporisation (Figure 10).

Une fois refroidies, en arrivant à une certaine altitude, les fines gouttelettes évaporées vont se condenser en nuages et se déplaceront dans les airs selon les vents, c'est la condensation. Selon la température, l'eau pourra revenir au sol sous forme de pluie, de neige ou de grêle, si la température est plus faible. Cette dernière étape s'appelle la solidification, et la glace, soumise à une augmentation de la température, va fondre pour retourner vers les océans et les nappes phréatiques, c'est la fusion. En fonction de l'endroit où elle retombe, l'eau retournera vers les lacs, les rivières, les océans, ou s'infiltrera dans la terre pour remplir les nappes phréatiques (102).

Durant ce grand cycle de l'eau, la présence d'ions perchlorate au niveau du sol est possible (rejet industriel, passé militaire, épandage agricole, etc). Lors d'intempéries, l'eau va « lessiver » le sol et pourra alors répandre des ions perchlorate. De plus, l'eau va également s'infiltrer dans le sol, entraînant alors les ions perchlorate vers les nappes phréatiques.

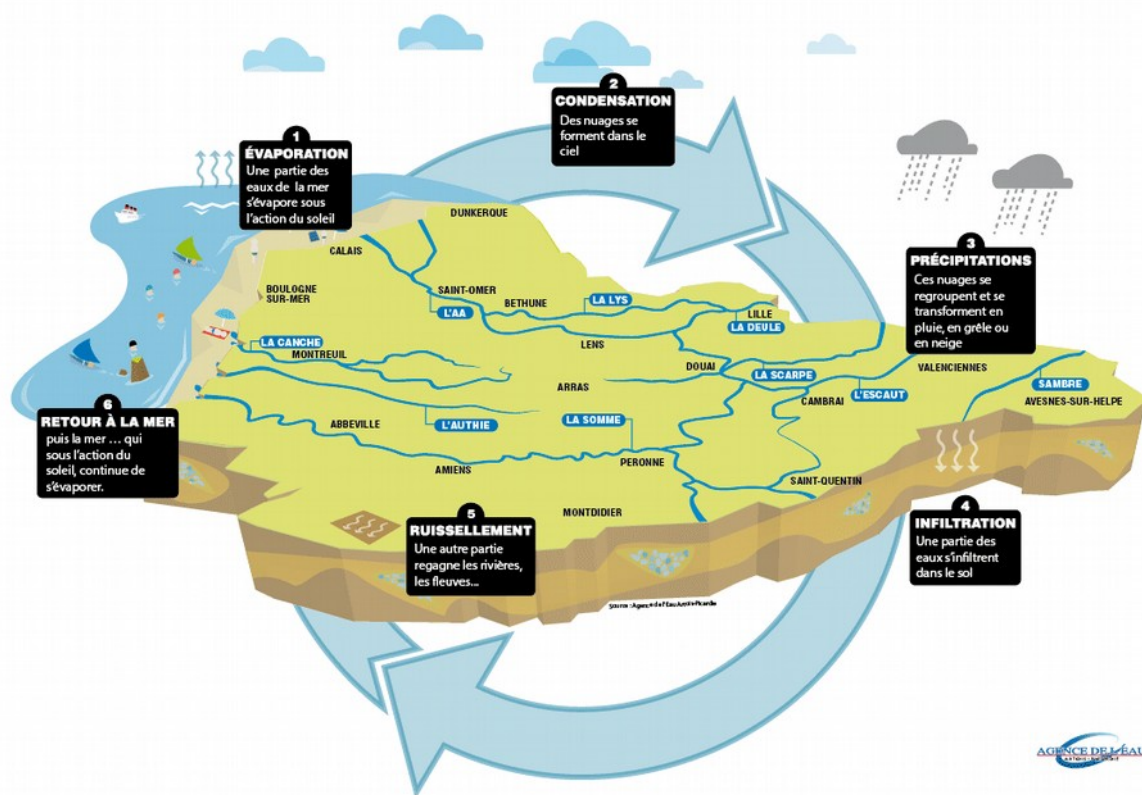


Figure 10 : Le grand cycle de l'eau (102)

1.2.3. Persistance dans l'environnement

Il y a peu d'informations sur la transformation ou la dégradation des ions perchlorate dans l'environnement. Il a néanmoins été établi que les ions perchlorate ne sont pas bioaccumulables (103).

De manière générale, le mécanisme principal de dégradation de composés chimiques dans l'atmosphère résulte de la réaction avec des oxydants en phase gazeuse. Or, les espèces oxydantes atmosphériques, qui sont essentiellement l'ozone et l'oxygène, sont de plus faibles oxydants que les ions perchlorate (44).

L'autre processus majeur de dégradation atmosphérique est la photolyse directe, mais cette réaction n'est pas significative pour les matériaux en phase solide comme les sels de perchlorate. En effet, en fonction de leur faible pression de vapeur et de leur constante d'Henry, les ions perchlorate ne peuvent ni se volatiliser, ni s'adsorber sur des particules en suspension (4) (44).

Il en est de même pour les milieux terrestre et aqueux. Les ions perchlorate sont inertes à la réduction, ils vont s'ioniser en solution aqueuse mais ne vont pas subir d'hydrolyse. Ainsi, ils sont très stables dans l'eau (souterraine ou de surface) et ils pourraient persister durant de nombreuses années dans des conditions normales (4).

Des expériences en laboratoire ont mis en évidence la dégradation des ions perchlorate par des micro-organismes, en conditions anaérobies, dans le sol et l'eau. Cependant, la présence de sulfate et de nitrate dans l'environnement atténue ce processus.

D'autres expériences ont démontré l'absorption des ions perchlorate par certaines plantes puis leur réduction en chlorures, mais le mécanisme d'absorption n'a pas encore été identifié (44).

Sans mécanisme de dégradation identifié on peut émettre l'hypothèse que les ions perchlorate sont persistants dans l'environnement.

2. Les ions perchlorate et les milieux aquatiques

La majeure partie des informations retrouvées sur la présence des ions perchlorate dans le milieu aquatique proviennent d'études réalisées aux Etats-Unis ou en Asie. De même que l'ion perchlorate d'ammonium est essentiellement cité dans ces études, on peut rappeler ici que les différents sels de perchlorate étant très solubles dans l'eau, seront complètement dissociés dans le milieu aquatique, et donc le sel contaminant n'a que peu d'importance sur le comportement des ions perchlorate dans l'environnement.

Des études ont néanmoins été réalisées en France grâce à la campagne nationale du Laboratoire d'Hydrologie de Nancy (LHN) de l'Anses et à l'enquête de la Fédération Professionnelle des Entreprises de l'Eau (FP2E) qui analysent la présence des ions perchlorate dans les EDCH et au niveau de sites potentiellement exposés à une contamination des eaux par les ions perchlorate.

2.1. Eaux de surface

Aux États-unis, des ions perchlorate ont été retrouvés dans un grand nombre d'eaux de surface à des concentrations comprises entre 8 et 3700 µg/L. La source de ces contaminations a été identifiée comme étant l'utilisation de missiles et fusées, se propulsants grâce à un combustible à base d'ions perchlorate, et à proximité de sites industriels produisant des munitions à base d'ions perchlorate (104).

Il a été retrouvé au Japon des doses d'ions perchlorate de 340 à 2300 µg/L dans la rivière Tone, au nord de l'agglomération de Tokyo, lors d'une étude réalisée en 2007 (105). Cette contamination provenait potentiellement d'un site industriel en amont. L'Inde a également mis en évidence la présence d'ions perchlorate dans les eaux de surface à proximité de sites industriels avec des concentrations mesurées pouvant atteindre les 344 µg/L (106).

Comme observé dans la 2ème partie, (1^{er} chapitre : les rejets, Sources de contamination d'origine anthropiques, 1.1.2.1. domaine industriel), ces mêmes rejets sont observés en France et on pourra observer la contamination d'eaux de surface dans tout le pays à proximité de sites industriels utilisant des ions perchlorate, ainsi qu'à proximité de territoires militaires. Les activités industrielles ont été répertoriées dans la base de données de l'Inventaire historique des sites industriels et activités de service (BASIAS) du 27/05/2013 recensant les zones industrielles utilisant ou ayant utilisé des ions perchlorate (tableau 15) (100). La base de données a recensé 16731 sites répertoriés en France métropolitaine.

Activités ciblées	Requêtes complémentaires basées sur le descriptif	Nombre de sites répertoriés	Commentaires
Fabrication et/ou dépôt de produits chloratés	La raison sociale ou le nom usuel contiennent le terme "chlorat"	48	
Fabrication et/ou dépôt de produits explosifs ou pyrotechniques	La raison sociale ou le nom usuel contiennent le terme "explosif" ou "pyrotech"	2849	Les dépôts d'explosifs chloratés ne sont pas comptabilisés ici mais plutôt dans la ligne précédente
Construction aéronautique et spatiale	La raison sociale ou le nom usuel contiennent le terme "aéronautique" ou "aérospatial"	224	Les aérodromes n'ont pas été considérés
Fabrication et/ou dépôt d'armes et de munitions	La raison sociale ou le nom usuel contiennent le terme "munition" ou "cartouche"	286	Les fabricants de cartouches pour l'imprimerie ont été enlevés
Fabrication de verre et d'articles en verre et atelier d'argenterie	La raison sociale ou le nom usuel contiennent le terme "verrerie"	1157	
Sites industriels avec traitement électrolytique	La raison sociale ou le nom usuel contiennent le terme "electroly"	2898	Limitation de la requête NAF aux sites ayant c25.61z pour unique activité
Apprêt et tannage des cuirs	La raison sociale ou le nom usuel contiennent le terme "tannage" ou "tannerie"	4847	
Fabrication de produits azotés et d'engrais	La raison sociale ou le nom usuel contiennent le terme "engrais"	2376	
Fabrication de pâte à papier, de papier et de carton	La raison sociale ou le nom usuel contiennent le terme "papeterie" ou "cartonnage"	1200	Les sites uniquement "imprimeries" ont été enlevés
Casses automobiles (problématique des airbags)	La raison sociale ou le nom usuel contiennent le terme "casse"	846	
	Total	16731	

Tableau 15 : Activités industrielles potentiellement émettrices d'ions perchlorate et leurs modalités d'identification par la base de données BASIAS du 27.05.2013 (107).

La répartition géographique de certaines activités est plus marquée dans certaines régions. Il apparaît notamment que les sites de construction aéronautique/spatiale et de fabrication/dépôt d'armes/de munitions sont majoritairement localisés au niveau de la partie sud-ouest de la France (Toulouse, Bordeaux) et à Paris en Ile-de-France (Figure 11). De même, les sites de fabrication/dépôt de produits explosifs/pyrotechniques sont majoritairement localisés en Ile-de-France, Lorraine, Midi-Pyrénées, Languedoc-Roussillon et Provence-Alpes-Côte-d'Azur (Figure 12) (107).

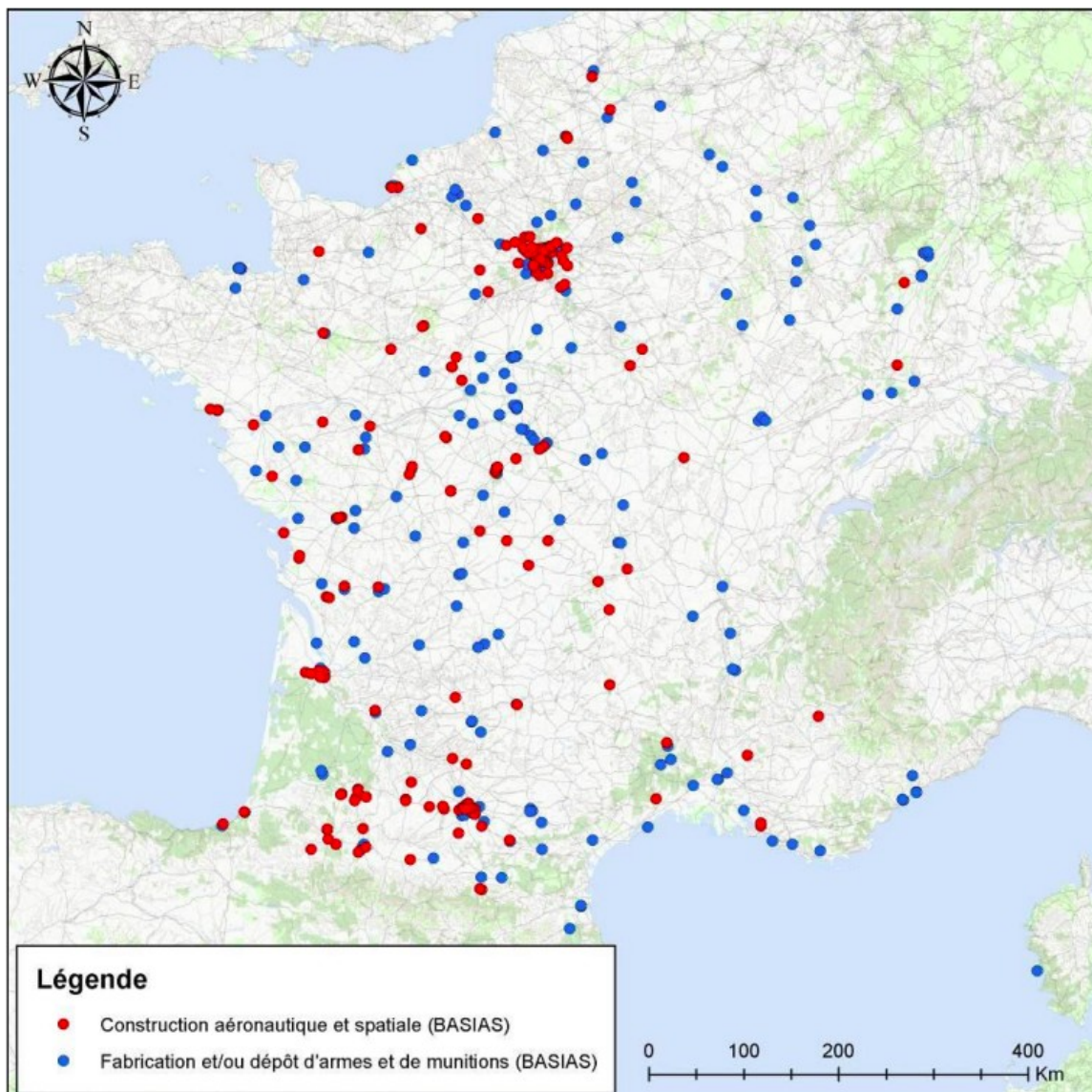


Figure 11 : Sites de construction aéronautique/spatiale et de fabrication/dépôt d'armes/de munitions d'après la base de données BASIAS (107).

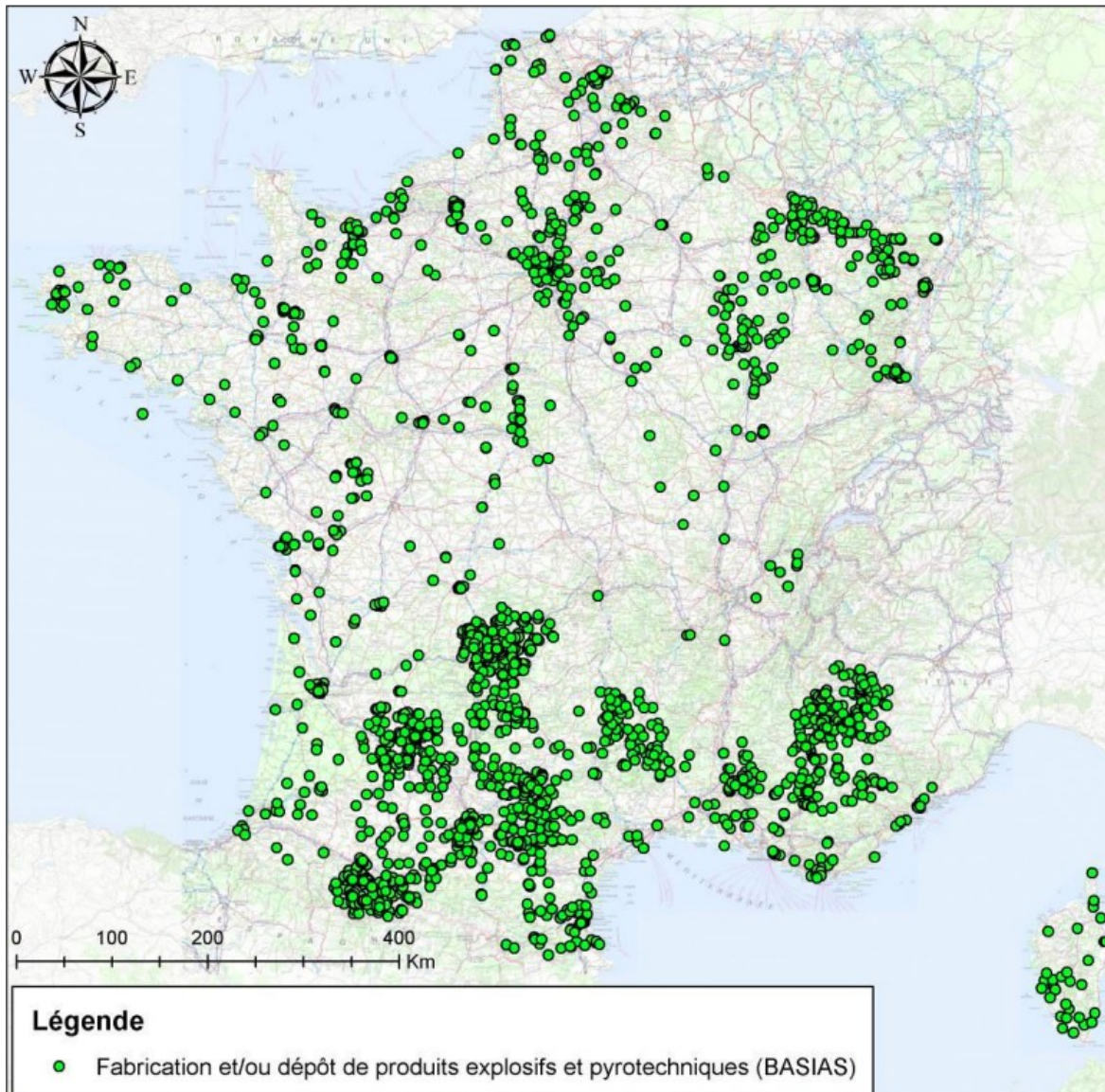


Figure 12 : Sites de fabrication/dépôt de produits explosifs/pyrotechniques d'après la base de données BASIAS (107).

2.2. Eaux souterraines

Parker et al. (2008) (108) ont mis en évidence la présence d'ions perchlorate dans des eaux souterraines aux Etats-unis. En effet, sur 326 échantillons, 45% d'entre eux présentaient des concentrations en ions perchlorate inférieures à 0,04 $\mu\text{g/L}$, 13 % entre 0,04 et 0,12 $\mu\text{g/L}$ et 42 % des concentrations supérieures à 0,12 $\mu\text{g/L}$. Les sources de contamination n'ont néanmoins pas été mises en évidence.

En Inde, de fortes concentrations ont été retrouvées dans des eaux souterraines, à proximité de sites industriels manipulant des ions perchlorate, avec par exemple des concentrations atteignant 7270 $\mu\text{g/L}$ à Aluva dans la région d'Ernakulam dans le sud du pays (106).

En France, le Laboratoire d'Hydrologie de Nancy (LHN) a organisé une campagne nationale en juin 2011 (instruction n°DGS/EA4/2011/229 du 14 juin 2011), ayant pour but préalable d'analyser les polluants émergents dans les eaux superficielles et souterraines. Cette campagne a ensuite ciblé l'analyse des ions

perchlorate, entre juin et octobre 2012, et a été réalisée conjointement avec la Fédération Professionnelle des Entreprises de l'Eau (FP2E) sur 55 sites dans 34 départements. Elle a permis l'établissement de 703 résultats provenant de 436 communes françaises. Il en est ressorti que les concentrations observées dans les

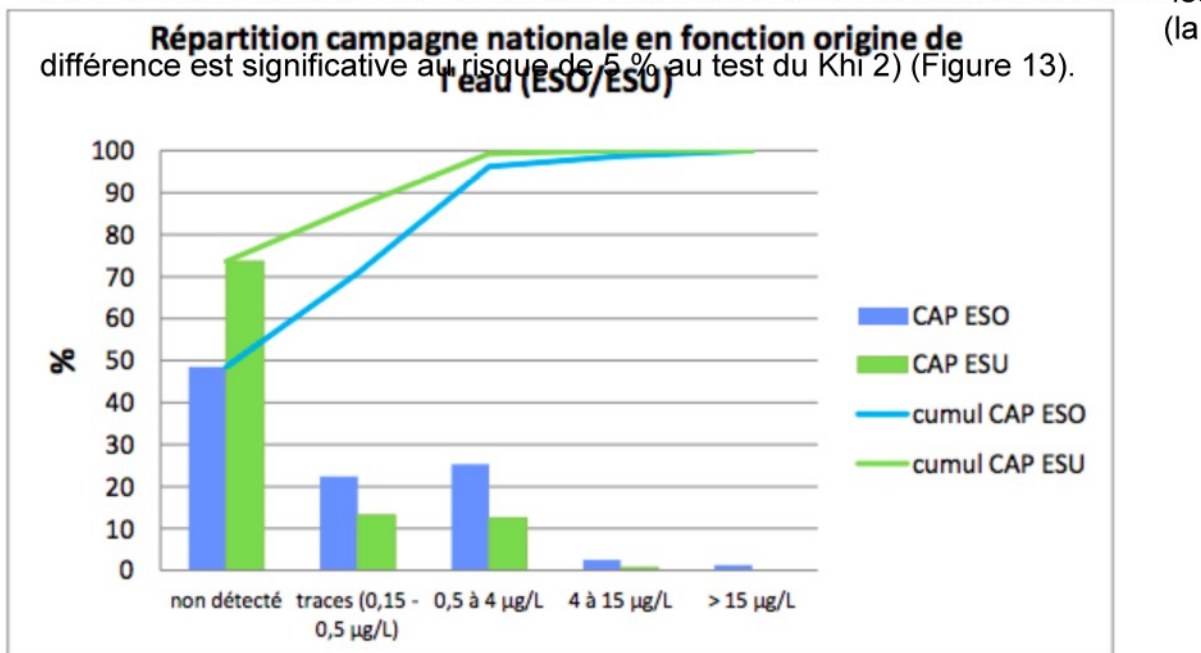


Figure 13. Concentrations en ions perchlorate selon le site de prélèvement : eau souterraine provenant de captage en eau souterraine (CAP ESO), eau de captage superficiel (ESU) et les courbes de CUMUL CAP ESO/ESU qui permettent d'observer que le cumul des pourcentages est bien de 100 % soit l'ensemble des résultats (51)

2.3. EDCH/Eau brute

Les ions perchlorate ont été mis en évidence aux Etats-unis dans les eaux du réseau de distribution. Entre 2001 et 2005 l'analyse de 3865 installations d'eaux potables, a mis en évidence des concentrations moyennes de 9,38 µg/L d'ions perchlorate, la valeur maximale observée étant de 420 µg/L. Brandhuber P. et al. (2005) (109) ont regroupé l'ensemble des données disponibles aux Etats-Unis pour les EDCH. Sur 29870 échantillons analysés, 1,9 % présentait des teneurs supérieures à 4 µg/L.

L'étude de Quiñones et al. (2007) en Corée du sud (110) a permis de mesurer des concentrations en ions perchlorate dans les EDCH de l'ordre de 0,15 à 35 µg/L, avec une valeur moyenne sur l'ensemble des prélèvements égale à 10 µg/L.

En Inde, une moyenne de 0,1 µg/L a été retrouvée dans l'eau du robinet par Kannan et al. (2009) (111).

En France, l'analyse des eaux des EDCH a été réalisée grâce aux deux campagnes françaises, présentées dans le paragraphe précédent. Les dosages ont été réalisés avec une LoD de 0,15 µg/L et une limite de quantification (LQ) de 0,5 µg/L. 384 prélèvements proviennent de captages (CAP), 299 proviennent de sortie d'installation de traitement (TTP) et 20 d'unités de distribution (UDI). Au niveau du type d'eau, 237 sont souterraines (ESO), 144 sont de surface (ESU), 1 est mixte (EMI) et 2 proviennent de la mer (MER).

Ces travaux ont sélectionné les lieux de prélèvement selon différents critères :

- Sélection du captage apportant majoritairement le plus de débit dans chaque département de la région (sélections établies grâce à la base de données SISE-Eaux,
- Sélection de captages de manière aléatoire dans chaque département,
- Sélection d'un site par l'ARS de chaque région en fonction de la vulnérabilité du site vis-à-vis des ions perchlorate (zone de bombardement, site militaire, activité minière, activités industrielles, activités agricoles intensives et autres contextes).

Les résultats des campagnes mettent en évidence que :

- Les trois quarts des échantillons analysés présentent des concentrations inférieures en ions perchlorate à 0,5 µg/L.
- 2 % des échantillons présentent une concentration supérieure à 4 µg/L,
- Aucun échantillon d'eau traitée n'observe de concentration en ions perchlorate supérieure à 15 µg/L (figure 14).

Néanmoins, l'étude met en évidence la présence d'ions perchlorate entre 0,5 et 4 µg/L en sortie d'installation de traitement de l'eau destinée au réseau de distribution, mais également d'un prélèvement de 13 µg/L. Elle relève également une concentration de 22 µg/L dans les eaux de captage.

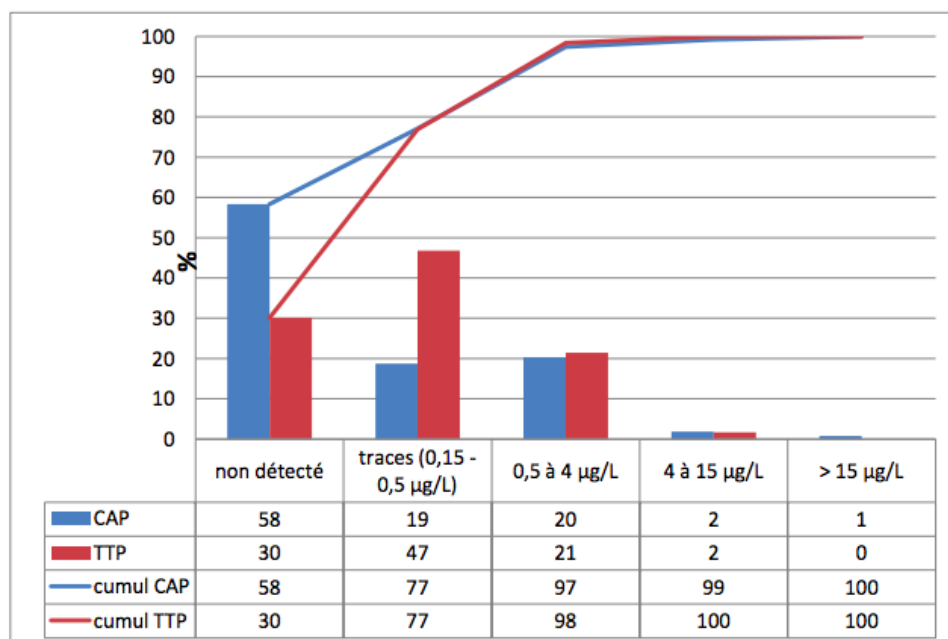


Figure 14 : Concentrations en ions perchlorate selon le site de prélèvement : de captage (CAP) ou d'eau en sortie d'installation de traitement (TTP) selon campagne du LHN (51)

La campagne FP2E apporte le même type de résultats, avec la présence d'ions perchlorate sur les sites de captage d'eau brute ou en sortie d'installation de traitement (figure 15). Parmi ces résultats, il ressort de cette campagne que 6 % des prélèvements ont des concentrations supérieures à 4 µg/L d'ions perchlorate, mais qu'aucune eau traitée ou de captage ne présente de concentration supérieure à 15 µg/L. Les concentrations maximales observées lors de cette campagne sont inférieures à la campagne précédente avec 7,3 µg/L dans un échantillon d'eau brute et 4,1 µg/L dans les échantillons d'eau en sortie d'installation de traitement.

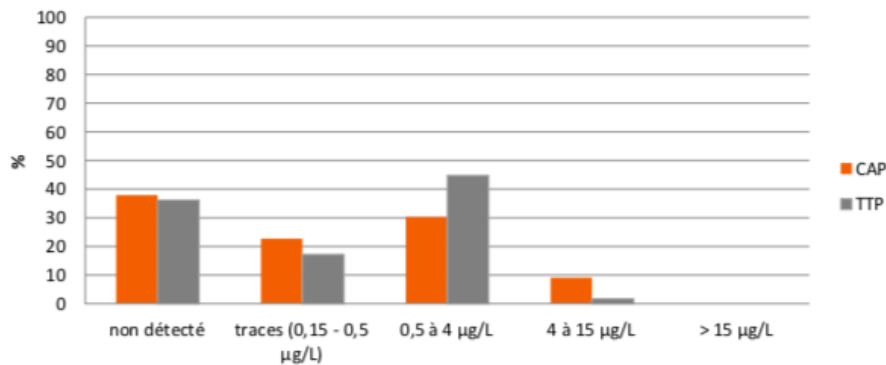


Figure 15: Concentrations en ions perchlorate selon le site de prélèvement : captage (CAP) ou eau en sorties d'installation de traitement (TTP) selon la campagne FP2E (51)

De plus, il apparaît dans les résultats que les eaux traitées présentent plus fréquemment des traces de perchlorate que les captages. Cette différence est significative au risque de 5 % au test khi-deux. Cela met en évidence le fait que les traitements appliqués, notamment la chloration peuvent apporter des traces (entre 0,15 et 0,5µg/L) d'ions perchlorate comme le met en évidence le Strategic Environmental Research and Development Program (SERDP) en 2005 (112).

3. Conclusion de la deuxième partie

Cette seconde partie permet de mettre en évidence la répartition générale des ions perchlorate dans le milieu aqueux, que ce soit en surface, sous terre, ou dans les EDCH. L'ion perchlorate est donc un élément potentiellement indésirable pour la santé comme l'expose la première partie, qui se retrouve dans les captages destinés à alimenter les réseaux de distribution d'eau potable, et qui n'est pas éliminé avec le temps au vu de sa persistance.

Troisième partie : Les ions perchlorate dans les eaux destinées à la consommation humaine et leur mise en évidence.

1. La persistance des ions perchlorate : de l'eau brute à l'eau destinée à la consommation humaine

1.1. Le cycle de l'eau urbain ou petit cycle de l'eau

Le cycle urbain de l'eau s'organise en 5 étapes (figure 16) :

- Le pompage, principalement au niveau de nappes phréatiques ou au niveau des étendues d'eau (fleuves, rivières, lacs). L'eau pompée est qualifiée d'eau brute,
- Le traitement de l'eau brute qui devient alors de l'eau destinée à la consommation humaine (EDCH),
- Le stockage de l'EDCH dans des réservoirs ou châteaux d'eau,
- La distribution de l'EDCH aux habitations, industries, zones agricoles, etc,
- La collecte de l'EDCH après usage (eaux résiduaires ou eaux usées),
- Le traitement d'épuration des eaux usées dans une station épuration, (assainissement collectif) ou traitement via un système d'assainissement individuel,
- Le rejet de l'eau épurée dans le milieu naturel.

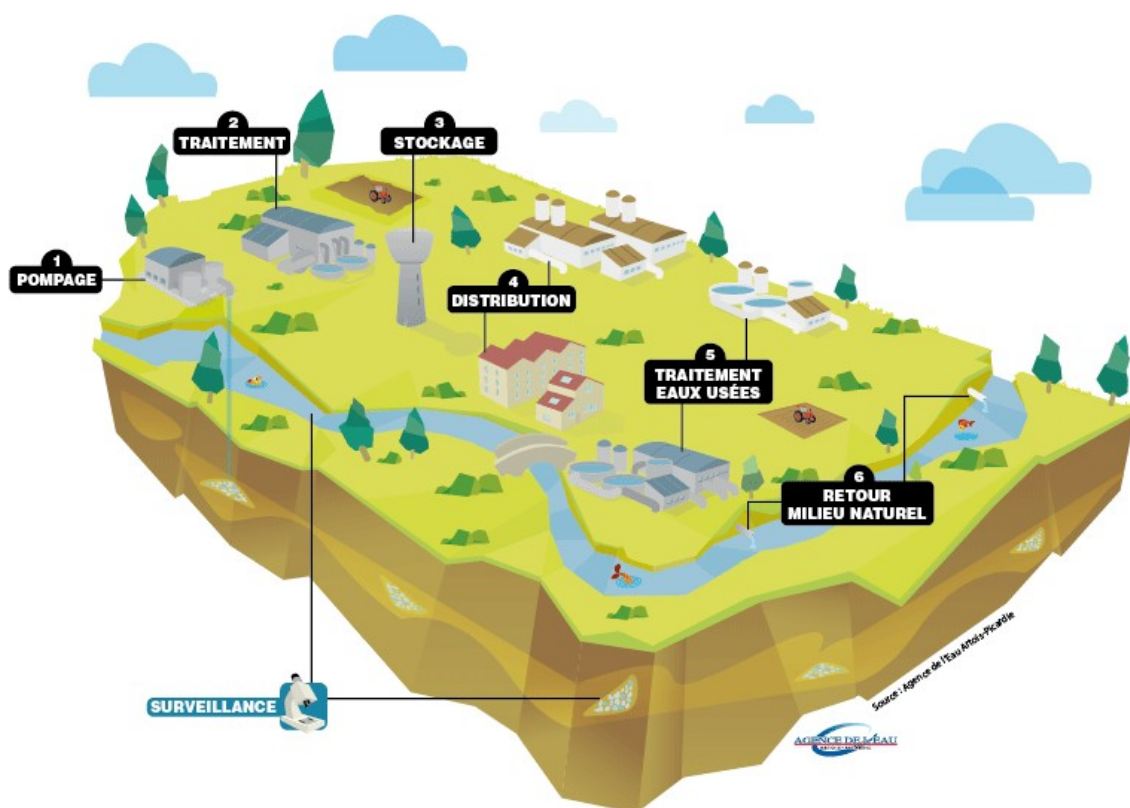


Figure 16 : Le petit cycle de l'eau (113)

1.2. L'efficacité des traitements de potabilisation et des traitements d'épuration pour éliminer les ions perchlorate

Compte tenu de ce petit cycle de l'eau, il est intéressant d'étudier l'efficacité des traitements de potabilisation puis d'épuration quant à l'élimination des ions perchlorate.

1.2.1. Le captage de l'eau et les traitements de potabilisation

Il n'existe pas de chaîne type de traitement de potabilisation. En fonction de la qualité de l'eau brute, différents procédés pourront être associés en vue d'éliminer ou réduire les concentrations en composés non souhaités.

1.2.1.1. Les pré-traitements

Les pré-traitements correspondent à l'emploi de différents procédés (114) :

- physiques : réservés aux eaux de surface. Ce sont le dégrillage et le tamisage, qui sont utilisés pour retenir les déchets. La grille retiendra les gros déchets quand le tamis retiendra les plus petites.
- chimiques : avec la pré-oxydation. Elle utilise le chlore (ou l'hypochlorite de sodium), le dioxyde de chlore, l'ozone ou le permanganate de potassium, afin d'éliminer le fer et le manganèse, que l'on retrouve régulièrement dans les eaux souterraines. Ce procédé permet également d'éliminer la couleur et les algues.

1.2.1.2. La clarification

La clarification est une étape déterminante afin d'obtenir une eau limpide en supprimant la turbidité, c'est-à-dire les particules en suspension. Différents procédés peuvent être additionnés pour plus d'efficacité.

Le moyen le plus simple est la décantation, durant laquelle les particules, sous l'effet de la gravité, se déposent au fond des bassins. L'eau peut aussi être clarifiée par filtration à travers un lit de sable.

Néanmoins, pour éliminer la matière colloïdale constituée des particules les plus fines, l'étape de décantation peut être couplée aux procédés physico-chimiques de coagulation-floculation.

Dans ce cas, l'ajout de sels de fer ou d'aluminium en tant que coagulant et/ou l'usage de floculants (polymères de synthèse de type polyacrylamide ou polyamine par exemple) permettent de réduire les forces électrostatiques de répulsion entre les particules colloïdales facilitant ainsi leur agglomération entre elles, sous forme d'amas plus volumineux appelé « floc ». L'eau subira ensuite soit une décantation soit une filtration sur sable.

La filtration sur membrane de porosité comprise entre 0,03 et 0,01 μm permet également de clarifier de l'eau, mais cette dernière technique est plus onéreuse que les précédentes.

1.2.1.3. L'affinage

L'affinage consiste en des procédés d'ozonation, de filtration sur charbon actif et de filtration membranaire (ultrafiltration ou nanofiltration). Il va s'y dérouler l'oxydation et la biodégradation de certains micro-polluants ou de matière organique restante. Cette étape améliore également les qualités organoleptiques de l'eau. L'ozone va permettre l'élimination de virus ou de spores bactériennes, de pesticides ou de composés aromatiques. Le charbon actif permet d'adsorber et de dégrader les matières organiques ou les pesticides. Finalement il y aura un passage sur des membranes, couplées ou non à du charbon actif, pour retenir de nombreuses molécules indésirables ou pesticides.

1.2.1.4. L'oxydation et la désinfection

L'oxydation et la désinfection sont des étapes indispensables, car elles permettent l'élimination des virus et des bactéries pathogènes.

Ces étapes consistent en l'utilisation de procédés physiques, avec des membranes ou des irradiations aux rayons UV, ou d'oxydations chimiques, avec du chlore ou de l'ozone.

Les oxydants permettent d'assurer la désinfection des eaux, mais peuvent également permettre de contrôler le développement de divers organismes, comme les algues. Ils peuvent aussi oxyder des composés responsables de goût et d'odeur, oxyder le fer et le manganèse, éliminer l'ammoniaque, la couleur, améliorer la coagulation. De plus, l'ozone peut transformer certains composés organiques comme les pesticides (glyphosate, aldicarbe, pentachlorophénol...), les phénols, les détergents, les toxines algales... Le degré de conversion de ces derniers varie selon leur structure chimique et les conditions du milieu.

La méthode la plus utilisée est la chloration, pour sa simplicité, sa rémanence et son faible coût de revient. Elle a cependant pour principal inconvénient de donner un goût à l'eau, mais surtout de générer la formation de sous-produits de chloration, les Trihalométhanes.

Suite à ces traitements, l'injection de réactifs chlorés est nécessaire afin d'avoir un niveau résiduel de désinfectant dans l'eau distribuée.

Au vu des traitements, il est nécessaire de s'interroger sur leur efficacité pour les contaminants chimiques autres que les pesticides.

Dans une étude, Srinivasan et al. (2009) ont évalué l'efficacité des traitements de potabilisation et en amont du rejet dans la nature, appliqués dans les stations dédiées. L'étude apporte le constat qu'il n'existe pas en France de traitement réellement efficace pour éliminer les ions perchlorate de l'EDCH. Ils ont mis en évidence la faible affinité des charbons actifs utilisés envers les ions perchlorate, mais aussi le fait que les résines échangeuses d'ions utilisées ne sont pas spécifiques des ions perchlorate (115). L'efficacité des différents procédés de traitement sera abordée de façon détaillée dans la quatrième partie de la thèse.

Ces constats sont confirmés par les résultats des campagnes FP2E et du LHN (présentées dans la 2ème partie : 2.3 EDCH/Eau brute). Elles mettent en évidence la présence d'ions perchlorate entre 0,5 et 4 µg/L en sortie d'installation de traitement de l'eau destinée au réseau de distribution

Actuellement, en absence de traitement de potabilisation réellement efficace pour éliminer les ions perchlorate, la solution adoptée aujourd'hui est, outre le recours à un autre forage, la méthode de la dilution via l'interconnexion des réseaux

(116) (117). De cette manière, la société de distribution va mélanger l'eau de différents sites de prélèvements, contaminée et non-contaminée, afin de diluer les concentrations en ions perchlorate.

1.2.2. Les traitements des eaux usées en station d'épuration

Le traitement des eaux après consommation/utilisation est nécessaire afin d'éviter de rejeter de nombreux polluants dans le milieu naturel et de préserver la qualité des ressources en eau. Ces traitements sont assurés en station d'épuration (118).

1.2.2.1. Le pré-traitement et le traitement primaire

Les eaux usées vont tout d'abord subir un « dégrillage » grâce à un tamis à grande ouverture, afin de bloquer les matières de taille importante. Un réel tamisage peut ensuite avoir lieu, mais il n'est pas systématique. Les eaux usées vont ensuite subir un dessablage et un déshuilage : elles vont être dirigées vers un premier bassin appelé « déssableur » où les matières « lourdes » vont décanter, et ensuite dans un second bassin où les graisses amenées à la surface grâce à des pompes aératrices vont être récupérées.

1.2.2.2. Le traitement secondaire

Le traitement secondaire correspond au traitement biologique de l'eau. Les eaux usées arrivent dans un bassin où sont mises en culture des bactéries ayant pour but d'aboutir à la formation de boues et l'intervention de phénomènes de biodégradation. Ce procédé peut être aérobie ou anaérobie. En France, le procédé aérobie est le plus utilisé.

L'étape suivante est la clarification qui consiste en la décantation des boues et résidus obtenus à l'issue du traitement biologique, dans des bassins nommés clarificateurs.

L'eau ainsi débarrassée de la majeure partie de sa charge polluante, sera séparée des boues. Elle subira des analyses et contrôles avant d'être libérée dans le milieu naturel.

1.2.2.3. Le traitement des boues

Les boues récupérées sont généralement riches en minéraux et vont la plupart du temps être utilisées comme engrais pour l'agriculture. Elles seront sinon séchées et mises en décharge ou incinérées. Cette dernière solution est la plus coûteuse.

Les traitements de post-utilisation, en station d'épuration, ne sont donc pas plus efficaces pour éliminer les ions perchlorate. Il sera ainsi rejeté dans les cours d'eau locaux des ions perchlorate sous forme inchangée, le problème ne peut ainsi pas se résoudre avec le temps et les traitements réalisés lors du cycle d'utilisation de l'eau.

2. La gestion et les normes de qualité des EDCH en vigueur en France

2.1. Les différents types d'eau

L'eau est en France l'aliment le plus contrôlé. Elle fait l'objet d'un suivi permanent destiné à en garantir la sécurité sanitaire, depuis le captage dans le milieu naturel, jusqu'au robinet du consommateur. Il existe en France une sélection des eaux brutes, qu'elles soient d'origine souterraine ou de surface : généralement 62-63 % proviennent du captage d'une source ou du forage d'une nappe profonde, le reste (37-38 %) est pompé dans les étendues d'eaux de surface superficielles (fleuve, rivière, lac) (119).

L'ARS contrôle la qualité sanitaire de toutes les eaux de consommation. Ces dernières regroupent les EDCH et les eaux minérales naturelles.

Selon le code de la santé publique, les eaux destinées à la consommation humaine correspondent aux eaux utilisées dans les entreprises alimentaires pour la fabrication, la transformation, la conservation ou la commercialisation de produits destinés à la consommation humaine ; mais aussi toutes les eaux destinées à la boisson, à la cuisson, à la préparation d'aliments ou à d'autres usages domestiques. Elles peuvent être fournies par un réseau de distribution, à partir d'une citerne, d'un camion-citerne ou d'un bateau-citerne, en bouteilles ou en conteneurs, y compris les eaux de source (ES).

Outre les eaux de sources, les eaux embouteillées (aussi nommées conditionnées) comprennent les eaux minérales naturelles (EMN) et les eaux rendues potables par traitement (ERPT).

Chaque catégorie va différer selon l'origine de l'eau, les traitements applicables, les critères de qualité microbiologiques et physico-chimiques (tableau 16).

	EMN	ES	ERPT	EAU DU ROBINET
Critères microbiologiques	Absence de micro-organismes ou parasites qui constitueraient un danger pour la santé			
	Communs à toutes les eaux conditionnées (+de paramètres et + stricts que pour eau du robinet)			E.Coli Entérocoques
Critères physico-chimiques	Spécifiques	Critères quasi-équivalents (≠bromates, nitrates)		
	16 constituants naturels Indicateurs de pollution			
	Eau pour alimentation du nourrisson : critères spécifiques			
Origine	souterraine	Souterraine	Souterraine ou surface	Souterraine ou surface
Désignation commerciale	1 seule source	Plusieurs sources possibles Ex : Cristaline	—	—
Traitement	Non autorisés (sauf élimination de composés indésirables naturels et ajout ou élimination de CO2)		Traitement de potabilisation : physique, physico-chimique, chimique, biologique, désinfectant...	
Composition	Obligatoirement stable dans le temps	Connue faible variabilité	Pas stable	

Tableau 16 : Les différentes eaux, tableau provenant de cours magistraux de Mme B. Grave

Il est à noter que les eaux de pluie sont exclues des EDCH. Par leur définition « eau de pluie collectée en aval de toiture, après ruissellement sur le toit avec ou sans stockage en cuve », ce sont des eaux potentiellement contaminées, tant sur le plan microbiologique que chimique (pesticides, métaux/amiante des toits). Pour ces raisons, les usages autorisés de l'eau de pluie sont restreints et toute connexion entre le réseau d'eau de pluie et le réseau d'eau potable est interdite en France.

2.2. Les exigences de qualité

En application du code de la santé publique (article R1321-2 et R1321-3) **(120)** relatif à la sécurité sanitaire des eaux destinées à la consommation humaine, les eaux doivent :

- ne pas contenir un nombre ou une concentration de micro-organismes, de parasites ou de toutes autres substances constituant un danger potentiel pour la santé des personnes,
- être conformes aux limites de qualité, portant sur des paramètres microbiologiques et chimiques, définies par arrêté du ministre chargé de la santé,
- satisfaire à des références de qualité, portant sur des paramètres microbiologiques, chimiques et radiologiques, établies à des fins de suivi des installations de production, de distribution, de conditionnement d'eau et d'évaluation des risques pour la santé des personnes, fixées par arrêté du ministre chargé de la santé.

Les limites et les références de qualité reposent sur les valeurs guides publiées par l’OMS. Elles concernent de nombreux paramètres, que leur origine soit naturelle, en lien avec une pollution anthropique, des sous-produits d’usines de traitement ou liée aux installations (comme la vétusté des canalisations par exemple).

Les limites de qualités sont fixées pour des facteurs induisant des risques immédiats, à court et moins court terme pour la santé des consommateurs. Ces limites concernent des paramètres aussi bien microbiologiques, comme les entérocoques, que chimiques, comme les nitrates, métaux, pesticides. Il en existe une trentaine (tableau 17). Elles assurent un niveau de protection important de la population. Un dépassement de l’une d’entre elles impose la réaction de la personne publique ou privée responsable de la distribution d’eau (PPPRDE) qui doit prendre des mesures correctives et/ou des restrictions d’usage ou de consommation de l’eau selon les différents cas de figure.

PARAMÈTRES MICROBIOLOGIQUES	LIMITES DE QUALITÉ	UNITÉS
Escherichia coli (E. coli)	0	/100 mL
Entérocoques	0	/100 mL
PARAMÈTRES CHIMIQUES	LIMITES DE QUALITÉ	UNITÉS
Acrylamide	0,10	µg/L
Antimoine	5,0	µg/L
Arsenic	10	µg/L
Benzène	1,0	µg/L
Benzo[a]pyrène	0,010	µg/L
Bore	1,0	mg/L
Bromates	10	µg/L
Cadmium	5,0	µg/L
Chlorure	0,50	µg/L
Chrome	50	µg/L
Cuivre	2,0	mg/L
Cyanures totaux	50	µg/L
1,2-dichloroéthane	3,0	µg/L
Epichlorhydrine	0,10	µg/L
Fluorures	1,50	mg/L
Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	0,10	µg/L
Mercure	1,0	µg/L
Total microcystines	1,0	µg/L
Nickel	20	µg/L
Nitrates (NO ₃ ⁻).	50	mg/L

Nitrites (NO ₂ ⁻).	0,50	mg/L
Pesticides (par substance individuelle).	0,10	µg/L
Aldrine, dieldrine, heptachlore, Heptachlorépoxyde (par substance individuelle)	0,03	µg/L
Total pesticides	0,50	µg/L
Plomb	10	µg/L
Sélénium	10	µg/L
Tétrachloroéthylène et trichloro-éthylène	10	µg/L
Total trihalométhanes (THM).	100	µg/L
Turbidité	1,0	NFU

Tableau 17 : Les limites de qualité des EDCH, définies selon l'arrêté du 7 janvier 2007, modifié par l'arrêté du 4 août 2017 (121) (122)

Les références de qualité sont, quant à elles, établies en rapport à des indicateurs de qualité étroitement liés au bon fonctionnement des installations de production et de distribution de l'eau (tableau 18). Ils intègrent le principe de confort-acceptabilité : la couleur, la saveur ou encore l'odeur de l'eau distribuée seront perçues différemment par les consommateurs, et il faut que ces critères conviennent au plus grand nombre. Par exemple, une eau ferrugineuse n'est pas toxique, mais elle présentera cependant une couleur anormalement jaunâtre et aura un goût particulier, ce qui entraînera un rejet de la part du consommateur. Lorsque les résultats s'éloignent des références de qualité, des enquêtes vont être mises en place par les PPRDE.

PARAMÈTRES MICROBIOLOGIQUES	RÉFÉRENCES DE QUALITÉ	UNITÉS
Bactéries coliformes	0	/100 mL
Bactéries sulfitoréductrices y compris les spores	0	/100 mL
PARAMÈTRES CHIMIQUES ET ORGANOLEPTIQUES	RÉFÉRENCES DE QUALITÉ	UNITÉS
Aluminium total	200	µg/L
Ammonium (NH ₄ ⁺).	0,10	mg/L
Baryum	0,70	mg/L
Carbone organique total (COT).	2,0	mg/L
	et	
	aucun changement anormal	
Oxydabilité au permanganate de potassium mesurée après 10 minutes en milieu acide	5,0	mg/L O ₂
Chlore libre et total		

Chlorites	0,20	mg/L
Chlorures	250	mg/L
Conductivité	≥ 180 et ≤ 1 000 Ou ≥ 200 et ≤ 1 100	μS/cm à 20 °C μS/cm à 25 °C
Couleur	Acceptable pour les consommateurs et aucun changement anormal notamment une couleur inférieure ou égale à 15	
Cuivre	1,0	mg/L
Equilibre calcocarbonique	Les eaux doivent être à l'équilibre calcocarbonique ou légèrement incrustantes	
Fer total	200	μg/L
Manganèse	50	μg/L
Odeur	Acceptable pour les consommateurs et aucun changement anormal, notamment pas d'odeur détectée pour un taux de dilution de 3 à 25°C	
pH (concentration en ions hydrogène)	≥ 6,5 et ≤ 9	Unités pH
Saveur	Acceptable pour les consommateurs et aucun changement anormal, notamment pas de saveur détectée pour un taux de dilution	
Sodium	200	mg/L
Sulfates	250	mg/L
Température	25	°C
Turbidité	0,5 (mise en distribution)	NFU
	2 (au robinet)	NFU
PARAMÈTRES INDICATEURS DE RADIOACTIVITE	RÉFÉRENCES DE QUALITÉ	UNITÉS
Activité alpha globale	En cas de valeur supérieure à 0,10 Bq/L, il est procédé à l'analyse des radionucléides spécifiques définis dans l'arrêté mentionné à l'article R. 1321-20.	

Activité bêta globale résiduelle	En cas de valeur supérieure à 1,0 Bq/L, il est procédé à l'analyse des radionucléides spécifiques définis dans l'arrêté mentionné à l'article R. 1321-20.	
Dose indicative (DI)	0,10	mSv/an
Radon	100	Bq/L
Tritium	100	Bq/L

Tableau 18 : Les références de qualité des EDCH, définies selon l'arrêté du 7 janvier 2007, modifié par l'arrêté du 4 août 2017 (121) (122)

Les ions perchlorate ne sont cités ni dans les limites de qualité, ni dans les références de qualité. Cependant, la législation Française permet aux autorités sanitaires (préfet sur avis de l'ARS) d'imposer le suivi de paramètres complémentaires non réglementés et qui pourraient engendrer un risque pour la santé du consommateur. C'est le cas pour les ions perchlorate, qui ont présenté des concentrations, dans de nombreux captages de la région Hauts-de-France, supérieures à 4 µg/L et 15 µg/L, VTR proposées par l'ANSES.

2.3. Le suivi sanitaire

Le suivi sanitaire de l'EDCH s'opère à deux niveaux : une auto-surveillance du producteur/distributeur (exploitant) d'eau et un contrôle sanitaire de l'état au titre de la sécurité sanitaire des populations, confié à l'ARS. Ces missions sont réalisées en application de l'arrêté du 11 janvier 2007, modifié le 4 août 2017 (121), en application du CSP et de la directive européenne 98/83/CE (120), qui établissent les paramètres microbiologiques, physico-chimiques et radiologiques afin de respecter les exigences de qualité réglementaires évitant tout risque pour la santé des consommateurs.

L'exploitant doit garantir et justifier du bon fonctionnement des usines de traitement, du réseau de distribution dont il s'occupe, mais également de la qualité de l'eau distribuée. En cas d'anomalie, il doit, en lien avec les autorités sanitaires, prendre les mesures correctives adaptées.

L'ARS a un rôle important au niveau du contrôle sanitaire des eaux distribuées, et son action est concomitante de celles des préfectures départementales et des exploitants de l'eau. Les principales actions de l'ARS mises en œuvre dans le suivi sanitaire sont :

- La gestion des autorisations de captage et des filières de traitement, de la mise en place des périmètres de protection,
- L'évaluation de l'auto-surveillance du producteur/distributeur d'eau,
- Le contrôle des infrastructures de captage, de production et de distribution de l'eau,
- La réalisation d'un contrôle analytique réglementaire de la ressource en eau, de l'eau traitée sur les sites de production et de l'eau distribuée. (et sa diffusion auprès des mairies, consommateurs),
- La gestion des anomalies éventuelles, en lien avec le distributeur d'eau et la collectivité,
- La préparation à la gestion de crises, avec le distributeur d'eau, les collectivités et les autorités préfectorales. Ces acteurs vont prendre les décisions relatives à la distribution de l'eau : autorisations, restrictions en cas de non-conformité des limites de qualité et suivi de leurs applications (123).

Pour agir, l'ARS va, en amont, vérifier la conformité des résultats fournis par des laboratoires agréés par le ministère de la santé, au niveau des installations de production et de distribution de l'eau. Suite à cela, l'ARS va établir des synthèses périodiques sur la qualité de l'eau à son échelle régionale.

2.4. Les modalités de contrôles et les différentes analyses

Les modalités de contrôle sont encadrées par l'arrêté du 11 janvier 2007, modifié le 21 janvier 2010 (121), en application du CSP et de la directive européenne 98/83/CE (120). Ces modalités précisent les lieux et la fréquence des prélèvements, les paramètres à analyser et les recherches complémentaires éventuelles. Les prélèvements sont réalisés au niveau des captages d'eau, en sortie des infrastructures de traitement et de production de l'eau, et au robinet des consommateurs. Le contrôle s'effectue sur une zone géographique appelée unité de distribution d'eau potable (UDI) : réseau ou partie d'un réseau de distribution, alimentée par une eau de qualité homogène, gérée par un même distributeur d'eau et appartenant à une seule structure administrative (124). Une adaptation du contrôle sanitaire peut être observée localement en termes de contenu et de fréquence selon les risques propres à chaque UDI (vétusté du réseau, manque de protection de la ressource, etc).

Les analyses sanitaires concernent la qualité bactériologique et la qualité physico-chimique de l'eau. Elles sont de deux types : les analyses de routine (type 1) et les analyses complémentaires (type 2), qui diffèrent selon le nombre de paramètres recherchés. Elles seront également différentes selon le lieu de prélèvement (figure 17), soit au niveau :

- de la ressource : analyse des eaux brutes, d'origine souterraines (RP : ressources profondes), ou superficielles (RS : ressource superficielle)
- du site de production (P), avec P1 (analyse de routine) et P2 (analyse complémentaire)
- de la distribution (D) : au robinet du consommateur, avec D1 (analyse de routine) et D2 (analyse complémentaire)

Le contenu des analyses type va différer selon qu'elles soient R, P et D (annexe 1).

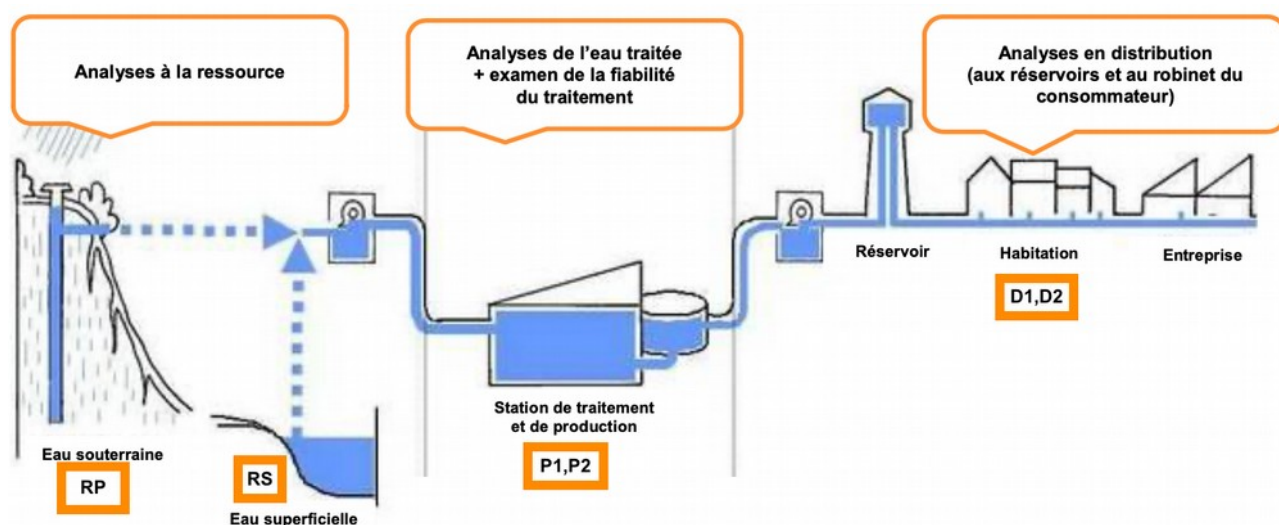


Figure 17 : Les différents niveaux de contrôle (123)

La fréquence des analyses va différer selon les débits journaliers et le nombre d'habitants desservis (tableau 19 et 20). Pour les ressources superficielles, en plus des analyses bactériologiques habituelles, il est recommandé une recherche annuelle de salmonelles, ainsi qu'une recherche de bactéries coliformes, une fois par an pour un débit inférieur à 6000 m³/jour, deux fois par an pour un débit compris entre 6000 m³/jour et 20 000 m³/jour et quatre fois par an pour un débit supérieur à 20 000 m³/jour.

DÉBIT (m ³ / jour)	FRÉQUENCE ANNUELLE		
	RP	RS	RSadd (**)
Inférieur à 10	0, 2 (*)	0, 5 (*)	
De 10 à 99	0, 2 (*)	1	
De 100 à 1 999	0, 5 (*)	2	4 (***)
De 2 000 à 5 999	1	3	8 (***)
De 6 000 à 19 999	2	6	12 (***)
Supérieur ou égal à 20 000	4	12	12

(*) 0, 2 et 0, 5 correspondent respectivement à une analyse tous les 5 ans et tous les 2 ans.
(**) Les analyses de type RSadd sont à réaliser sur une année civile et pour la première fois en 2010.
(***) Ces fréquences de prélèvements et d'analyses s'appliquent aux paramètres définis comme le cadmium, le mercure, le nickel, le plomb et les hydrocarbures aromatiques polycycliques, également contrôlés dans les analyses de type RS, ces fréquences se substituent à celles des analyses de type RS.

Tableau 19 : Fréquences des prélèvements d'échantillons d'eau et d'analyses d'eau à la ressource (121).

POPULATION DESSERVIE	DÉBIT (m ³ / jour)	FRÉQUENCE ANNUELLE			
		P1	P2 (*)	D1 (**)	D2 (***)
De 0 à 49 habitants	De 0 à 9	1	Entre 0, 1 et 0, 2	Entre 2 et 4	Entre 0, 1 et 0, 2
De 50 à 499 habitants	De 10 à 99	2	Entre 0, 2 et 0, 5	Entre 3 et 4	Entre 0, 2 et 0, 5
De 500 à 1 999 habitants	De 100 à 399	2	1	6	1
De 2 000 à 4 999 habitants	De 400 à 999	3	1	9	1
De 5 000 à 14 999 habitants	De 1 000 à 2 999	5	2	12	2
De 15 000 à 29 999 habitants	De 3 000 à 5 999	6	3	25	3
De 30 000 à 99 999 habitants	De 6 000 à 19 999	12	4	61	4
De 100 000 à 149 999 habitants	De 20 000 à 29 999	24	5	150	5
De 150 000 à 199 999 habitants	De 30 000 à 39 999	36	6	210	6
De 200 000 à 299 999 habitants	De 40 000 à 59 999	48	8	270	8
De 300 000 à 499 999 habitants	De 60 000 à 99 999	72	12	390	12
De 500 000 à 624 999 habitants	De 100 000 à 124 999	100	12	630	12
Supérieur ou égal à 625 000 habitants	Supérieur ou égal à 125 000	144	12 (****)	800 (*****)	12 (****)

(*) L'analyse de type P2 est à réaliser en complément d'une analyse de type P1.

(**) Pour les populations supérieures à 500 habitants, le nombre d'analyses à effectuer est obtenu par interpolation linéaire entre les chiffres fixés dans la colonne D1 (le chiffre étant arrondi à la valeur entière la plus proche). Le chiffre inscrit dans la colonne D1 correspond à la borne inférieure de chaque classe de débit.

(***) L'analyse de type D2 est à réaliser en complément d'une analyse de type D1.

(****) Pour cette catégorie, une analyse supplémentaire doit être réalisée par tranche supplémentaire de 25.000 m³ / j du volume total.

(*****) Pour cette catégorie, trois analyses supplémentaires doivent être réalisées par tranche supplémentaire de 1.000 m³ / j du volume total.

Tableau 20 : Fréquences annuelles des prélèvements d'échantillons d'eau et d'analyses d'eau aux points de mise en distribution et d'utilisation (121)

2.5. Paramètres microbiologiques et chimiques

Les paramètres chimiques et microbiologiques permettent tout d'abord de sélectionner les eaux dites brutes destinées à être pompées puis traitées pour la distribution dans les réseaux d'eau potable, puis de fixer les limites de qualités permettant le contrôle de la qualité des eaux distribuées. Afin de rester pertinent, tous les paramètres ne sont pas traités dans le détail dans cette thèse. Seuls sont présentés ceux qui sont les plus souvent identifiés comme inquiétants par le grand public (voir réponse au questionnaire partie 5). Les autres paramètres, moins connus, sont par exemple l'acrylamide, l'antimoine, les bromate (annexe 2).

2.5.1. La qualité microbiologique de l'eau

La qualité microbiologique fait référence aux bactéries, virus et parasites pouvant être détectés, via la mise en évidence de témoins de contamination, lors des contrôles sanitaires des eaux destinées à être distribuées. Les micro-organismes vont principalement être retrouvés dans les eaux superficielles et donc au niveau des captages. Leur présence témoigne d'une baisse de qualité de l'eau du site de captage, d'une baisse d'efficacité de l'usine de traitement de l'eau ou d'une faiblesse dans le système de stockage et d'acheminement de l'eau. À court terme ces facteurs peuvent représenter un risque pour le consommateur, même s'il reste en général faible, avec des symptômes principalement digestifs comme des diarrhées, des troubles gastro-intestinaux et des vomissements.

Le contrôle microbiologique repose sur la recherche de micro-organismes indicateurs spécifiques de pollution fécale : *Escherichia Coli* et des entérocoques (tableau 21). *E. Coli* est une bactérie appartenant aux bactéries coliformes, que l'on retrouve dans le sol ou la végétation, mais aussi dans le système digestif de mammifères. Sa présence dans les eaux ne peut provenir que quasiment uniquement des matières fécales des mammifères. Contrairement à *E. Coli*, les autres bactéries coliformes ne sont pas nécessairement à l'origine de maladies, mais leur détection sur un prélèvement témoigne d'une contamination par des agents biologiques plus pathogènes.

Au vu du risque sanitaire à court terme, la présence d'*E. Coli* ou d'entérocoques entraîne une interdiction de consommation de l'eau analysée, la limite fixée est de 0 UFC/100ml. En cas de non-conformité aucune dérogation ne peut être délivrée.

PARAMÈTRES	LIMITES DE QUALITÉ	UNITÉ
<i>Escherichia coli</i> (<i>E. coli</i>)	0	/100 mL
Entérocoques.....	0	/100 mL

Tableau 21 : Paramètres témoins de contamination fécale (125).

Cependant d'autres paramètres, non dangereux pour la santé, comme les germes anaérobies revivifiables à 22 et 37°C peuvent être analysés, ou encore la présence de bactérie coliformes et sulfitoréductrices. Leur suivi permet d'estimer l'efficacité de l'entretien du réseau de production et de distribution de l'eau, et de l'efficacité de la désinfection (tableau 22).

PARAMÈTRES	RÉFÉRENCES DE QUALITÉ	UNITÉ	NOTES
Bactéries coliformes.	0	/100 mL	
Bactéries sulfitoréductrices y compris les spores.	0	/100 mL	Ce paramètre doit être mesuré lorsque l'eau est d'origine superficielle ou influencée par une eau d'origine superficielle. En cas de non-respect de cette valeur, une enquête doit être menée sur la distribution d'eau pour s'assurer qu'il n'y a aucun danger potentiel pour la santé humaine résultant de la présence de micro-organismes pathogènes, par exemple <i>Cryptosporidium</i> .
Numération de germes aérobies revivifiables à 22 °C et à 37 °C.			Variation dans un rapport de 10 par rapport à la valeur habituelle.

Tableau 22 : Paramètres microbiologiques (125).

2.5.2. La qualité chimique de l'eau

Les paramètres chimiques recherchés dans le cadre du suivi de la qualité des EDCH peuvent être le reflet :

- de la composition naturelle des ressources en eau et donc des eaux brutes comme par exemple les nitrates, l'arsenic, etc,
- d'une contamination d'origine anthropique des ressources en eau et donc des eaux brutes tels les nitrates, pesticides,
- de la formation de sous-produits de désinfection durant le traitement de potabilisation, présence d'impuretés liés à l'usage des réactifs de traitement tels les Trihalométhane (THM, acides chloroacétique, etc),
- contamination de l'eau durant son stockage et sa distribution aux consommateurs tel le plomb.

Il peut être noté que certains composés peuvent avoir des origines multiples.

2.5.2.1. Les ions nitrate

Les nitrates (NO_3) sont des composés naturellement présents dans l'environnement, cependant leur concentration peut être augmentée, notamment dans les eaux par leur utilisation industrielle et agricole en tant qu'engrais. En effet, l'azote (N) est nécessaire à la croissance des végétaux.

Physiologiquement, les ions nitrate vont être métabolisés en nitrite, avec pour conséquence la perturbation des propriétés de l'hémoglobine, protéine dont la principale fonction est le transport de l'oxygène dans l'organisme. L'oxygène s'y fixe grâce à un ion fer, qui peut être sous deux formes :

- ferreuse (Fe^{2+}), son interaction avec l'oxygène est réversible, ce qui permet de le délivrer dans les tissus ;
- ferrique (Fe^{3+}), faisant suite à une oxydation, son interaction est irréversible avec l'oxygène, c'est la méthémoglobine (126).

Les ions nitrate entraînent donc une configuration anormale de l'hémoglobine, rendant inefficace le transport de l'oxygène. Les populations les plus sensibles à leur présence dans l'eau sont les enfants de moins de 6 mois et les femmes enceintes (127). La méthémoglobinémie se traduit par une cyanose, avec une saturation en oxygène diminuée entraînant malaises, gêne respiratoire, une couleur marron du sang et des troubles de la conscience (126).

L'arrêté du 11 janvier 2007, modifié le 4 août 2017 (121) a établi une limite de qualité de 50 mg/L, une restriction de consommation est établie pour les femmes

enceintes et les nourrissons lors d'un dépassement de limite de qualité compris entre 50 et 100 mg/L, et une restriction totale passé 100 mg/L.

2.5.2.2. Les pesticides (produits phytosanitaires et biocides)

Ce sont des substances chimiques anthropiques : herbicides, insecticides, fongicides. Ils sont destinés à supprimer des espèces nuisibles végétales ou animales de zones d'agriculture, d'industrie, dans les espaces publics et privés. Leur présence va être observée dans les EDCH suite à leur ruissellement dans les cours d'eau ou infiltration dans les nappes phréatiques où ils seront ensuite captés. Une pollution par des pesticides peut donc, avec le ruissellement, être diffuse.

Aucun pesticide n'est spécifique d'une espèce, et l'Homme sera également exposé. À court terme, généralement en milieu professionnel, ils entraînent des troubles liés aux mécanismes d'action direct des pesticides : perturbation de la signalisation nerveuse ou hormonale, de la respiration cellulaire, de la division cellulaire ou de la synthèse de protéines. Le profil toxicologique aigu des pesticides est connu, avec des effets respiratoires, des allergies, des effets dermatologiques, pouvant conduire à la mort (128).

Aux doses retrouvées dans les EDCH, les pesticides ne semblent pas entraîner d'effets particuliers sur la santé. Cependant, des maladies liées à des expositions chroniques et répétées ont été étudiées, notamment chez les populations dites sensibles (femmes enceintes, nourrissons, jeunes enfants), et surtout lors d'exposition in utero. Les pathologies généralement mises en évidence sont des troubles neurologiques (pathologies neurodégénératives type parkinson, troubles cognitifs et anxio-dépressifs), des atteintes de la spermatogenèse, des altérations du développement, ainsi que des cancers.

Les maladies neurologiques sont liées directement aux mécanismes d'action des pesticides : l'interférence dans la transmission du signal nerveux.

Les effets cancérigènes ont été mis en évidence chez des animaux. Ce sont majoritairement des cancers hormono-dépendants (129).

La limite de qualité fixée est de 0,1 µ/L par molécule et de 0,5 µg/L pour l'ensemble des substances détectées.

Il existe un grand nombre de pesticides autorisés et utilisés, de plus leur recherche représente un coût important. Les analyses dans les ECDH vont donc être ciblées, par l'ARS de la région, selon les activités agricoles locales, les pesticides vendus dans les commerces et les surfaces cultivées.

2.5.2.3. Le plomb

Le plomb est un métal utilisé dans de nombreux secteurs industriels, pour la soudure, les munitions, le gainage des câbles ou la fabrication d'accumulateurs d'acide.

Sa présence dans la nature et dans l'eau est liée à trois causes principales :
- la corrosion des canalisations de distribution d'eau en plomb (en France, le plomb est interdit à la pose dans les canalisations depuis 1995 et dans les soudures depuis 1998). Néanmoins, les cas de saturnisme d'origine hydrique sont devenus peu probables car ces canalisations ont été remplacées au niveau des réseaux de

distribution publics, mais peuvent encore subsister au niveau privé dans les anciennes habitations.

- l'utilisation, aujourd'hui stoppée, du plomb dans les peintures,
- une pollution d'origine industrielle.

La voie principale d'absorption du plomb est digestive. Si chez l'adulte 5 à 10 % de la dose ingérée est absorbée, on observe un passage systémique chez les nourrissons et jeunes enfants de 40 à 50 % (130). Son absorption est augmentée par le jeûne, la carence martiale, les régimes pauvres en calcium et par la vitamine D. Sa distribution se fait généralement dans le sang, les tissus mous et l'os (demi-vies respectives : 36 jours, 40 jours, 27 ans). La barrière placentaire laisse facilement passer le plomb, à la naissance la plombémie du nourrisson est donc proche de celle de la mère (130).

La toxicité du plomb est essentiellement chronique et se nomme le saturnisme. Elle a des effets aux niveaux de nombreux organes et tissus. Ils sont observés au niveau :

- neurologique, via plusieurs modes d'action : inhibant les canaux calciques, la Na^+/K^+ ATPase membranaire, diminuant la transmission neuro-excitatrice glutamatergique (en particulier au niveau des récepteurs NMDA), et altérant la différenciation des neurones du fait d'effets toxiques sur les cellules gliales. Ces effets se traduisent par des encéphalopathies (diminution de l'activité motrice, apathie, irritabilité, troubles du sommeil, stagnation du développement intellectuel), des neuropathies périphériques, et des effets sur le système nerveux autonome.

- abdominal, aussi nommé colique saturnine. C'est la manifestation la plus connue de l'intoxication par le plomb, cependant elle est aujourd'hui rarement observée, car elle implique une contamination importante (plombémie supérieure à 1000 $\mu\text{g/L}$) (130). Elle se traduit par des crises abdominales douloureuses, une constipation et des vomissements.

- rénaux, avec des néphropathies subaiguës (plombémie de 1500 $\mu\text{g/l}$) et tardives (plombémie de 600 $\mu\text{g/L}$),

- cardiovasculaire, avec une élévation modérée et transitoire de la pression artérielle,

- hépatique, avec une cytolysé hépatique (plombémie supérieure à 1500 $\mu\text{g/l}$), via l'inhibition la synthèse du cytochrome P450, causant des interactions médicamenteuses,

- métabolique : le plomb diminue la clairance rénale de l'acide urique, induisant des crises de goutte,

- hématologique : le plomb inhibe la synthèse de l'hème en interagissant avec la déshydratase de l'acide delta-aminolévulinique, qui catalyse la transformation de l'acide delta-aminolévulinique en porphobilinogène ; et la ferrochélatase contrôlant la dernière étape de la synthèse de l'hème. Ainsi, l'exposition au plomb se traduit par une anémie, aussi nommée anémie saturnine (également liée à une hyperhémolyse par déplétion érythrocytaire en glutathion et à une toxicité membranaire, une inhibition de la synthèse de la globine, du transport du fer et de la production d'érythropoïétine) (130) (131).

Synthétiquement, chez les jeunes enfants, l'ingestion régulière de plomb se traduit par un retard intellectuel, des difficultés d'apprentissage, des troubles psychomoteurs, accompagnés d'agitation, d'irritabilité, de troubles du sommeil et

d'un ralentissement de la croissance. Il peut également être constaté des anémies et des formes sévères d'encéphalopathies (132) (130) (133) (131).

La limite de qualité fixée est de 10 µg/L.

2.5.2.4. L'arsenic

C'est un élément d'origine naturelle, on le retrouve à l'état de traces dans toute matière vivante, cependant des concentrations élevées peuvent être retrouvées dans les eaux brutes suite à une pollution humaine industrielle.

L'exposition à des doses élevées d'arsenic favorise au long terme l'apparition de cancer, le Centre international de recherches sur le cancer (CIRC) l'a classé cancérigène de groupe 1 (134).

La limite de qualité fixée est de 10 µg/L.

2.5.2.5. La qualité radiologique de l'eau

La présence de radioactivité est naturelle et peut varier dans l'eau selon l'environnement (la géologie du terrain, la température, etc). Par exemple des eaux souterraines de régions granitiques possèdent une radioactivité naturellement élevée. La mise en évidence de la radioactivité de l'eau est mesurée via la présence de radionucléides naturels ou artificiels, comme le Radon, le Tritium, ou encore l'activité alpha/beta globale, mesurée en becquerels (125).

2.5.2.6. Les substances émergentes

La réglementation française de la qualité de l'eau ne prend pas en compte de manière systématique, la présence de substances émergentes. Elles ne sont pas actuellement incluses dans les réglementations actuelles, ni dans les programmes de surveillance du milieu aquatique.

Elles ont été identifiées à partir de l'examen de données toxicologiques et d'occurrence dans l'environnement. Il s'agit notamment de substances chimiques comme les hormones, les perturbateurs endocriniens, les nouveaux pesticides, les composés pharmaceutiques, les produits de beauté ou tout autre nouveau composé pour lequel les connaissances actuelles sont insuffisantes pour évaluer le risque de sa présence dans l'environnement.

Même si leurs concentrations dans l'EDCH sont faibles, elles posent des problématiques quant à leur possibles effets et quant à la manière de les contenir voire de les supprimer. Des investigations sont donc menées par l'Anses, les ARS, le LHN pour organiser des campagnes de prélèvement afin d'évaluer la présence de substances non réglementées, puis de mesurer leur potentiel risque sanitaire.

Les substances recherchées dans les dernières campagnes ont été les résidus de médicaments, les composés perfluorés, les sous-produits de désinfection de l'eau, les ions perchlorate et le chlorure de vinyle monomère (CMV).

2.6. La protection des captages

Afin de préserver une qualité sanitaire optimale de la ressource en eau et d'en assurer la protection de production de l'eau, des périmètres de protection sont établis, autour des captages de l'eau brute. Ceux-ci sont définis par des

hydrogéologues en fonction de l'origine des eaux, du terrain et des contaminations possibles. Trois périmètres de protection peuvent être mis en place :

- le périmètre de protection immédiate (PPI), qui protège de la détérioration directe des ouvrages et du déversement de substances polluantes à proximité immédiate du captage,

- le périmètre de protection rapprochée (PPR), qui permet d'encadrer, voire de supprimer toutes activités susceptibles d'engendrer une pollution : «toutes sortes d'installations, travaux, activités, dépôts, ouvrages, aménagement ou occupation des sols de nature à nuire directement ou indirectement à la qualité des eaux» (135) (puits, carrière, dépôt d'ordures, épandage de fumier, d'engrais, de phytosanitaires, dépôt d'hydrocarbures, etc),

- le périmètre de protection éloignée (PPE), facultatif, où les activités peuvent être réglementées ou surveillées.

L'étendue des périmètres reposent sur les caractéristiques du captage (mode de construction de l'ouvrage, profondeur, débit, ...), sur les conditions hydrogéologiques et la vulnérabilité de l'aquifère, puis sur les risques de pollution (points d'émission, nature des polluants, vitesse de transfert, moyens de prévention, délais, d'alarme...). Elle varie généralement de 1 à 10 hectares et permet de détecter une pollution accidentelle et d'agir pour la stopper avant que les polluants

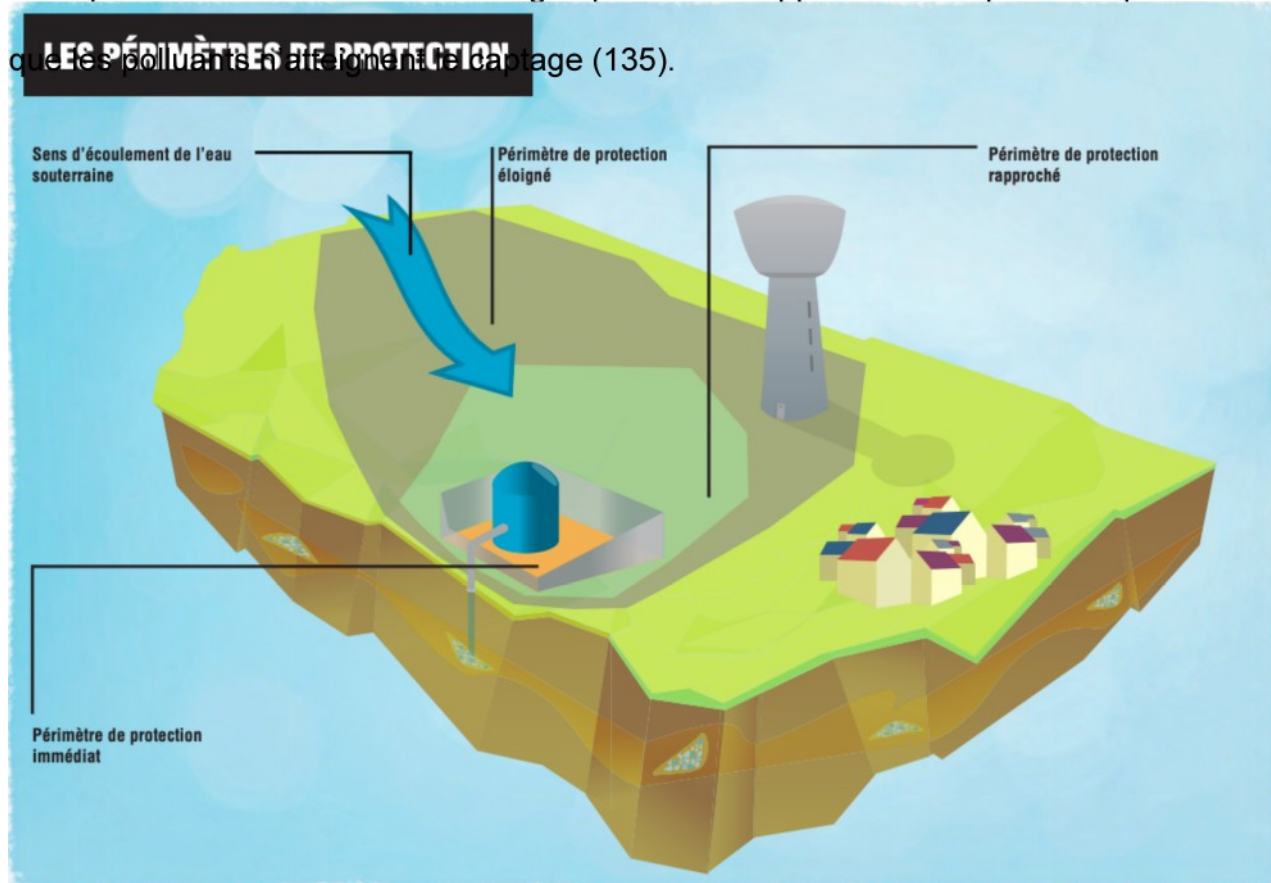


Figure 18 : Représentation des périmètres de protection des captages d'eau brute (135)

2.7. La gestion des dépassements des exigences de qualité :

Le dépassement des exigences de qualité de l'eau potable est encadré par l'arrêté du 11 janvier 2007, modifié en 2017 (aucune mention dans cet arrêté ne concerne les ions perchlorate) (125).

Les dépassements sont gérés principalement par les ARS et les maires des communes concernées par le dépassement d'une des limites de qualité. L'exploitant responsable de la production et de la distribution de l'eau, qui lors de son auto-contrôle met en évidence un dépassement d'une limite de qualité, doit alerter le maire de la commune et l'ARS concernée. De nouveaux prélèvements et analyses vont de suite être réalisés afin de rechercher la cause du dépassement de la limite de qualité. Des mesures devront être mises en place pour supprimer le risque. L'exploitant, l'ARS et les maires des communes devront également informer les populations, afin d'apporter des recommandations d'usages et de prévenir l'exposition des populations sensibles.

La délivrance de dérogation se base sur les travaux de l'Anses et de l'Afssa. Ces instances ont, en effet, procédé à l'évaluation des risques sanitaires liés aux situations de dépassement des limites et références de qualité des eaux destinées à la consommation humaine (136).

L'interruption de la distribution d'eau pouvant présenter des risques supérieurs à ceux liés à la consommation, pendant une durée limitée, d'une eau dépassant les limites ou références de qualité, ces travaux permettent d'établir les limites dans lesquelles il est possible de délivrer une dérogation sans entraîner de risques sanitaires : « La question posée revient à déterminer pour certains paramètres physico-chimiques une concentration dans l'eau supérieure à la valeur réglementaire et qui ne présenterait aucun risque pour la santé d'une personne qui consommerait cette eau pendant une durée limitée » (136).

Par exemple, le dépassement de la limite de 50 mg/L de nitrate à 51 mg/L d'eau doit-il entraîner une restriction ? Pour chacun des paramètres, les recherches se sont portées sur les interrogations suivantes (136) :

- Quel est le danger présenté par cette substance (données toxicologiques et épidémiologiques) ?
- Quelles sont les valeurs toxicologiques de référence ?
- Quelle est l'origine principale de cette substance dans les eaux ?
- Quels sont les procédés de traitement pouvant être mis en œuvre pour remédier à la situation ?
- Quelles sont les parts des apports par l'alimentation solide et l'eau d'une part et par les autres sources d'apport d'autre part ?
- Existe-t-il une marge de sécurité ? Dans quelle mesure une concentration dans l'eau supérieure à la limite ou à la référence de qualité pendant une durée limitée, peut-elle permettre d'assurer la sécurité du consommateur ?

Une dérogation est donc possible, dans le cas des nitrates, au vu des recherches, pour un dépassement compris entre 50 et 100 mg/L. Cependant, afin de protéger les populations sensibles (nourrissons et femmes enceintes), il leur est demandé de ne pas consommer l'eau. Sous cette réserve, des dérogations temporaires à la limite de qualité peuvent être accordées par le Préfet sur la base d'un programme d'amélioration de la qualité, présenté par la collectivité distributrice.

Au-delà de 100 mg/l, la restriction de consommation concerne l'ensemble de la population desservie.

2.8. La délivrance des dérogations

La délivrance d'une dérogation est permise et encadrée par le code de la santé publique (CSP), via les articles R. 1321-31 à R. 1321-36 (137). Le CSP permet à la PPRDE de déposer, auprès du préfet, une demande de dérogation aux limites de qualité fixées, et ce pour des éléments chimiques uniquement.

Deux conditions sont nécessaires pour obtenir une dérogation :

- « l'utilisation de l'eau ne constitue pas un danger potentiel pour la santé des personnes » (138), ce qui sous-entend un « risque acceptable » pour la population,
- aucun « moyen raisonnable » comme le traitement, le changement de ressource ou le mélange d'eaux ne sont applicables dans l'immédiat pour corriger le dépassement et donc maintenir la distribution d'eau. Au niveau microbiologique, aucune dérogation ne peut être acceptée vu les risques à court terme auquel un dépassement expose.

Il existe deux types de dérogations. Elles sont relatives à la durée de non-conformité aux limites de qualité de l'eau :

- une procédure allégée, lorsque le dépassement des limites est sans gravité et que les mesures correctives corrigent la situation en moins de trente jours,
- une procédure complète dans les autres cas.

La durée maximale d'une dérogation est de 3 ans, mais peut être renouvelée deux fois. À l'autorisation d'une dérogation, la population concernée est informée par le PPRDE, les informations sont également disponibles au niveau des mairies.

De nos jours, la majorité des dépassements des limites de qualité concernent les nitrates et les pesticides. Ces dépassements sont généralement corrigés à court terme par un changement de ressource, l'application de traitement ou via une dilution, obtenue par l'interconnexion de plusieurs réseaux de distribution.

Une carte a été réalisée en 2013 par 60 millions de consommateurs et la fondation Danielle Mitterrand (139) (figure 19). Toutes les dérogations présentées ne sont plus effectives aujourd'hui, mais la carte permet de réaliser le nombre de dérogations qu'il peut y avoir sur l'ensemble du territoire et les départements qui y ont le plus recours, dans l'attente de l'émission d'une carte plus récente.

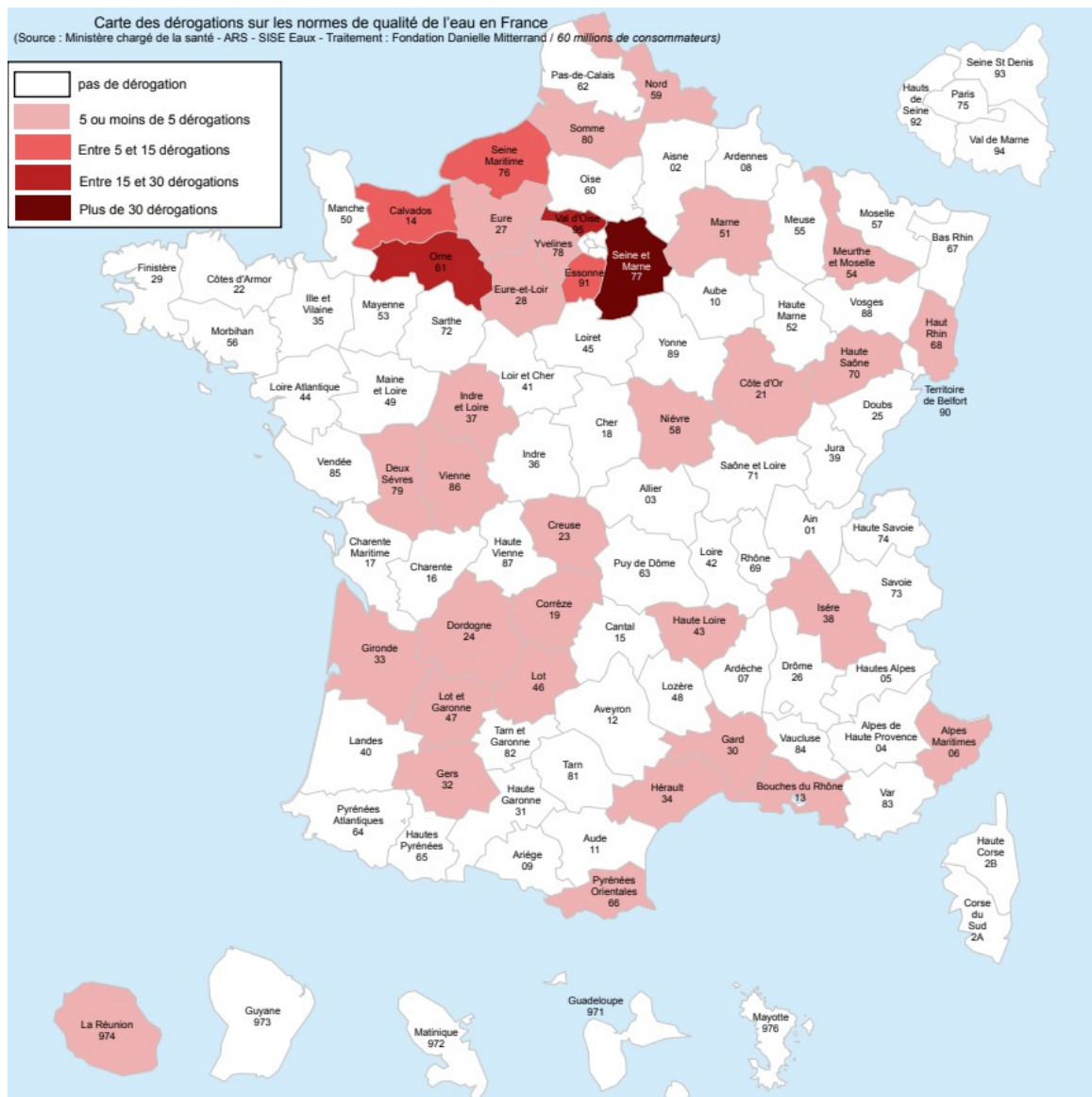


Figure 19 : Carte des dérogations sur les normes de qualité en France en 2013 (139)

2.9. Information du public

L'information du consommateur est un droit stipulé dans la réglementation, elle comprend :

- une note de synthèse de l'ARS : une fois par an, fournie avec la facture d'eau (infacture) (figure 20). Elle apporte des informations sur l'origine de la ressource et l'organisation de la distribution, sur le nombre de prélèvements effectués, les résultats des paramètres les plus parlants pour toute population (bactériologie, nitrates, dureté, pesticides), les dépassements ponctuels et une conclusion sur la qualité.

- l'affichage des résultats des analyses en mairie,
- l'accès aux Informations internet :

<https://www.sante.gouv.fr/resultats-du-contrôle-sanitaire-de-la-qualité-de-l-eau-potable.html> (résultats par UDI).

Unité de distribution : VALENCIENNES CENTRE

Ces informations sont fournies par l'Agence Régionale de Santé Hauts-de-France, en application du code de la santé publique.
Lire le verso pour plus d'informations. Les résultats analytiques détaillés peuvent être consultés à la mairie ou sur <http://www.eaupotable.sante.gouv.fr>

GESTIONNAIRES		MICROBIOLOGIE	
Maître d'ouvrage		Pourcentage de conformité des 43 valeurs mesurées : 100,0% - maxi. : 0 germe/100ml	
SYNDICAT DES EAUX DU VALENCIENNOIS		Limites de qualité : 0 germe/100ml	
Exploitant		Très bonne qualité bactériologique.	
SOCIETE EAU ET FORCE C.E. ANZIN		FLUOR	
		8 valeurs mesurées : mini. : 0,1 mg/L - maxi. : 0,3 mg/L - moyenne : 0,2 mg/L	
		Limite de qualité : mini. : aucune maxi. : 1,5 mg/L	
		Eau peu fluorée. Un apport complémentaire de fluor peut être conseillé après avis médical.	
RESSOURCES EN EAU		DURETÉ	
Vous êtes alimentés par 13 captages		24 valeurs mesurées : mini. : 36,8 °f - maxi. : 51,2 °f - moyenne : 44,2 °f	
		Références de qualité : mini. : aucune maxi. : aucune	
		L'eau de votre réseau est très dure.	
PRODUCTIONS D'EAU		NITRATES	
Vous êtes alimentés par 2 stations		25 valeurs mesurées : mini. : 6,9 mg/L - maxi. : 30,6 mg/L - moyenne : 18,2 mg/L	
◆ BOUCHAIN PRODUCTION SEV		Limite de qualité : mini. : aucune maxi. : 50 mg/L	
◆ VICQ PRODUCTION SEV		La consommation d'eau en l'état ne présente pas de risque pour la santé.	
		PESTICIDES	
		8 valeurs mesurées : maxi. : 0,028 µg/L	
		Limite de qualité par pesticide : 0,1 µg/l	
		Eau conforme. Traces de pesticide(s) inférieures à la limite de qualité.	
		PERCHLORATES	
		1 valeur mesurée : mini. : 7,5 µg/L - maxi. : 7,5 µg/L	
		Teneur maximale recommandée pour les nourrissons : 4 µg/L	
		Cette eau est soumise à la restriction de consommation pour les personnes sensibles.	

CONCLUSION

L'eau distribuée au cours de l'année 2018 présente une très bonne qualité bactériologique. Elle est restée conforme aux exigences de qualité réglementaires fixées pour les substances indésirables, les substances toxiques et les pesticides. Concernant la teneur en ions perchlorates, elle ne respecte pas les recommandations en vigueur : sa consommation est déconseillée pour les nourrissons de moins de 6 mois, conformément à l'arrêté préfectoral du 25 octobre 2012.

Figure 20 : Exemple « d'infographie » présentant une restriction de consommation pour les personnes sensibles à l'exposition aux ions perchlorate sur la commune de Valenciennes (59) sur le Bilan 2018. Source : ARS agence régionale Hauts-de-France

3. Historique des ions perchlorate en France

3.1. La mise en évidence des ions perchlorate en France

La problématique des ions perchlorate a été évoquée en France au cours de l'année 2010. En effet, l'analyse d'un prélèvement d'eau souterraine dans la région Aquitaine, non loin d'un ancien site industriel de production de poudre et d'explosifs avait mis en évidence la présence de ces ions dans l'eau.

En l'absence d'une limite de qualité les réglementant, la Direction générale de la santé (DGS) a saisi l'Anses le 31 janvier 2011, dans le but d'évaluer les risques sanitaires encourus par les consommateurs.

L'Anses a remis en 2011 une conclusion, estimant que la consommation d'EDCH dont la concentration en ions perchlorate est inférieure à 15 µg/L ne présentait pas de risque sanitaire pour le consommateur adulte.

Cependant, la DGS a recommandé, dans le respect du principe de précaution, de limiter la consommation d'eau dont la concentration en ions perchlorate était supérieure à 4 µg/L pour la préparation des biberons de moins de 6 mois, et de limiter la consommation d'eau dont la concentration en ions perchlorate dépassait 15 µg/L pour les femmes enceintes et allaitantes afin de prévenir de possibles effets sanitaires indésirables (58).

Conjointement, la DGS a demandé au LHN de l'Anses de vérifier la présence d'ions perchlorate dans les échantillons d'eaux prélevés pour d'autres campagnes d'analyses. De même, les producteurs et distributeurs d'eau (FP2E) ont analysés l'eau au niveau du réseau de distribution. C'est ainsi que des ions perchlorate ont été retrouvés au niveau de captages dans la commune de Flers-en-Escrebieux dans le Nord (59), non loin de Douai, mais également dans le Pas-de-Calais (62), en Picardie (Aisne (02), Oise (60), Somme (80)) et en Champagne-Ardennes (Ardennes (08), Aube (10), Marne (51), Haute-Marne (52)). La Société des eaux du Nord (SDN) a pris conscience de la problématique face aux dépassements du seuil de 4 µg/L dans quatre des huit forages du champ captant de Flers-en-Escrebieux.

En septembre 2011, des actions ont été entreprises dans le Nord et le Nord-Pas-de-Calais via l'ARS, la Cellule d'intervention en région (Cire), les distributeurs et les mairies des communes contaminées par les ions perchlorate afin de limiter l'ampleur de la pollution. Ces actions proposaient des recherches sur les potentiels effets néfastes des ions perchlorate sur la santé et sur les moyens à entreprendre pour limiter l'exposition des populations fragiles et diminuer les concentrations en ions perchlorate.

3.2. État des lieux de la présence des ions perchlorate en France et plus particulièrement dans la région des Hauts-de-France :

Les analyses du LHN ont permis d'établir une représentation géographique de la répartition des ions perchlorate en France dans les eaux pour les deux types d'installations que sont les captages et les sorties d'installations de traitement des eaux grâce à des prélèvements réalisés entre octobre 2011 et mai 2012 (Figure 21 et 22). Ces représentations mettent en lumière une localisation plutôt restreinte des sites et régions présentant des concentrations en ions perchlorate supérieures à 4 µg/L dans la région nord de la France.

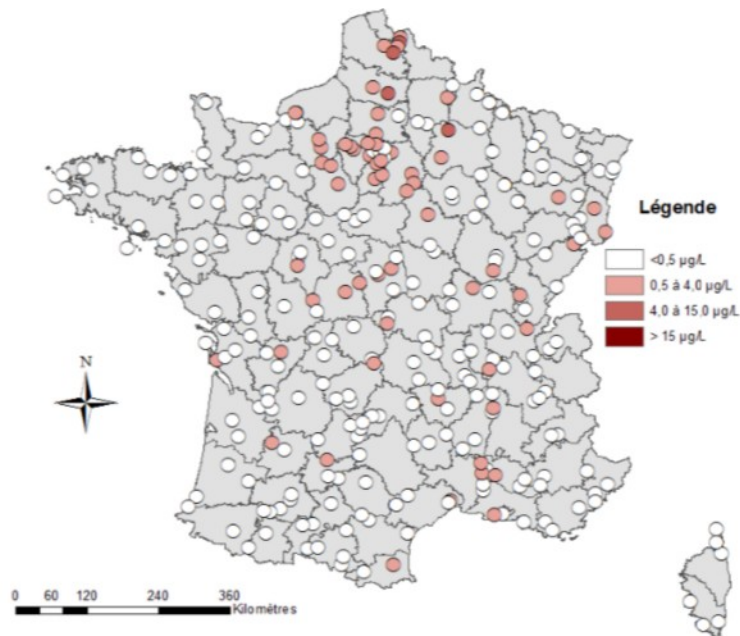


Figure 21 : Représentation des concentrations en ions perchlorate en $\mu\text{g/L}$ en sortie d'installations de traitement en France métropolitaine (62) mesurées par échantillon ponctuel au cours de la campagne réalisée entre octobre 2011 et mai 2012 par le laboratoire d'hydrologie de

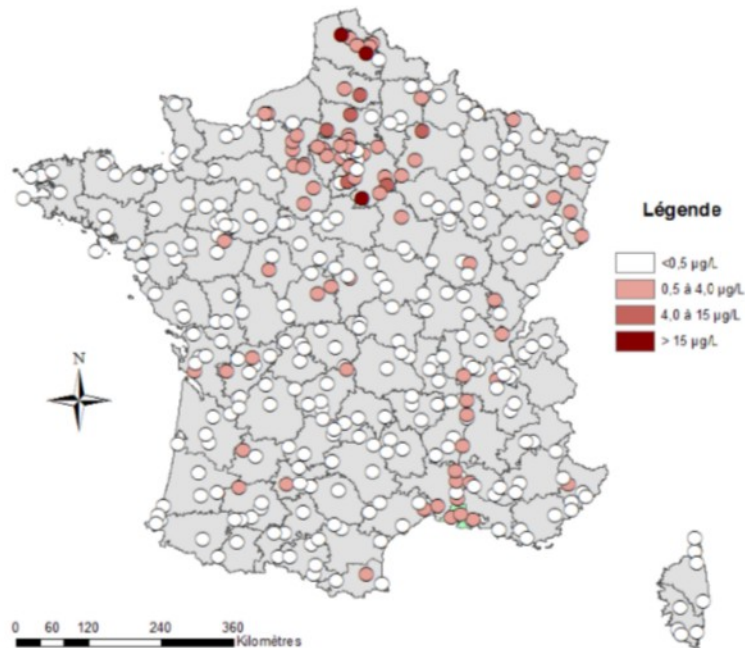


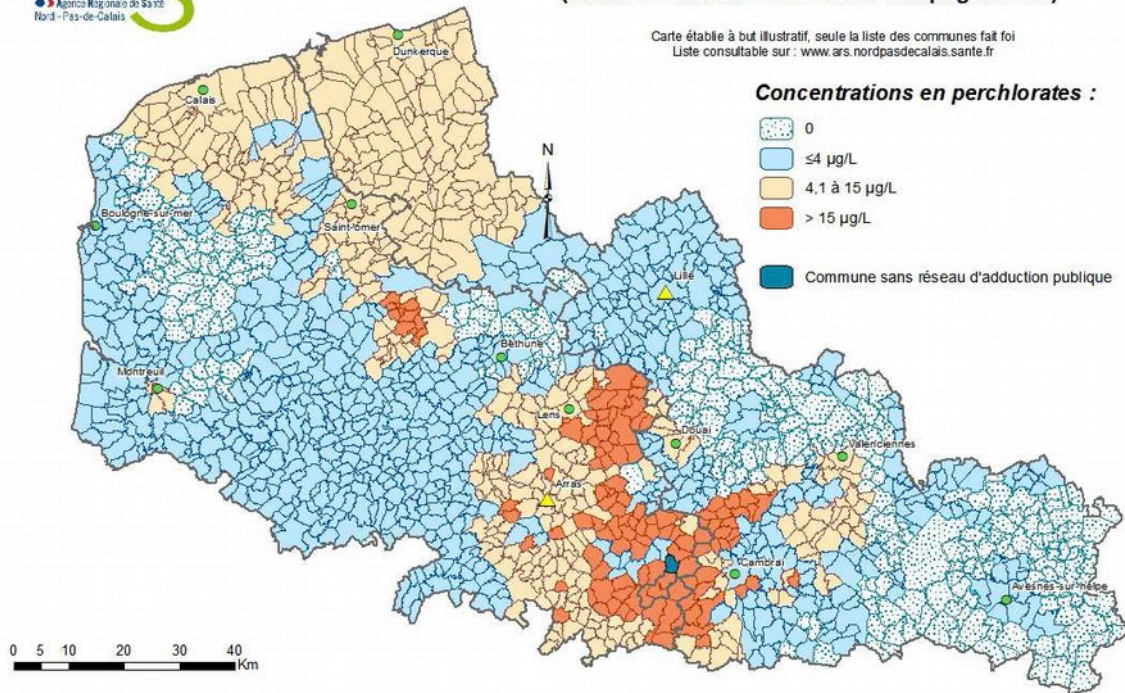
Figure 22 : Représentation des concentrations en ions perchlorate en $\mu\text{g/L}$ au niveau des captages d'eaux brutes en France métropolitaine (62) mesurées par échantillon ponctuel au cours de la campagne réalisée entre octobre 2011 et mai 2012 par le laboratoire d'hydrologie de Nancy de l'Anses (LHN)

Ces localisations interrogent sur l'origine de la présence des ions perchlorate. L'ARS du Nord de la France et le Bureau de Recherche Géologique et Minières (BRGM), en charge de vérifier l'origine de la contamination par les ions perchlorate ont émis l'hypothèse d'une contamination d'origine historique.

La DGS et L'ARS de la région Nord/Pas-de-Calais ont conjointement demandé des mesures supplémentaires afin d'établir une carte représentant les différentes concentrations en ions perchlorate dans le Nord/Nord Pas-de-Calais. Il apparaît, suite à ces nouvelles mesures, des concentrations plus élevées aux alentours d'Arras, de Lens, de Douai et de Henin-Beaumont (Figure 23 et 24).

**TENEURS EN PERCHLORATES DANS L' EAU DE DISTRIBUTION
(données autosurveillance et campagne ARS)**

Carte établie à but illustratif, seule la liste des communes fait foi
Liste consultable sur : www.ars.nordpasdecalais.sante.fr



Source : ARS Pôle Qualité des Eaux
Carte mise à jour le 26/11/2014

Figure 23 : Représentation des concentrations en ions perchlorate en µg/L dans le Nord/Nord Pas-de-Calais par L'ARS (14)

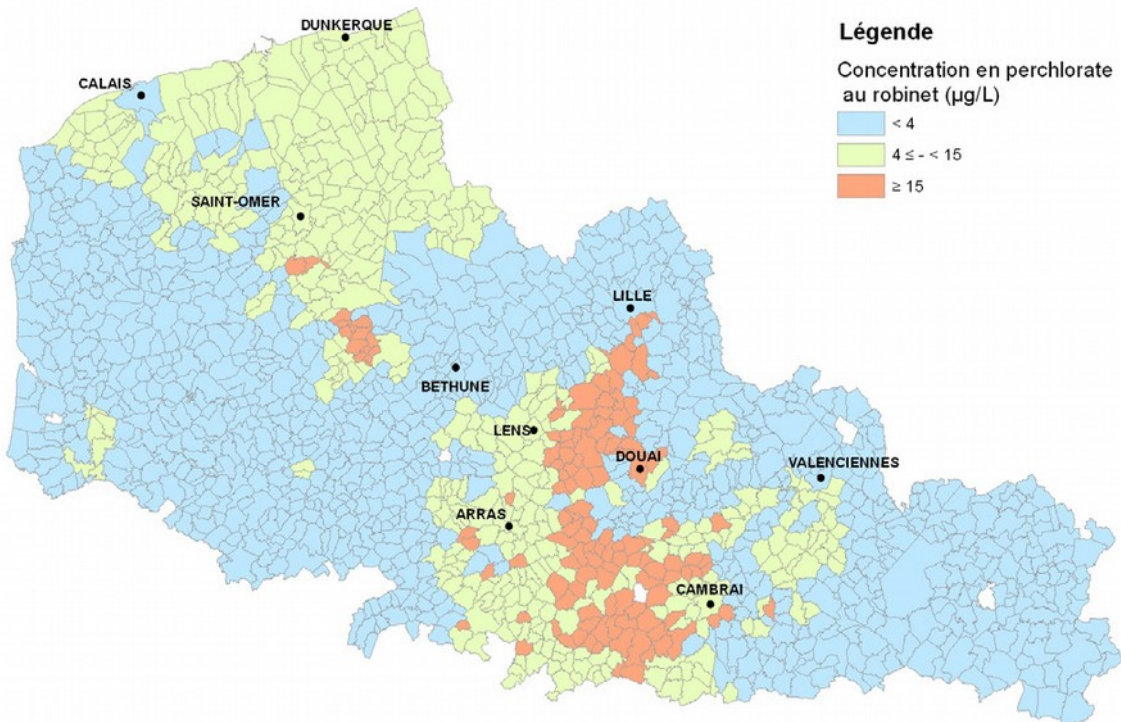


Figure 24 : Représentation simplifiée des concentrations en ions perchlorate en µg/L dans le Nord/Nord-pas-de-calais (117)

3.3. Origines probables de la contamination par les ions perchlorate

Plusieurs hypothèses peuvent être à l'origine de la contamination des sols et des eaux en France :

- les conséquences de la 1^{ère} guerre mondiale, via l'utilisation sans retenue de munitions contenant de la poudre à base d'ions perchlorate,
- les activités industrielles,
- d'anciennes activités agricoles.

L'Anses préconise d'ailleurs de « vérifier l'hypothèse de la contamination historique en réalisant des investigations locales dans les différentes régions touchées par les combats » (51).

Le BRGM a été chargé de vérifier l'origine de contamination, qui peut être différente selon la région considérée (100).

3.3.1. Origine historique

L'hypothèse majoritairement retenue, notamment en ce qui concerne la région Hauts de France, est que la contamination des sols et des eaux par les ions perchlorate, est la conséquence de la première guerre mondiale et de l'utilisation abusive de munitions à base d'ions perchlorate, « exploit » permis par l'industrialisation de la guerre.

Les ions perchlorate étaient autant utilisés côté allemand que côté français et alliés, comme propulseurs et explosifs dans les bombes et munitions d'artillerie. Pour information, plus d'un milliard d'obus ont été tirés lors de cette guerre, avec comme exemple frappant, la bataille de Verdun, qui aura fait plus de 700 000 victimes. Il a été tiré au cours de cette bataille plus de 50 millions d'obus de tous calibres, 30 millions pour les allemands et 23 millions côté français. Chaque jour environ 100.000 projectiles étaient tirés, chiffres doublés lors des jours d'attaque. La 1^{ère} guerre mondiale, qui devait être une guerre éclair s'est transformée en guerre d'usure, chacun campant sur ses positions via un front long de nombreux kilomètres. En conséquence, l'Allemagne et la France, ayant rapidement épuisé leurs réserves stratégiques en nitrate importé du Chili ont poussé les industriels à avoir recours à des produits de substitution, les ions perchlorate en faisant partie.

La ligne de front s'étendait, depuis la fin de l'année 1914 jusqu'au printemps 1918, sur une ligne de tranchées continues, s'étalant sur 700 kilomètres de la mer du nord jusqu'à la Suisse. La zone de guerre représentait une quinzaine de kilomètres de chaque côté d'un « no man's land ».

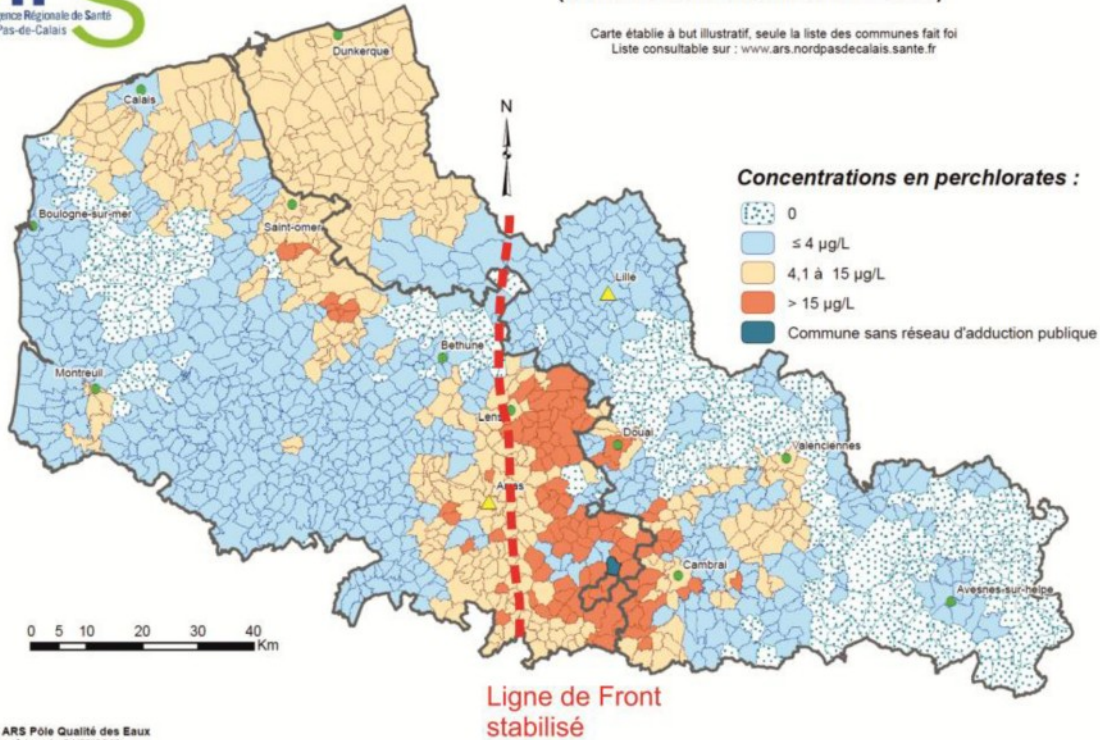
La représentation des communes touchées par la pollution des eaux correspond aux lignes de front provenant du littoral de Calais et Dunkerque, et aux sites de neutralisation des obus après la fin de la guerre. Les concentrations les plus élevées en ions perchlorate, aux alentours de 40 µg/L ont d'ailleurs été mesurées sur cette ligne de front (figure 25 et 26) (14).



Figure 25 : Cartographie des zones de combats à la fin de la première guerre mondiale. Trois degrés de destructions sont représentés : les zones bleues représentent les zones faiblement atteintes, lieu de passage d'armées. La zone jaune représente des lieux témoins de dégâts plus importants, c'est la zone des opérations militaires avec un sol labouré de tranchées, d'obus et de projectiles souvent non éclatés. Finalement, la zone rouge représente des zones totalement détruites par des importantes batailles, dont le « no man's land » (140)

**TENEURS EN PERCHLORATES DANS L' EAU DE DISTRIBUTION
(données autosurveillance et ARS)**

Carte établie à but illustratif, seule la liste des communes fait foi
Liste consultable sur : www.ars.nordpasdecalais.sante.fr



Source : ARS Pôle Qualité des Eaux
Carte mise à jour le 24/09/2013

Figure 26 : Représentation de la ligne de front stabilisée par rapport aux concentrations observées en ions perchlorate dans le Nord de la France (141)

Cependant, la pollution d'aujourd'hui n'est pas directement liée uniquement à ces massacres, mais également à la mauvaise gestion des autorités de l'époque des déchets de guerre, des munitions non-utilisées et des munitions non-explosées enfouies dans les sols, qui remontent encore à la surface de nos jours au niveau des champs, lors du labourage et des chantiers de construction. Il est à noter que 30 % des munitions tirées entre 1914 et 1918 n'ont pas explosé, et que chaque année sont retrouvées plus de 100 tonnes de munitions, par exemple 180 tonnes en 2011 (14). Une munition non explosée subira une corrosion d'environ 1mm/an, les munitions partiellement explosées exposent à une rémanence de l'explosif supérieure à 100 ans (141). (Figure 27 et 28)

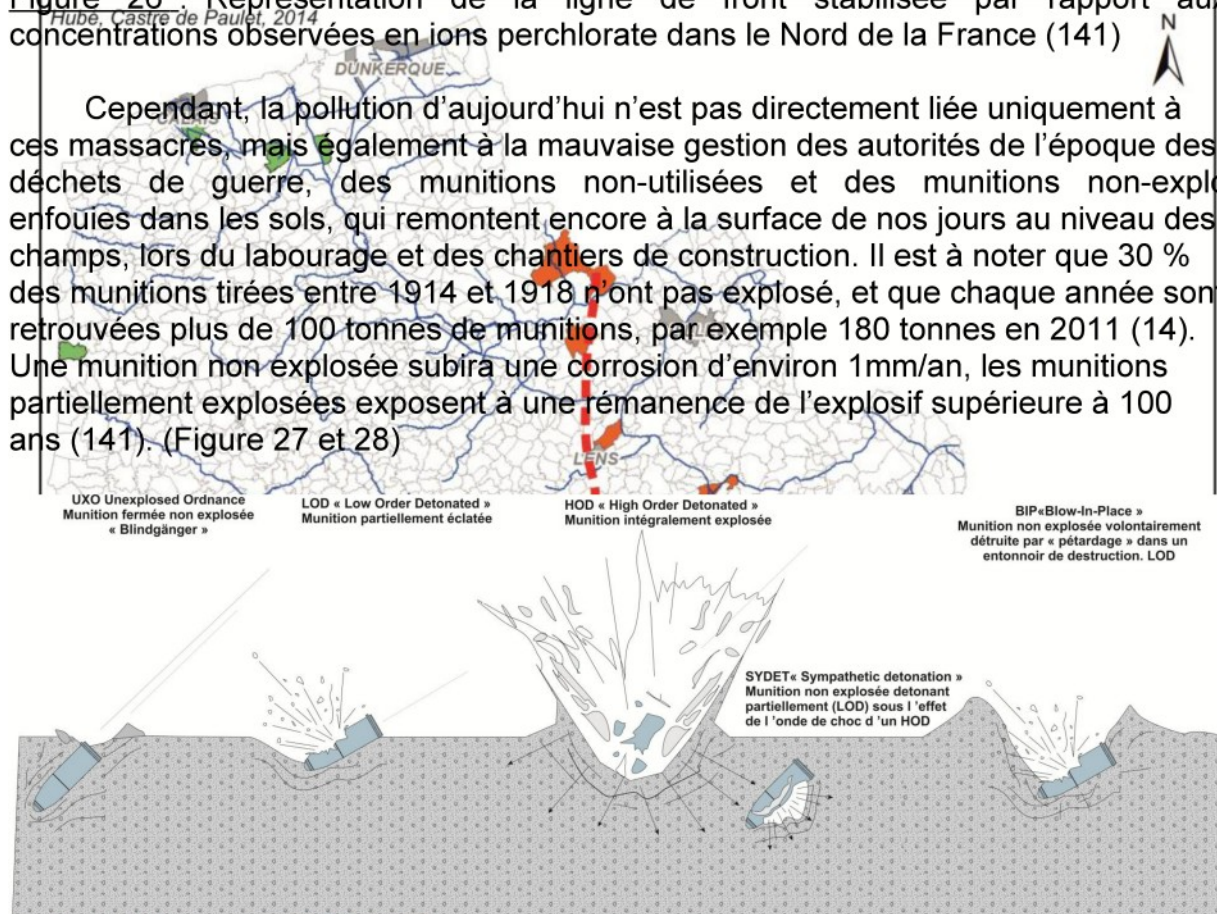


Figure 27 : Représentation des différentes explosions ou non explosions des obus tirés lors de la première guerre mondiale (141)

Libération de la charge explosive possible après corrosion générale et/ou perforation (1 mm/an environ) Durée jusqu'à perforation: [250-450 ans]	Projection de fragment d'explosifs [1 -50%] de la charge et particules > 1 mm Cinétique de dissolution > 100 ans Rémance de l'explosif dans l'enveloppe éventrée	81 Projection de fragment d'explosifs (imbrûlés, ~ 0,01% de la charge, particules < 1 mm) et de métaux Cinétique de dissolution: < 1 an Genèse de composés de décomposition thermique	Idem LOD Projection de fragment d'explosifs Jusqu'à 70% de la charge et particules > 1 mm Cinétique de dissolution > 100 ans Accumulation (BIP répété) Rémance de l'explosif dans l'enveloppe éventrée



Figure 28 : Grenades et munitions partiellement éclatées avec explosif présentant une corrosion avancée à Vimy (62) (141)

Les nombreuses munitions non employées, abandonnées sur les champs de bataille ou enterrées à faible profondeur ont été exploitées dans des zones de destruction ou de « pétardage » (par exemple : la place à gaz de Verdun, site réputé de destruction d'obus), afin de récupérer ensuite le cuivre, l'étain et l'acier (figure 29). Il est à noter que l'impact chimique des trois guerres, 1870, 1914-1918 et 1939-1945 n'a jamais été réellement étudié. Par exemple, des concentrations élevées en cuivre et zinc ont été mesurées dans les eaux souterraines de Verdun dès 1975, mais elles furent classées curiosités historiques. Les ions perchlorate n'étant pas les seuls composés potentiellement nocifs de l'artillerie, il est nécessaire d'approfondir la recherche d'arsenic ou d'antimoine par exemple, employés comme durcisseur des balles, ou le mercure et le plomb employés dans les amorces des obus.

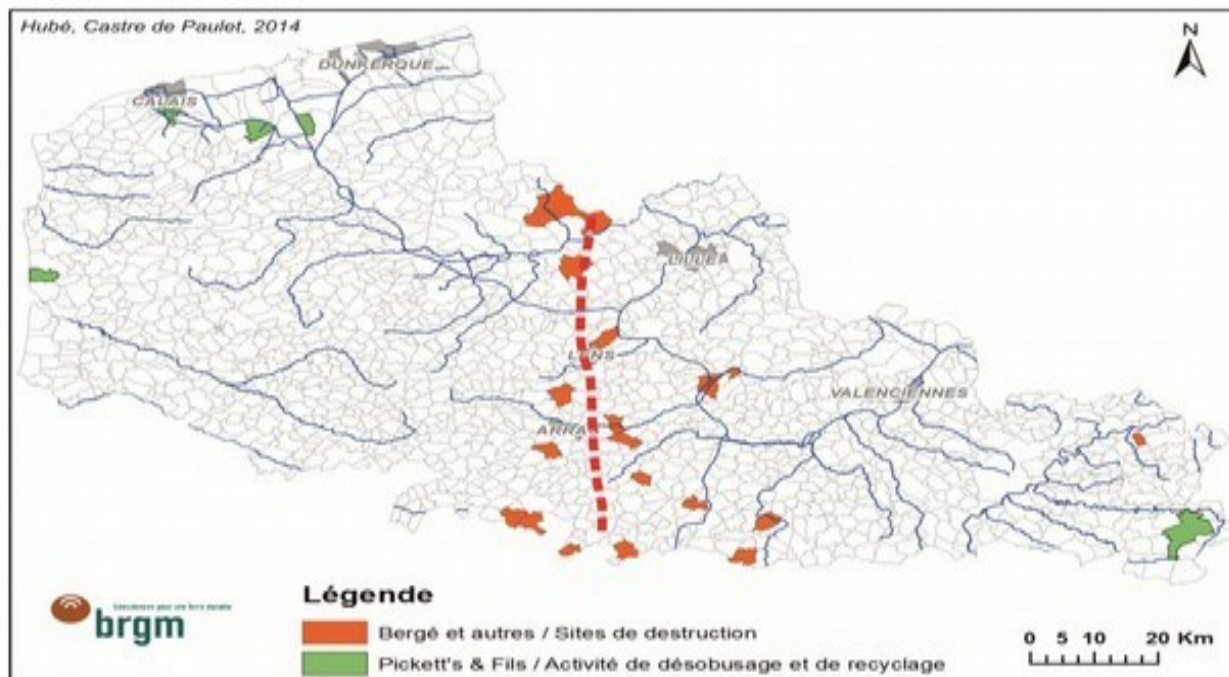


Figure 29 : Représentation des sites de destruction et recyclage dans le nord de la France (141)

Suite à ces constats, c'est donc cette cause historique qui semble être la plus plausible pour expliquer l'origine de la contamination par les ions perchlorate dans la région nord de la France. Cependant, les autres hypothèses ne peuvent être rejetées avec l'activité industrielle de la région du Nord/Pas-de-Calais. En effet, il a été observé des concentrations élevées en ions perchlorate dont la présence n'a pu être expliquée, c'est-à-dire loin des zones de combats, des dépôts d'armement ou des zones de pétardage et des zones à portée de ruissellement.

3.3.2. Origine mixte

L'hypothèse historique ne pouvant expliquer à elle seule la présence des ions perchlorate sur le territoire français, le BRGM s'est penchée sur les autres origines plausibles, qui sont la pollution d'origine industrielle et agricole, notamment pour expliquer la présence de sources plus ponctuelles éloignées des zones de combats de la première guerre mondiale.

De nos jours, outre les zones de combat intenses, ce sont les sites industriels de production d'ions perchlorate à but militaire qui sont principalement responsables de l'émission d'ions perchlorate dans l'environnement. Néanmoins, nombre d'autres activités industrielles utilisent et ont utilisé les ions perchlorate dans diverses applications industrielles pour leur propriété d'oxydant puissant. L'ARS a cartographié ces activités industrielles (figure 30).

Cependant la répartition de la pollution aux ions perchlorate, que ce soit dans la région Nord/Pas-de-Calais ou élargie à l'ensemble de la France, ne correspond pas totalement à la pollution industrielle, d'après le BRGM (142).

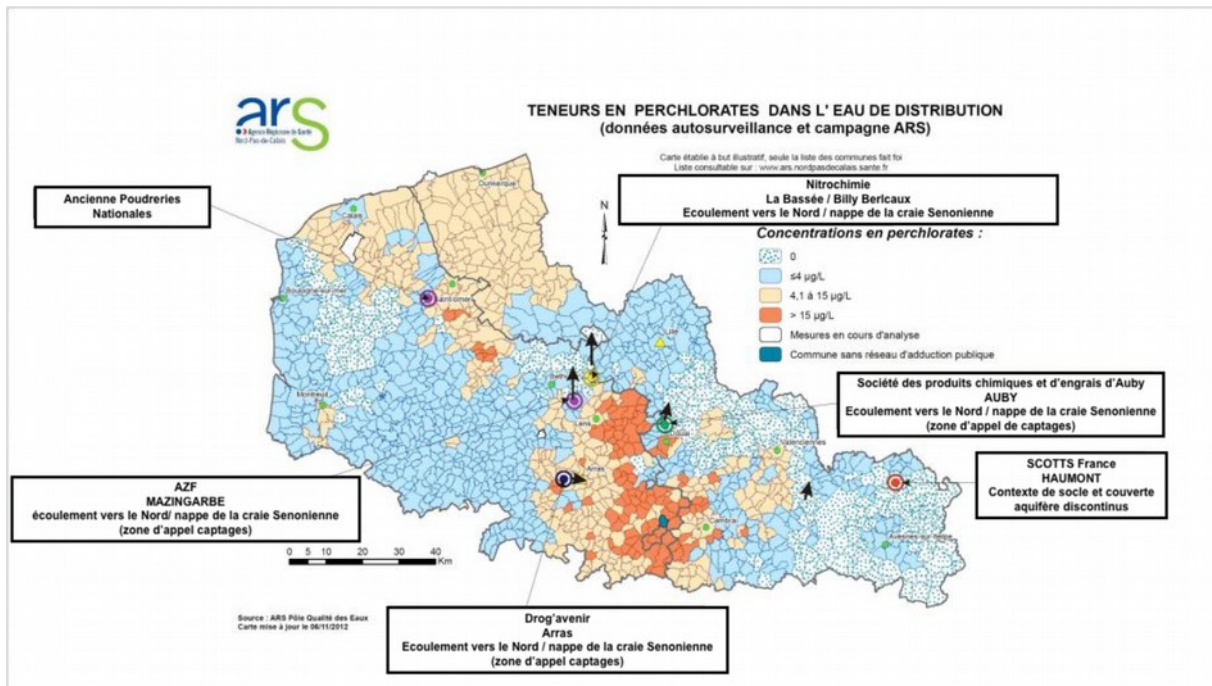


Figure 30 : Répartition des concentrations en ions perchlorate dans le Nord/Nord-pas-de-calais (Source : ARS 2012) par rapport à la répartition de zones industrielles émettrices d'ions perchlorate (142)

Le BRGM s'est donc penché sur l'autre hypothèse plausible, celle de la pollution d'origine agricole.

En effet, il y a eu dans le nord et dans le reste de la France, une utilisation et une importation d'engrais azotés inorganiques provenant du Chili, aussi appelé salpêtres chiliens (NaN_3). Leur production a débuté dans le monde vers 1830, jusque dans les années 1980, remplacé peu à peu à partir des années 1930 par des fertilisants azotés synthétiques.

Leur utilisation pour l'agriculture française a été à son apogée entre 1880 et 1950, pour la culture de la betterave sucrière principalement, ce qui explique que la consommation n'ait pas été la même dans toute la France. Les départements de l'Aisne, du Nord, du Pas de Calais, de l'Oise, de la Somme, la Seine-et-Marne et de la Seine-et-Oise ont été les plus consommateurs d'azote en général pour l'agriculture. La consommation de salpêtre chilien y a donc été probablement plus intense que dans les autres régions (figure 31) (100).

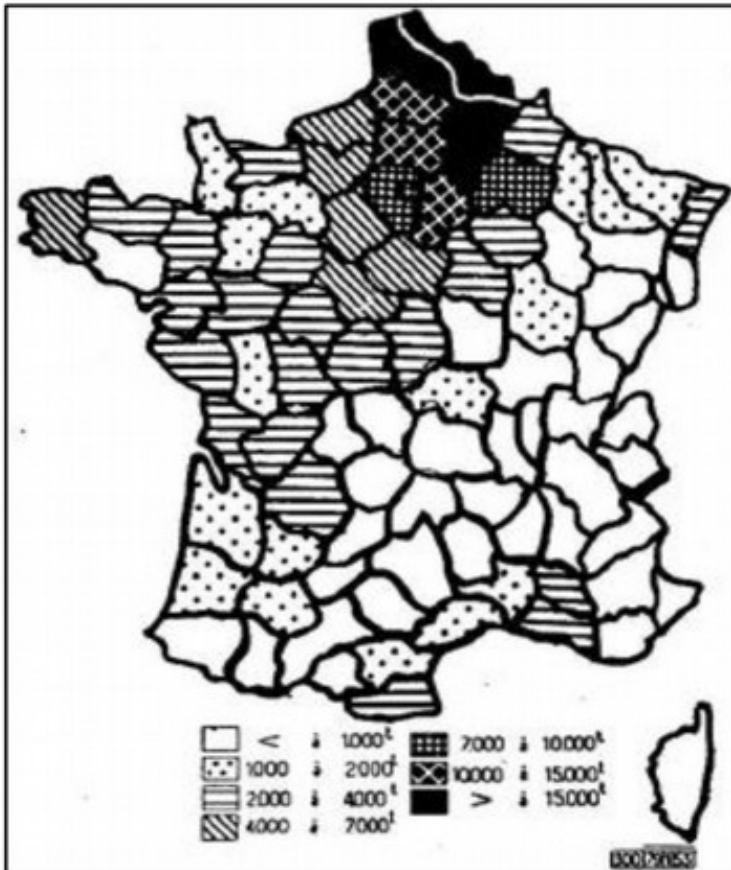


Figure 31 : Consommation annuelle d'azote entre 1950 et 1952 (INSEE 1953) (100)

Par ailleurs, des ions perchlorate ont pu également être apportés par l'utilisation de produits phytosanitaires herbicides composés de chlorate de sodium. Ces produits contenaient une quantité non négligeable d'ions perchlorate et ont donc potentiellement été des sources d'ions perchlorate dans l'environnement (100).

Ces produits phytosanitaires herbicides ont en effet été utilisés depuis les années 1960 jusqu'en 2009, année de leur interdiction. Les ions chlorate étaient utilisés pour leur puissant pouvoir oxydant couplé à leur importante solubilité. Ils causaient la lyse cellulaire depuis les racines, jusque dans la sève du végétal, pour atteindre les feuilles les plus hautes.

Cependant de par leur solubilité importante et leur action « herbicide totale », les chlorates n'ont que très peu été utilisés en agriculture, préférés pour le désherbage d'espaces privés, d'autoroutes ou encore de rails de chemins de fer.

Une hypothèse ne suffit donc pas à expliquer à elle seule la répartition et la pollution observée sur le territoire français. L'origine de la pollution par les ions perchlorate semble alors être mixte et propre aux différentes régions au vu de leur passé, qu'il soit industriel, agricole ou militaire. Il est possible d'illustrer cette hypothèse d'origine mixte en comparant l'exemple de Bordeaux, où les ions perchlorate font l'objet d'une pollution ponctuelle et isolée provenant d'une zone industrielle consommatrice d'ions perchlorate pour la fabrication d'explosifs militaires, et la pollution des eaux des Hauts-de-France, diffuse et probablement causée par les combats de la 1^{ère} guerre mondiale et une agriculture à base d'engrais contenant des ions perchlorate.

4. Conclusion de la troisième partie

Cette partie permet de caractériser la problématique des ions perchlorate. Ils ne sont pas éliminés dans les usines de traitements de l'eau. Cependant, la nécessité de les éliminer se pose, vu qu'ils sont absents de la réglementation de l'eau, le dépassement des recommandations dans l'EDCH n'imposant pas de restrictions de consommation. De plus, leur origine est difficile à caractériser, elle semble être l'addition des différentes utilisations depuis plus d'un siècle.

Quatrième partie : Les actions mises en place et les procédés techniques étudiés

1. Les actions mises en place sur le territoire français

1.1. Historique des recommandations de l'Anses

En 2011, l'Anses établissait que l'exposition de personnes adultes dans les EDCH à une concentration d'ions perchlorate inférieure à 15 µg/L ne représentait aucun risque, « dans les conditions habituelles d'utilisation » (50). L'agence incitait également à éviter l'utilisation d'EDCH contaminées par les ions perchlorate pour la reconstitution des biberons de nourrissons de moins de 6 mois. Suite à ces recommandations, la DGS a fixé, via les ARS, des valeurs limites de 15 µg/L pour les adultes en bonne santé et de 4 µg/L pour les nourrissons âgés de moins de 6 mois.

En 2012, devant la détection de concentrations supérieures aux normes établies dans les Haut-De-France, la DGS a saisi l'Anses afin qu'elle ré-évalue les effets potentiels des ions perchlorate sur la santé. Suite à ces ré-évaluations, un lien est établi avec des variations de TSH, avec l'iodurie et avec la prévalence d'hypothyroïdie. Ne pouvant statuer sur ces perturbations, l'Anses et la DGS confirment la valeur de référence de 15 µg/L d'ions perchlorate chez les adultes, notamment la femme enceinte, et de 4 µg/L chez le nouveau-né. Ces doses n'ont pas entraîné d'effet sanitaire avéré, ces valeurs dérogatoires sont fixées dans un but conservateur et protecteur, en considérant une exposition chronique par l'eau de boisson d'un individu de 70 kg consommant 2 litres d'eau par jour et sur la base d'une VTR chronique par voie orale de 0,7 µg/Kg p.c/j (50).

Parallèlement, en août 2011, ont débuté des recherches sur la présence d'ions perchlorate dans les laits infantiles commercialisés en France. Leur présence y a été confirmée en avril 2014. Cependant, il a été établi que les concentrations observées n'entraînaient pas de dépassement de la VTR, de 0,7 µg/Kg p.c/j, pour 95 % de la population de nourrissons âgés de moins de 6 mois, lors de la reconstitution des laits avec une eau présentant une concentration en ions perchlorate inférieure à 1 µg/L. Il faut néanmoins rester vigilant, car la reconstitution avec une eau concentrée à plus de 2 µg/L entraîne un dépassement de la VTR chez 5 % des enfants de moins de 6 mois, ce qui pourrait justifier une réglementation et une prévention dans les zones concernées par des concentrations en ions perchlorate supérieures à 2 µg/L.

1.2. Actualisation des connaissances et des recommandations effectives de l'Anses

Depuis les recommandations établies en 2012, les travaux de recherche de l'Anses ont été poursuivis. La proposition de l'OMS, le 28 juillet 2017, d'une nouvelle valeur guide de 0,07mg/L, soit 70 µg/L d'ions perchlorate dans les EDCH (143), a entraîné la saisie de l'Anses par la DGS, pour statuer sur la pertinence de la ré-évaluation des risques sanitaires liés à la présence d'ions perchlorate dans les EDCH. Ont ainsi été recrutés les comités d'experts spécialisés (CES) « Eaux » et le groupe de travail « Évaluation des risques sanitaires associés aux paramètres chimiques des eaux destinées à la consommation humaine » (GT ERS EDCH).

Ces groupes se sont prononcés pour abaisser la valeur de dérogation de concentration des ions perchlorate dans les EDCH à 5 µg/L, pour la population adulte en général. Ils préconisent également, afin de mieux encadrer les risques sanitaires liés aux ions perchlorate, de les prendre en considération lors de la prochaine étude portant sur l'alimentation totale (EAT 3). Ainsi, les chercheurs pourront mieux évaluer l'exposition alimentaire et ainsi mieux prévenir les effets sanitaires sur les populations les plus sensibles aux ions perchlorate. En effet, on observe chez les enfants âgés de plus de 6 mois, en général, une diversification de l'alimentation avec la consommation de plus de fruits, de légumes, de produits laitiers et d'eau. Or, ces derniers aliments sont potentiellement majoritairement contaminés par les ions perchlorate et peuvent donc contribuer à majorer l'exposition (tableau 23 et 24) (50).

De plus, l'alimentation représente une part non négligeable dans l'exposition aux ions perchlorate de toute la population. Mieux connaître l'étendue de la contamination permettra de mieux appréhender la problématique, de diminuer l'exposition et permettra de pouvoir mener des évaluations de risques plus précises pour les populations dites sensibles aux ions perchlorate et la population générale. Pour améliorer la recherche, le CES « Eaux » et le GT ERS EDCH proposent des recommandations pour mieux encadrer les futures études épidémiologiques portant sur les ions perchlorate :

- Recueillir les données individuelles d'expositions via le dosage de la TSH, de la T4 libre, mais également le statut iodé et ferrique, qui peuvent avoir des effets sur les paramètres biologiques thyroïdiens,
- Rechercher des co-expositions, comme les ions thiocyanates, nitrates et chlorates potentiellement goitrigènes (50).

Groupes et sous-groupes d'aliments	HB	HH
	Moyenne de contamination (\pm ET ¹)	Moyenne de contamination (\pm ET)
Pâtes	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$
Riz et blé dur ou concassé	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$
Autres céréales	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$
Viennoiserie	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$
Biscuits sucrés ou salés et barres	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$
Pâtisseries et gâteaux	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$
Lait	3,3 $\mu\text{g.L}^{-1}$ ($\pm 0,1$)	3,5 $\mu\text{g.L}^{-1}$ ($\pm 0,0$)
Ultra-frais laitier	3,2 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ ($\pm 0,0$)	3,5 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ ($\pm 0,0$)
Fromages	3,2 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ ($\pm 0,0$)	3,5 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ ($\pm 0,0$)
Œufs et dérivés	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$
Beurre	3,2 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ ($\pm 0,0$)	3,5 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ ($\pm 0,0$)
Huile	0 $\mu\text{g.L}^{-1}$	0 $\mu\text{g.L}^{-1}$
Margarine	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$
Autres graisses	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$
Viandes	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$
Volaille et gibier	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$
Abats	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$
Charcuterie	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$
Poissons	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$
Crustacés et mollusques	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$
Légumes (hors pommes de terre)	27,9 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ ($\pm 74,1$)	28,5 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ ($\pm 74,1$)
<i>Légumes racines</i>	2,9 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ ($\pm 0,1$)	3,5 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ ($\pm 0,2$)
<i>Légumes feuilles</i>	94,4 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ ($\pm 159,0$)	94,7 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ ($\pm 159,0$)
<i>Légumes fruits</i>	8,0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ ($\pm 3,5$)	8,3 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ ($\pm 3,4$)
<i>Légumes tiges</i>	3,0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ ($\pm 3,0$)	4,0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ ($\pm 2,3$)
<i>Choux</i>	13,6 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ ($\pm 30,5$)	14,9 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ ($\pm 29,9$)
<i>Champignons</i>	36,5 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ ($\pm 0,0$)	36,9 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ ($\pm 0,0$)
<i>Haricots verts et petits pois</i>	10,3 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ ($\pm 7,0$)	10,7 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ ($\pm 7,1$)
<i>Mélange de légumes</i>	36,5 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ ($\pm 0,0$)	36,9 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ ($\pm 0,0$)
Pommes de terre et apparentés	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$
Légumes secs	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$
Fruits	4,4 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ ($\pm 2,0$)	6,2 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ ($\pm 1,9$)
Fruits secs et graines oléagineuses	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ ($\pm 0,0$)	2,0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ ($\pm 0,0$)
Chocolat	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$
Sucres et dérivés	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$
Boissons fraîches sans alcool	4,6 $\mu\text{g.L}^{-1}$ ($\pm 9,6$)	5,3 $\mu\text{g.L}^{-1}$ ($\pm 9,4$)
<i>Jus de fruits</i>	3,2 $\mu\text{g.L}^{-1}$ ($\pm 0,9$)	3,8 $\mu\text{g.L}^{-1}$ ($\pm 0,9$)
<i>Nectars</i>	0 $\mu\text{g.L}^{-1}$ ($\pm 0,0$)	0,5 $\mu\text{g.L}^{-1}$ ($\pm 0,0$)
<i>Boissons aux fruits</i>	4,2 $\mu\text{g.L}^{-1}$ ($\pm 0,0$)	4,9 $\mu\text{g.L}^{-1}$ ($\pm 0,0$)
<i>Sodas et colas</i>	16,8 $\mu\text{g.L}^{-1}$ ($\pm 19,5$)	17,6 $\mu\text{g.L}^{-1}$ ($\pm 18,9$)

Tableau 23 : Concentrations moyennes des aliments en ions perchlorate estimées selon deux scénarios par groupes ou sous-groupes d'aliments (étude INCA2 entre 2014 et 2017). Les deux scénarios correspondent à des recommandations de l'OMS (2003) dans le cadre d'évaluation de risque sanitaire, soit l'hypothèse basse (HB) et l'hypothèse haute (HH). Le scénario HB correspond au scénario minimaliste (données de censure remplacées par zéro, les données de censures correspondent aux concentrations non détectées, inférieures à la limite de détection ou de quantification (LQ)), et le scénario HH correspond au scénario maximaliste (données de censure remplacées par la limite de détection du laboratoire, généralement 0,4 $\mu\text{g/L}$) (19) (50) (144)

Groupes et sous-groupes d'aliments	HB	HH
	Moyenne de contamination (\pm ET ¹)	Moyenne de contamination (\pm ET)
<i>Autres boissons fraîches</i>	0,6 $\mu\text{g.L}^{-1}$ (\pm 0,2)	1,6 $\mu\text{g.L}^{-1}$ (\pm 0,1)
Boissons alcoolisées	0,3 $\mu\text{g.L}^{-1}$ (\pm 0,7)	0,4 $\mu\text{g.L}^{-1}$ (\pm 1,1)
<i>Vin</i>	0 $\mu\text{g.L}^{-1}$	0 $\mu\text{g.L}^{-1}$
<i>Bière</i>	2,0 $\mu\text{g.L}^{-1}$ (\pm 0,0)	3,2 $\mu\text{g.L}^{-1}$ (\pm 0,0)
<i>Cidre</i>	0 $\mu\text{g.L}^{-1}$	0 $\mu\text{g.L}^{-1}$
<i>Spiritueux et vins cuits</i>	0 $\mu\text{g.L}^{-1}$	0 $\mu\text{g.L}^{-1}$
<i>Cocktails et mélanges</i>	0 $\mu\text{g.L}^{-1}$	0 $\mu\text{g.L}^{-1}$
Boissons chaudes	26,8 $\mu\text{g.L}^{-1}$ (\pm 59,6)	27,0 $\mu\text{g.L}^{-1}$ (\pm 60,1)
<i>Cacao, poudres et boissons cacaoées</i>	0 $\mu\text{g.L}^{-1}$	0 $\mu\text{g.L}^{-1}$
<i>Chicorée et poudre maltée</i>	0 $\mu\text{g.L}^{-1}$	0 $\mu\text{g.L}^{-1}$
<i>Thé et infusion (feuilles séchées)</i>	147,2 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ (\pm 9,1)	148,5 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ (\pm 10,5)
Condiments et Sauces	25,0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ (\pm 50,0)	25,1 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ (\pm 50,0)
<i>Sauces</i>	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$
<i>Herbes aromatiques</i>	77,0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ (\pm 52,7)	77,2 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ (\pm 52,4)
<i>Sel et épices</i>	92,4 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ (\pm 68,1)	92,5 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ (\pm 68,2)
<i>Condiments d'accompagnement</i>	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$
<i>Condiments d'assaisonnement</i>	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$
Aliments destinés à une alimentation particulière	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$	0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$

Tableau 24 : Concentrations moyennes en ions perchlorate estimées selon deux scénarios par groupes ou sous-groupes d'aliments (étude INCA2 entre 2014 et 2017). Les deux scénarios correspondent à des recommandations de l'OMS (2003) dans le cadre d'évaluation de risque sanitaire, soit l'hypothèse basse (HB) et l'hypothèse haute (HH). Le scénario HB correspond au scénario minimaliste (données de censure remplacées par zéro, les données de censures correspondent aux concentrations non détectées, inférieures à la limite de détection ou de quantification (LQ)), et le scénario HH correspond au scénario maximaliste (données de censure remplacées par la limite de détection du laboratoire, généralement 0,4 $\mu\text{g/L}$) (50) (19) (144)

Finalement, l'Anses met l'accent, dans son dernier rapport (50), sur la récente mise en avant du perchlorate de sodium dans une évaluation allemande (2016) (145), réalisée dans le cadre du règlement européen « Reach » (146). Elle conclue à l'existence d'effets, prouvés, sur la santé de l'ion perchlorate de sodium, via la perturbation du système endocrinien. Elle propose d'étudier plus assidûment cette substance via le processus d'identification de substances extrêmement préoccupantes « Substance of very high concern » (SVHC).

Les autorités sanitaires allemandes recommandent la mise en place de données de surveillance dans l'Union Européenne afin de gérer au mieux la présence de cet élément indésirable, notamment via des restrictions d'usages et l'interdiction éventuelle de nouvelles émissions d'ions perchlorate dans l'environnement.

1.3. Les plans nationaux

Des plans nationaux sont mis en place en France dans le but de réduire l'impact des altérations de l'environnement sur la santé. Ce sont les « Plan National Santé Environnement » (PNSE), mis en place par le ministère de la transition écologique et solidaire. Leur rôle est d'établir une feuille de route gouvernementale

sur cinq ans. Le premier PNSE ayant été établi de 2004 à 2008, puis le PNSE 2 de 2009 à 2013, c'est le PNSE 3 qui est effectif de nos jours, depuis 2015 jusque fin 2019. L'an prochain débutera le PNSE 4, de 2020 à 2024.

Ces plans gouvernementaux étudient de multiples facteurs déterminants dans le domaine de la santé, comme la qualité des milieux (air, eau, sol...), leurs contaminants (biologiques, chimiques ou physiques), ainsi que les changements environnementaux (biodiversité, climat) : « En effet, il est avéré que certaines pathologies sont aggravées, voire déterminées, par l'environnement. Toutefois, de nombreuses incertitudes demeurent. L'approfondissement des connaissances sur le rôle de l'environnement sur la santé constitue donc un enjeu scientifique majeur » (147).

Le plan actuellement en place, le PNSE 3, aborde un ensemble d'actions ciblées sur l'eau. En effet, l'un des objectifs principaux est d'améliorer la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine. Les ions perchlorate sont évoqués dans l'action 32 : « surveiller les substances émergentes prioritaires dans les milieux aquatiques et les captages d'eau destinée à la consommation humaine (perchlorate, bisphénol A et substances de la famille des nitrosamines, parabènes et phtalates) » (148). Il y est recommandé la mise en place au niveau local de plans spécifiques pour sécuriser l'alimentation en eau potable, ainsi que la surveillance accrue des substances émergentes dans l'eau, dont font partie les ions perchlorate (149).

Les actions du PNSE 4 seront dévoilées début 2020. Il est question dans l'évocation de ses axes principaux de : « Réduire les expositions environnementales affectant notre santé : la réduction des expositions environnementales est une priorité permanente, compte tenu du nombre important et croissant de pathologies induites par la dégradation de l'environnement dans lequel nous évoluons au quotidien. La qualité de l'air intérieur est ainsi proposée comme thème prioritaire emblématique du PNSE 4, au vu des attentes sociétales concernant cet enjeu » (150).

Il serait surprenant, en voyant l'accent porté des précédents PNSE sur la réduction des expositions environnementales, de voir les ions perchlorate disparaître de la feuille de route gouvernementale.

D'autant plus que les PNSE ont permis la mise en place d'un autre plan, le Plan « micro-polluants 2016-2021 », ciblé sur la préservation de la qualité des eaux et la biodiversité. Il a été mis en place par les ministères : de l'environnement, de l'énergie et de la mer ; des affaires sociales et de la santé ; de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt. Il fait suite au « Plan micro-polluants » établi à partir de 2012, qui ciblait environ 100 000 molécules, afin de mettre en place des stratégies hiérarchisées et centrées sur les molécules les plus préoccupantes. Les plans « micro-polluants » et les PNSE ont des articulations communes (tableau 25). Le plan « micro-polluants » actuellement en place, cible les ions perchlorate dans deux actions :

- L'action 26 : « Mener une surveillance prospective sur des molécules émergentes dans les rivières, nappes et eaux littorales et dans les eaux destinées à la consommation humaine » (151)

- L'action 28 : « Etablir une cartographie des eaux souterraines impactées par les ions perchlorate d'origine agricole et ceux issus de la destruction des munitions des grandes guerres et définir d'éventuels cortèges de micro-polluants associés » (151). Ces deux actions vont permettre, tout d'abord via l'action 26, de quantifier les

ions perchlorate dans l'eau et d'estimer l'intérêt de les inscrire dans la liste des substances à surveiller dans les eaux souterraines et de surface du réseau de surveillance des agences et entreprises de l'eau. Secondairement, l'action 28 va permettre d'élargir les connaissances sur la répartition géographique des ions perchlorate, le caractère diffus ou non de la répartition selon les régions va ainsi permettre de différencier les pollutions d'origines militaires de celles d'origine agricole ou industrielles, mais cela va également permettre de définir d'éventuels cortèges de micro-polluants associés.

Action du PNSE 3	Action du plan micropolluants
Actions couvertes en totalité	
Action 32 : Surveiller les substances émergentes prioritaires dans les milieux aquatiques et les captages d'eau destinée à la consommation humaine (perchlorates, bisphénol A et substances de la famille des nitrosamines, parabènes et phtalates)	Action 26 : Organiser la surveillance prospective sur des molécules émergentes dans les rivières, nappes et eaux littorales et dans les eaux destinées à la consommation humaine
Action 54 : mieux prendre en compte le caractère perturbateur endocrinien dans la définition des valeurs guides environnementales pour les micropolluants qui sont aussi perturbateurs endocriniens dans les milieux aquatiques	Action 34 : Construire des valeurs de référence et des méthodologies pour mieux juger la qualité des eaux de surface et souterraines prenant en compte les perturbateurs endocriniens et les métabolites pertinents
Action 46 : travailler sur la disponibilité et le partage de données permettant de connaître le danger et l'exposition pour les résidus de médicaments humains et vétérinaires dans les eaux	Action 31 : Travailler sur la disponibilité et le partage de données permettant de connaître le danger et l'exposition pour les résidus de médicaments humains et vétérinaires dans les eaux
Actions couvertes en partie	
Action 33 : réaliser un suivi post-AMM pour les produits phytopharmaceutiques et les métabolites pertinents contenant des substances actives pour lesquelles il n'existe pas de méthodes d'analyses courantes en France et pour lesquelles le seuil de quantification est supérieur à la « concentration avec effet » déterminée par l'INERIS en appui à la mise en œuvre de la directive cadre sur l'eau	Action 36 : Identifier les métabolites des produits phytopharmaceutiques et évaluer les capacités analytiques des laboratoires pour permettre une mise sous surveillance précoce
Action 44 : faciliter l'accès et l'utilisation des données d'exposition	Action 12 : Améliorer l'information sur l'état des masses d'eau de surface (refonte de la toile Eaufrance, site Naiades) Action 23 : Utiliser, à des fins de connaissance de l'état initial et des tendances de contamination des milieux aquatiques, les banques d'échantillons environnementaux
Action 56 : mettre en œuvre la protection des captages utilisés pour l'alimentation en eau potable (AEP) contre les pollutions accidentelles et les pollutions diffuses (suite de l'action 28.1 du PNSE 2)	Action 10 : Protéger 1000 captages prioritaires vis-à-vis des nitrates ou des pesticides pour contribuer à la protection de la ressource en eau
Action 60 : réaliser des travaux de validation des modèles de transferts en les focalisant sur des substances à fort enjeu sanitaire (exemple : éléments traces métalliques, PCB)	Action 24 : Mieux connaître les niveaux d'imprégnation des milieux aquatiques par des polluants à enjeux et mieux comprendre les transferts de ces polluants entre les différents compartiments de l'environnement

Tableau 25 : Articulations entre le PNSE 3 et le plan micropolluants 2016-2021 (151)

2. Les arrêtés préfectoraux en France : vers une uniformisation de la réglementation ?

2.1. Une exception régionale

La DGS et l'Anses recommandent donc de ne pas consommer d'eau présentant des concentrations en ions perchlorate supérieures à 4 µg/L pour les nourrissons de moins de 6 mois et de ne pas consommer d'eau présentant des concentrations en ions perchlorate supérieures à 15 µg/L pour les femmes enceintes.

Or, ces recommandations n'imposent pas de restrictions, et cette nuance s'observe sur le territoire français. Le Nord et le Pas-de-Calais sont les deux seuls départements à avoir pris un arrêté de restriction de consommation concernant la présence des ions perchlorate dans l'EDCH. Ces deux départements ne sont pourtant pas les seuls à présenter des concentrations supérieures aux recommandations dans leurs eaux distribuées, comme il a pu être observé dans les parties précédentes de cette thèse.

Ces arrêtés de consommation ont été établis le 25 octobre 2012 dans le Nord et le Pas-de-Calais (Annexes 3, 4, 5, 6). Ils précisent la restriction d'usage de l'EDCH distribuée par les réseaux publics pour l'alimentation des nourrissons de moins de 6 mois et des femmes enceintes, lorsque les concentrations en ions perchlorate observées dans l'EDCH distribuée dépassent les 4 µg/L et 15 µg/L respectivement. Ces arrêtés ont ainsi établi, en octobre 2012, une restriction de consommation dans 205 communes du Nord, avec 31 communes présentant des concentrations supérieures à 15 µg/L (exemple : Flesquieres) et 192 avec des concentrations supérieures à 4 µg/L (exemple : Valenciennes, Hazebrouck Dunkerque, Douai, Cambrai).

Dans le Pas-de-Calais, 338 communes sont concernées, avec 89 communes présentant des concentrations supérieures à 15 µg/L (exemple : Carvin, Henin Beaumont) et 249 communes avec des concentrations supérieures à 4 µg/L (exemple : Arras, Lens, Vimy).

La métropole Lilloise était alors encore épargnée par ces restrictions, et suite à ces arrêtés, peu de moyens techniques ont été mis en place par les autorités communales, départementales ou les « communautés urbaines ». De plus, l'élimination des ions perchlorate coûte entre 10 et 20 centimes supplémentaires par m³, se pose alors la question de la prise en charge (152).

L'information a cependant été relayée, par les communes et via les journaux locaux qui ont produit des articles sur le sujet pour compléter l'information. Cependant, face à ce manque de moyens mis en place, le sujet a été oublié pour la plupart des habitants des Hauts-de-France, comme le met en avant un article de la Voix-du-Nord du 14 mars 2018 (153), qui rebondit sur son précédent article du 28 janvier 2016 (152), faisant état du manque d'avancement des moyens mis en place pour supprimer la présence des ions perchlorate, malgré les concentrations pourtant importantes dans les Hauts-de-France. L'article déplore que l'unique information apportée par la plupart des communes à leurs habitants soit « une phrase à la fin des factures » (153), trop peu souvent lue.

Une mise à jour des restrictions a été établie en 2013 avec la levée de 7 restrictions de consommation, pour des communes qui présentent donc une concentration inférieure à 4 µg/L d'ions perchlorate dans l'EDCH distribuée, et une

commune est passée d'une restriction chez les femmes enceintes et les nourrissons à une restriction concernant uniquement les nourrissons (annexe 7). Le nombre de communes concernées par la restriction a cependant été récemment revu à la hausse.

2.2. Une problématique régulièrement ré-évaluée

Les ions perchlorate sont régulièrement mis en avant auprès de l'assemblée nationale, avec une question déposée le 28 mai 2019, au ministère des solidarités et de la santé, qui a obtenu une réponse le 27 août 2019 (154). La question posée fait référence à la ré-évaluation des risques sanitaires liés à la présence d'ions perchlorate dans les EDCH du 26 décembre 2018 par l'Anses. L'auteur, D. Houbron (député République en marche), fait suite à ces précédentes questions déposées en 2018 et 2017 sur « l'absence d'avis de l'Anses sur la présence d'ions perchlorate dans les EDCH » (155) et sur « la présence d'ions perchlorate dans le réseau d'eau potable du Douaisis » (156).

Le député demande l'adaptation de la gestion des situations de présence des ions perchlorate dans les EDCH, notamment via la généralisation des restrictions à l'ensemble du territoire français. De plus, l'auteur s'inquiète de la persistance du « flou sanitaire » qui persiste depuis 2012, quant à l'effet néfaste sur la santé des ions perchlorate, qui empêche toute prise de mesures auprès des autorités sanitaires : « Il déplore, malgré l'affirmation de l'incertitude de l'ANSES, que cette dernière préconise tout de même une concentration limitée pour les ions perchlorate dans l'EDCH de 15 µg/L pour les adultes alors que parallèlement l'Organisation mondiale de la santé établit cette concentration à 70 µg/L.

Il lui demande donc de bien vouloir informer les citoyens sur la valeur d'ions perchlorate qui serait à préconiser de manière univoque dans l'EDCH, et de bien vouloir clarifier le flou sanitaire en adaptant si nécessaire les modalités de gestion des situations de présence d'ions perchlorate dans l'EDCH » (154).

La réponse apportée par le ministère des solidarités et de la santé à l'assemblée nationale précise qu'à ce jour, aucune limite réglementaire n'est établie pour les ions perchlorate dans les EDCH ou dans les eaux brutes destinées à la production d'EDCH, tant en termes d'analyses qu'en termes d'exigence de qualité, que ce soit au niveau national ou européen.

Il y est rappelé que relativement à l'article R. 1321-17 du CSP, le directeur de l'ARS peut faire effectuer, via le contexte local, des analyses des ions perchlorate par la personne responsable de la production ou de la distribution, d'où les recherches effectuées dans les Hauts-de-France.

Cependant, il y est aussi mention de la non introduction d'exigences de qualité concernant les ions perchlorate lors de la révision de la directive 98/83/CE de la commission européenne. Néanmoins des négociations seraient en cours au sein de l'union européenne et du parlement européen pour la mise en place d'une liste de vigilance pour certains paramètres tels les ions perchlorate. Pour conclure sa réponse, le ministère des solidarités et de la santé évoque le fait que l'US EPA propose de retenir une valeur de gestion des ions perchlorate dans les EDCH de 56 µg/L, et que face à ces nouveaux éléments la DGS avait saisi à nouveau l'Anses le 25 juin 2019 afin qu'elle ré-évalue les risques sanitaires potentiels des ions perchlorate, finalement, elle rappelle que les recommandations de la DGS sont maintenues.

Ces échanges parlementaires témoignent de l'absence d'unification nationale sur la question des ions perchlorate, mais aussi du « flou sanitaire » posé par ces derniers. Les organismes scientifiques peinent à se mettre d'accord sur une valeur fixe de restriction, ce qui freine d'autant plus, sans évoquer l'aspect financier, la mise en place de solutions pour éliminer la présence des ions perchlorate de l'EDCH.

2.3. L'impact climatique : un nouveau paramètre à prendre en compte dans la problématique des ions perchlorate

Ces dernières informations renvoient donc vers une nouvelle attente pour conclure ou prendre position quant à une possible uniformisation de la réglementation des ions perchlorate en France.

Or, s'il était observé une stagnation, voire même une régression du phénomène, notamment grâce à l'utilisation de la technique de dilution des eaux par les distributeurs d'eau, un nouveau facteur a depuis la rentrée de septembre 2019 remis les ions perchlorate dans la lumière des médias (157). En effet, depuis le 17 septembre 2019, la métropole lilloise fait face à l'extension du nombre de restrictions de consommation de l'EDCH pour les nourrissons de moins de 6 mois, sur un ensemble de communes (158).

Cette extension est, entre autres, due à la sécheresse observée depuis 3 ans dans le Nord de la France. Ces conditions climatiques ont, en effet, imposé au producteur d'eau de puiser plus intensivement dans les nappes phréatiques, conduisant à une diminution préoccupante de leur niveau. Pour pallier à ce problème, le producteur d'eau a choisi de diversifier les sources d'approvisionnement en eaux brutes, notamment via la mobilisation d'autres forages situés au sud de la métropole lilloise, forages qui présentaient des traces d'ions perchlorate, de l'ordre de 4 µg/L. L'approvisionnement était auparavant réparti entre la rivière de la Lys qui représentait un quart de l'apport, une nappe carbonifère au nord de la métropole à hauteur d'un quart également, et le reste dans la nappe phréatique au sud de la métropole (159).

Ceci a conduit la Métropole Européenne de Lille (MEL), en lien avec l'ARS, à appliquer le principe de précaution quant à la restriction de la consommation d'eau du robinet à des fins alimentaires pour les nourrissons de moins de 6 mois, dans 74 communes (comme Lille, Lambersart, Armentières ou encore Tourcoing...) sur les 90 communes que compte la métropole lilloise (figure 32). La concentration en ions perchlorate dans l'eau distribuée dans les communes concernées dépasse désormais les 4 µg/L depuis le 17 septembre 2019.

Sécheresse historique sur la métropole

**Restriction de la consommation d'eau du robinet
pour les nourrissons de moins de 6 mois**

Un arrêté préfectoral, pris en octobre 2012, recommande, pour les nourrissons de moins de 6 mois, une restriction de l'utilisation d'eau potable à des fins alimentaires, dès qu'elle présente une teneur en perchlorates supérieure à 4 microgrammes par litre.

Sur le territoire de la Métropole Européenne de Lille, ce seuil n'a jusqu'à présent pas été atteint. Néanmoins, trois années de sécheresse consécutives ont conduit à un abaissement historique du niveau des nappes phréatiques. Devant cette situation, les différents acteurs du service de l'eau de la Métropole Européenne de Lille ont mis en œuvre, dès le mois de janvier 2019, des actions visant à sécuriser la ressource via, notamment, une diversification des sources d'approvisionnement.

Le territoire métropolitain ayant de nouveau connu un été sec et chaud avec des consommations d'eau élevées, la MEL a décidé de mobiliser des forages situés au sud de la métropole pour lesquels la présence de traces de perchlorates est identifiée. A partir de cette date, une eau dont la teneur dépasse le seuil de recommandation de 4 microgrammes par litre pourrait être distribuée sur les communes de la MEL.

Ainsi, à compter du mardi 17 septembre 2019, la Métropole Européenne de Lille, autorité organisatrice de l'eau en lien avec les services de l'Etat et l'Agence Régionale de Santé, recommande en application du principe de précaution, une restriction de la consommation d'eau du robinet à des fins alimentaires pour les nourrissons de moins de 6 mois (consommation d'eau dans les biberons). Cette recommandation porte sur 74 des 90 communes que compte la métropole.

Ne sont pas concernées :

- Aubers, Bois-Grenier, Erquinghem-Lys, Escobecques, Fromelles, Hantay, Herlies, Illies, La Bassée, Le Maisnil, Marquillies, Radinghem-en-Weppes, Sainghin-en-Weppes, Salomé, Wicres alimentées exclusivement par le champ captant d'Illies Marquillies
- Bouvines alimentée exclusivement par le champ captant du Pévèle

« Pour garantir la santé et la sécurité des métropolitains, la MEL applique le principe de précaution. Il n'y a pas lieu de s'inquiéter plus que de mesure mais il est nécessaire de protéger les nourrissons dans cette période particulière », déclare Alain Detournay, Vice-Président en charge de l'eau à la Métropole Européenne de Lille.

L'origine des perchlorates

Les perchlorates ont été identifiés dans l'eau du robinet de plusieurs régions françaises dès 2011. L'hypothèse principale, compte-tenu du passé historique de la région, est que cette présence de perchlorates provienne des nombreuses munitions tirées lors de la Première Guerre mondiale. Les perchlorates se sont infiltrés dans le sol et sont aujourd'hui présents dans certaines nappes phréatiques. C'est le cas pour le secteur sud de la nappe de la Craie qui alimente la métropole.

Application du principe de précaution

Les restrictions d'usage décidées sont liées à l'application d'un principe de précaution. Elles ne concernent que les consommations alimentaires d'eau pour les nourrissons de moins de 6 mois.

Figure 32 : Communiqué de presse de la MEL portant sur la restriction de consommation liée aux ions perchlorate (160). La seconde partie du communiqué de presse précise : « Il est possible, sans aucun risque, de se laver les dents, prendre une douche, faire la vaisselle de toute la famille (y compris laver les biberons), laver le linge, etc. L'eau reste potable, les ions perchlorate ne faisant pas partie des paramètres réglementaires définissant la potabilité de l'eau. La durée de cette recommandation de restriction de consommation pour les nourrissons de moins de 6 mois dépendra de la recharge des nappes phréatiques. A ce jour, les prévisions météorologiques pour les prochains jours annoncent une pluviométrie faible. La Métropole Européenne de Lille communiquera sur la levée de cette restriction. Les communes et les distributeurs d'eau (iléo et Noréade) ont été informés de cette recommandation. Pour rappel, l'eau du robinet demeure le produit alimentaire le plus contrôlé en France. »

Ce nouveau facteur à connotation environnementale impose alors de s'interroger sur la nécessité de la mise en place à court ou moyen terme de moyens techniques afin d'éliminer, ou de contenir, la présence des ions perchlorate dans les EDCH.

3. Les moyens d'élimination des ions perchlorate dans les EDCH

Comme il a été présenté dans les parties précédentes de cette thèse, les moyens généralement mis en place par les entreprises distributrices et de traitement de l'EDCH sont la substitution, l'interconnexion des réseaux et la dilution de ressources. Cependant, si ces méthodes palliatives ont permis de contenir la pollution des ions perchlorate, les dernières restrictions de consommation observées dans la métropole lilloise, qui résultent en partie du changement climatique, imposent de se tourner vers des solutions d'élimination des ions perchlorate de l'EDCH.

En 2011, l'Anses concluait dans une saisine : « Il n'existe pas de procédé de traitement vraiment satisfaisant et efficace permettant l'élimination des ions perchlorate des eaux destinées à la consommation humaine. » (63). Les recherches ont avancé depuis, et un certain nombre de procédés sont actuellement en cours d'étude et de développement. Cependant, plusieurs freins ralentissent l'échéance de leur mise en service.

3.1. Les freins à la mise en place des procédés d'élimination des ions perchlorate de l'EDCH

La première contrainte posée par l'utilisation d'un quelconque procédé d'élimination des ions perchlorate est l'assurance de son innocuité. Les procédés destinés aux traitements de l'EDCH sont encadrés par l'article R.1321-50-I du CSP, qui précise : « les produits et procédés mis sur le marché et destinés au traitement de l'eau destinée à la consommation humaine doivent, dans les conditions normales ou prévisibles de leur emploi, être conformes à des dispositions spécifiques définies par arrêté du ministre chargé de la santé visant à ce que :

- ils ne soient pas susceptibles, intrinsèquement ou par l'intermédiaire de leurs résidus, de présenter directement ou indirectement un danger pour la santé humaine ou d'entraîner une altération de la composition de l'eau définie par référence à des valeurs fixées par cet arrêté,

- ils soient suffisamment efficaces. » (161).

L'article R.1321-50-I du CSP encadre également les dispositions et démarches nécessaires à la mise sur le marché de procédés destinés au traitement de l'EDCH, que ce soit pour éliminer les ions perchlorate ou non.

La personne morale en charge du développement du procédé doit au préalable déposer un dossier au ministre en charge de la santé. Le dossier sera soumis à l'Anses, qui va alors estimer l'efficacité du procédé ainsi que son innocuité. L'avis favorable de l'Anses est indispensable pour espérer la mise sur le marché du procédé.

Des dispositions spécifiques, définies par arrêté du ministre chargé de la santé, visent à ce que tous procédés ou produits de traitement en contact avec l'eau ne soient pas susceptibles, dans les conditions normales ou prévisibles de leur emploi, de présenter un danger pour la santé humaine ou d'entraîner une altération de la composition de l'eau définie par référence à des valeurs fixées par cet arrêté.

L'agrément d'un procédé est d'autant plus complexe qu'il doit, dans le cas des procédés destinés à éliminer les ions perchlorate de l'EDCH et notamment pour les procédés membranaires, être efficace avec les ions perchlorate, mais également avec d'autres composés afin de justifier sa mise en place. Les autres composés visés sont en général le nickel, le sélénium et les chlorures. Ces paramètres sont encadrés par l'article R. 1321-50-IV du CSP.

De plus, les procédés doivent aussi être testés avec les différents types d'eau auxquels ils seront soumis, notamment avec des eaux fortement et faiblement minéralisées.

Le second frein, qui intervient dans la mise en place des procédés d'élimination des ions perchlorate, est le coût de revient de ces procédés.

Les coûts n'ont pas encore tous été estimés, mais il a été établi par exemple qu'un traitement à base de résine échangeuse d'ions reviendrait au minimum entre 10 et 20 centimes supplémentaire par m³ d'eau traitée (152).

Cependant, avant même d'aborder la question du coût hypothétique de tels procédés, il est nécessaire de s'interroger sur la prise en charge financière de ce coût. Qui, des organismes de traitement de l'eau, des communes, des organismes régionaux ou encore de l'état français devrait assumer les conséquences économiques de cette pollution ? En général, les sociétés de traitement de l'eau privilégient dans toute gestion de ressource les actions préventives aux actions curatives (162), or la pollution par les ions perchlorate, notamment dans les Hauts-de-France pourrait résulter d'une pollution historique et le principe du « pollueur-payeur » pourrait être évoqué quant à la responsabilité de l'état français et de l'état allemand dans la problématique.

De plus, avec l'absence d'uniformisation nationale sur la question des ions perchlorate, des régions comme le Nord ou le Pas-de-Calais devraient déployer des dispositifs de traitements des ions perchlorate dans leurs usines de traitements de l'EDCH, avec les coûts et contraintes que cela impose, alors que d'autres régions comme la Somme ou l'Aisne ne mettraient aucun dispositif en place.

Le dernier frein à évoquer porte sur la notion de risque dit acceptable. Le risque dit acceptable est le compromis, dans le référentiel du traitement de l'EDCH, entre un coût réaliste et un risque mesuré (162). Or, les recommandations qui concernent les ions perchlorate de 4 et 15 µg/l ont été fixées dans un but protecteur, les connaissances scientifiques actuelles ne permettant pas de se prononcer pour les risques sanitaires réels auxquels expose la présence des ions perchlorate dans l'EDCH. La question se pose donc quant à la nécessité de mettre en place des procédés d'élimination des ions perchlorate de l'EDCH en France, alors qu'il n'y a pas, réglementairement, de normes de consommation restrictives fixées, ni sur le territoire français par le gouvernement, ni au niveau mondial par l'OMS.

3.2. Les méthodes d'élimination reposant sur des principes physiques

3.2.1. Les résines échangeuses d'ions

Les résines échangeuses d'ions font partie des procédés les plus efficaces pour éliminer les ions perchlorate de l'EDCH (163).

L'échange d'ion est dit stœchiométrique, c'est à dire qu'un ion quittant la résine doit être remplacé par un ion équivalent au niveau de la solution afin de préserver

l'électro-neutralité de la résine et de la solution. C'est un procédé que l'on retrouve classiquement dans les « adoucisseurs d'eau », qui utilisent une résine échangeuse d'ions chargée généralement en sodium (Na^{2+}) dans le but de remplacer les ions calciums (Ca^{2+}) et magnésiums (Mg^{2+}), responsables de la dureté de l'eau.

La résine échangeuse d'ion est composée d'un groupe fonctionnel, qui est une matrice insoluble portant des groupes chargés, et d'ions mobiles solubles de charge opposée.

Si une résine est composée de groupes fonctionnels positifs, les ions échangés seront alors négatifs, et l'on pourra alors qualifier la résine d'échangeuse d'anions.

A l'inverse, une résine constituée d'un groupe fonctionnel négatif échangeant des ions positifs pourra être qualifiée de résine échangeuse de cations. Les matrices sont en général à base de silicates d'alumine, de résines synthétiques ou encore de polysaccharides (163) (164). L'utilisation des résines échangeuses d'ion implique l'utilisation d'un régénérant, récupérant les ions captés pour les remplacer par les ions de base de la résine, afin de continuer son utilisation.

Les résines actuellement utilisées et agréées en France ne sont pas spécifiques des ions perchlorate. Arrivent cependant à l'étude des résines anioniques sélectives des ions perchlorate, grâce à des groupes ammonium quaternaires, avec un régénérant efficace, l'ion ferrate (FeCl_4^-) (63).

Les résines échangeuses d'ions à base de polymères de tiges de maïs modifiés par des fonctions amines $\text{N}(\text{CH}_3)_3$, ainsi que des groupes Fe_4 et ayant une capacité importante de captage des ions perchlorate dans l'eau sont également à l'étude (165).

Cependant ni ce genre de résines, ni leurs régénérants n'ont pour l'instant été agréés par l'Anses et le ministère de la santé. Ayant pourtant été considérées comme l'une des méthodes les plus prometteuses par Ye et al. (2012) (2), les résines échangeuses d'ions comportent néanmoins des inconvénients, notamment leur prix élevé, la gestion après traitement des concentrats et régénérats, puis le manque de sélectivité des résines, les ions co-existants dans l'eau affectant l'élimination des ions perchlorate (163).

Pour illustrer les difficultés d'obtention d'agrément pour l'utilisation de procédés de traitement des ions perchlorate en France, l'avis de l'Anses, qui a été requis en 2016 par la DGS peut servir d'exemple. L'avis de l'Anses a en effet été requis sur l'utilisation, dans le but d'éliminer les ions perchlorate de l'EDCH en France, de la résine échangeuse d'anions chlorure (Cl « Amberlite™ PWA5 », habituellement utilisée dans le traitement des nitrates de l'EDCH (166).

L'avis rendu par le CES « eaux », conclut que, dans les conditions d'utilisation précisées par l'étude de Darracq et al. (2014) (167), la résine a effectivement un potentiel de rétention des ions perchlorate. Cependant, le CES et l'Anses ont émis un avis défavorable quant à son utilisation pour traiter les ions perchlorate par manque de preuves justifiant l'efficacité de la résine pour le traitement des ions perchlorate dans les conditions de production d'eau destinée à la consommation humaine.

De nouveaux tests d'efficacités ont été demandés, démontrant notamment l'efficacité de la résine « Amberlite™ PWA5 » dans les conditions réelles d'utilisation de la résine, avec des eaux de caractéristiques physico-chimiques différentes en termes de concentrations en anions et matières organiques.

Ont également été demandées des informations plus précises sur la mise en œuvre de la résine dans les filières de traitement notamment concernant sa position d'implantation dans la filière et ses limites d'utilisation, ainsi qu'une définition précise des conditions de pré-traitement de la résine. De nouveaux résultats n'ont toujours pas été publiés depuis.

3.2.2. Les procédés de filtration sur membranes

Les procédés de filtration sur membranes se divisent en 3 groupes, la filtration par osmose inverse, la nano et l'ultra-filtration, puis l'électrodialyse.

L'osmose inverse est une technique de filtration reposant sur le principe de l'osmose : transfert d'un solvant à travers une membrane semi-perméable sous l'effet d'un gradient de concentration entre deux compartiments de concentrations différentes, le transfert se faisant dans le sens du compartiment le moins concentré vers le plus concentré. Dans l'osmose inverse, le transfert a lieu dans le sens inverse, via une pression exercée dans le compartiment le plus concentré, le transfert se fait alors du compartiment le plus concentré vers le moins concentré. C'est une technique utilisée par exemple pour désaliniser l'eau de la mer et elle est souvent employée en dernier traitement d'une filière de traitement d'eau purifiée.

L'ultra-filtration est la filtration d'une solution à travers une membrane semi-perméable grâce à des pressions élevées. Les pores de la membrane sont de l'ordre de 0,006 μm , et pour la nano-filtration, les pores ont une taille inférieure à 0,001 μm . A partir d'un liquide filtré, on obtient deux fractions, le retentat ou concentrat, retenu dans le circuit, et le perméat ou filtrat, qui est le liquide ayant traversé la membrane.

Si les précédents procédés sont basés sur un gradient de pression, l'électrodialyse repose elle sur un gradient de potentiel électrique pour entraîner le flux d'un solvant à travers une membrane.

Des études ont démontré l'efficacité des procédés de filtration membranaire, avec des taux de l'ordre de 95 % pour les ions perchlorate, et ce même en présence d'autres ions dans la solution pouvant perturber la filtration (168).

Cependant, un grand nombre d'inconvénients rendent ces techniques difficilement applicables à grande échelle (163) :

- un rapide encrassement de la membrane,
- un coût élevé de la membrane à la base,
- la génération de concentrats riches en ions perchlorate à éliminer ensuite.

La technique de l'électrodialyse est plus efficace que les membranes conventionnelles pour éliminer les ions perchlorate, cependant elle requiert des coûts supplémentaires, notamment de manutention (169). De plus, les méthodes d'ultra-filtration, de nano-filtration et d'osmose inverse, filtrent en général tous les ions présents dans l'eau, l'eau obtenue est en général déminéralisée, ce qui n'est pas adapté à l'EDCH (163).

L'avis de l'Anses a également été requis sur un modèle de membrane soumis à la DGS dans le cadre de l'élimination des ions perchlorate de l'EDCH, pour une demande d'approbation du procédé « NanEau Force » utilisant des modules de filtration membranaire « Filmtec NF90B 400 » dans le traitement des ions chlorures, nickels, séléniums et perchlorate dans l'EDCH.

Un avis a été rendu en 2013 (170) demandant des essais supplémentaires, puis un autre avis a été rendu en 2014 (62) suite à de nouveaux résultats d'essais. L'avis de 2014 de l'Anses apporte un avis favorable à la demande d'approbation du procédé « NanEau Force » utilisant des modules de filtration membranaire « Filmtec NF90B 400 » dans le traitement des ions chlorures, nickels, séléniums et perchlorate dans l'EDCH.

Il faut cependant noter que malgré son approbation, l'Anses émet tout de même quelques réserves quant à l'utilisation du procédé dans les usines de traitement de l'eau. Tout d'abord, l'Anses précise que le procédé de traitement ne peut permettre d'assurer à lui seul l'élimination des ions perchlorate de l'EDCH, notamment pour l'obtention d'une concentration inférieure à 4 µg/L d'ions perchlorate.

L'agence rappelle, également qu'en cas de recours à un procédé de nanofiltration, le traitement suivant devra être un traitement de reminéralisation et de mise à l'équilibre de l'eau traitée.

L'Anses et les constructeurs de la membrane s'accordent sur la nécessité d'effectuer une étude d'impact avant de définir la filière de rejet des concentrats.

Ces résultats sont encourageants, cependant ils confirment la difficulté de développer une méthode complète d'élimination des ions perchlorate, tant du côté de l'efficacité que du côté de l'innocuité.

3.2.3. L'adsorption sur des filtres à charbon

Les filtres à charbon, également appelés filtres à charbon actif en grains (CAG), sont quotidiennement utilisés dans les stations d'épuration et autres usines de traitement de l'eau en France et dans le monde.

Les ions perchlorate, lorsqu'ils passent par un filtre à CAG peuvent s'y adsorber via des forces électrostatiques, notamment grâce à la présence dans le filtre à CAG de groupes fonctionnels oxygène, carboxyle, lactone et phénol(2). Néanmoins, l'affinité pour les ions perchlorate est faible. Cependant, cette dernière peut être augmentée via l'adjonction d'agents de surface cationiques, comme le N^o de SO₄²⁻, de Cl(171), l'hydroxyde ferrique (2), d'époxyde d'ammonium quaternaire (172), ou encore dans des études plus récentes, via l'adjonction de différents acides (tableau 26) (173), avec ou sans ajout d'écorce de noix de coco (174).

Or, si l'adjonction d'agents de surface cationiques augmente l'efficacité du procédé, elle en augmente également le coût, et elle a pour principal inconvénient d'engendrer une pollution secondaire. L'Anses a calculé qu'avec un flux de 5 m³/m²/heure, ce genre de procédé ne donnait de résultats acceptables que pendant une durée d'environ 10 jours, au-delà desquels le filtre à CAG est à changer (63).

Table 1 – Effect of acid treatment on the adsorption of perchlorate.

Sample	Adsorption capacity (mg g ⁻¹)
GAC	3.5
GAC + HCl	9.7
GAC + H ₂ SO ₄	9.1
GAC + HNO ₃	7.7
GAC + H ₃ PO ₄	9.8
GAC + Oxalic acid	5.1
GAC + Citric acid	1.4
GAC + Formic acid	9.1
GAC + Acetic acid	9.2
GAC + Tartaric acid	6.0

Tableau 26 : Capacité d'adsorption des ions perchlorate d'un filtre à CAG selon l'adjonction de différents acides (173)

Dernièrement, une étude menée par Hou et al. (2018) a démontré l'efficacité d'un filtre à CAG avec l'adjonction d'un agent de surface par procédé cationique à base d'époxyde d'ammonium quaternaire, qui n'entraînerait aucune pollution secondaire suite à l'élimination des ions perchlorate de l'eau traitée (172).

D'autres méthodes d'adsorption, utilisant des supports organiques, des matériaux inorganiques comme des nanotubes de carbone (175) et des matériaux composites comme la montmorillonite (176) (un minéral argileux composé de silicate d'aluminium et de magnésium, de la famille des smectites) sont également développés et étudiés. Comparés aux filtres à charbon, modifiés ou non, les capacités d'adsorption des ions perchlorate des supports organiques, inorganiques et des matériaux composites sont bien supérieures, cependant la recherche les concernant est peu avancée et n'est encore qu'expérimentale, contrairement aux filtres à charbon dont l'utilisation est répandue. D'autres facteurs influencent l'efficacité du traitement adsorbant et nécessitent également des études plus approfondies, ce sont la température, le pH, la quantité d'adsorbant, le temps d'adsorption ou encore les anions co-existant (2) (163).

3.3. Les méthodes d'élimination reposant sur des principes chimiques et biologiques

3.3.1. La réduction chimique et électro-chimique

Les méthodes de réduction chimique et électro-chimique permettent de transformer totalement les ions perchlorate en chlore, tout en respectant l'environnement. La réaction est la suivante : $\text{ClO}_4^- + 8\text{H}^+ + 8\text{e}^- \rightarrow \text{Cl}^- + 4\text{H}_2\text{O}$ avec $E_0 = 1,287 \text{ V}$ (163) (169).

Cependant, les méthodes de réductions chimiques ne seront pas développées dans cette thèse car elles présentent des inconvénients qui rendent leur utilisation totalement incompatible avec les contraintes d'une usine de production ou de traitement de l'EDCH (63).

En effet, ce type de procédés demande un temps de réaction particulièrement long, inadapté aux débits observés dans les usines de traitement de l'EDCH. Il est possible de pallier à cet inconvénient, par l'ajout de puissants agents réducteurs ou des catalyseurs dans le but de réduire l'énergie d'activation de la réaction, cependant la plupart sont toxiques et ne conviennent donc pas à l'élimination des ions perchlorate dans l'EDCH (163).

Des chercheurs ont pourtant mis au point la réduction électro-chimique, où l'électricité remplace l'ajout d'un catalyseur potentiellement toxique pour diminuer l'énergie d'activation nécessaire à la réduction (177). Ce procédé évite donc le recours à un catalyseur via une anode de Titane, notamment en « titane zéro valent » qui a un potentiel thermodynamique élevé pour réduire le perchlorate, ainsi que le nitrate potentiellement co-existant, assez puissant pour rendre négligeable les perturbations du pH de la solution (178).

Cependant, malgré l'efficacité observée du processus, cette méthode est à nouveau non applicable dans les usines de traitement de l'eau aujourd'hui, premièrement car elle est très énergivore, et secondairement car ce procédé requiert une quantité élevée de titane de par la corrosion de l'anode.

Les études pourraient néanmoins se pencher sur le développement de nouveaux matériaux d'électrode, moins coûteux, plus performants, mais aussi d'optimiser l'alimentation pour profiter pleinement de l'efficacité de la méthode de réduction électro-chimique (163). Les recherches sur ces procédés ont pour l'instant été principalement réalisés in-vitro, de nouveaux essais dans des stations pilotes devraient être réalisés (2).

3.3.2. La biodégradation

Avant la mise au point de la réduction électro-chimique, la biodégradation ou réduction bio-chimique, avait été étudiée, et ce dès les années 1950 (2). Cependant des recherches approfondies ont réellement été menées depuis début 2010.

La biodégradation repose sur des enzymes bactériennes capables de réduire l'énergie d'activation requise pour la réduction des ions perchlorate, elles utilisent ainsi les ions perchlorate comme accepteur d'élection pour leur métabolisme (179). La voie de réduction est simple :
 $\text{ClO}_4^- \rightarrow \text{ClO}_3^- \rightarrow \text{ClO}_2^- \rightarrow \text{Cl}^- + \text{O}_2$ (180).

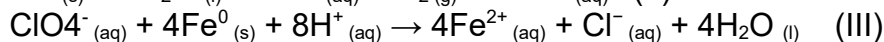
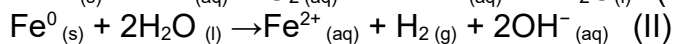
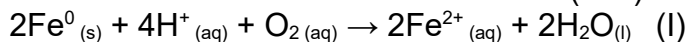
Cependant, la généralisation de cette méthode reste délicate, la flore bactérienne et la qualité de l'eau différant d'un site à l'autre (2), et il se pose la problématique des effets potentiels des micro-organismes employés, sur la santé, ce qui demanderait des recherches supplémentaires.

3.4. Une méthode prometteuse : l'utilisation des nanoparticules de fer zéro-valent ou « nanoscale zero-valent iron » (nZVI)

La méthode à base de nZVI ou de nZVI modifié est une méthode récemment utilisée pour éliminer divers éléments des eaux usées comme les ions nitrite, le sélénium ou encore des métaux lourds (181).

Les avantages de cette méthode reposent sur une grande surface de contact et une forte puissance de réduction. L'efficacité de cette méthode a été mise en évidence sur les ions perchlorate dans une étude réalisée en 2005 par Cao et al. (182).

Cette méthode nécessite d'effectuer la réduction dans une eau acide à température relativement élevée, 75°C, avec une dose de 10 g/L de nZVI. Les réactions observées sont les suivantes (183) :



Néanmoins, malgré l'efficacité du procédé, des inconvénients ont tout de même été mis en évidence aux cours des études, notamment la réduction de la stabilité et de la réactivité par oxydation et agglomération du nZVI. Des modifications ont donc été développées pour y pallier, avec l'utilisation du nZVI fixé et du nZVI « stabilisé ».

La méthode du nZVI fixé repose sur la diffusion du nZVI sur un support pour éviter aux particules de nZVI de s'agglomérer ou de s'oxyder. Les supports testés sont composés essentiellement de charbon activé (184), de chitosan (183), de pierre ponce, de minéraux argileux ou de graphite (163). C'est une méthode peu onéreuse, simple à mettre en place, qui gagne donc à être mise en lumière et développée par la recherche.

Quant à la méthode du nZVI stabilisé, elle repose sur le fait d'enduire le nZVI de matériaux polymères, comme l'amidon, le chitosan à nouveau, la carboxy-méthylcellulose (CMC), ou encore d'agents tensioactifs, dans le but de diminuer l'oxydation tout en maintenant la réactivité élevée du nZVI (183) (185).

L'étude de Xie et al. (2016) (183) a permis d'obtenir des résultats encourageants, notamment dans lors de tests dans des eaux à forte concentration en ions perchlorate, de l'ordre de 200 mg/L.

Peu d'études ont pour le moment été portées sur la méthode du nZVI stabilisé, pourtant plus efficace (163), elle gagne donc à être développée et offre de bonnes perspectives d'avenir quant à son utilisation pour éliminer les ions perchlorate dans les usines de traitement de l'EDCH.

3.5. Synthèse sur les méthodes d'élimination des ions perchlorate de l'EDCH et la notion d'hybridation des méthodes

Outres les freins présentés en début de chapitre, les nombreuses recherches sur les méthodes d'éliminations des ions perchlorate dans l'EDCH montrent les difficultés techniques qui se dressent pour chaque procédé testé, à allier efficacité, innocuité et la mise en place dans un dispositif adapté aux grandes échelles.

Les méthodes physico-chimiques ont fait leurs preuves en termes d'efficacité pour éliminer les ions perchlorate de l'EDCH, lorsque ce dernier est présent à l'état de traces, et ce sans poser de problèmes de pollution secondaire potentielle.

Les résines échangeuse d'ions, une des méthodes les plus efficaces pour traiter la présence d'ions perchlorate ont pour inconvénient majeur leur prix élevé et la nécessité de les régénérer.

Ensuite, la filtration membranaire, qui malgré son efficacité pose comme problème l'encrassement rapide de la membrane, son coût également élevé ce qui la rend inutilisable à grande échelle.

Finalement, les charbons actifs ne sont pas sélectifs sans l'adjonction d'un agent de surface potentiellement toxique. De plus, les méthodes physico-chimique imposent de devoir gérer, suite au traitement, des quantités importantes d'ions perchlorate.

Les traitements chimiques quant à eux permettent de dégrader totalement les ions perchlorate en ion chlorure Cl^- , donc sans imposer une élimination ultérieure des ions perchlorate. Or, leur temps de réaction impose l'utilisation d'agents réducteurs et de catalyseurs, toxiques, pour réduire l'énergie d'activation requise, ce qui empêche leur utilisation dans le cadre de l'EDCH.

Finalement, la réduction électro-chimique permet cette transformation des ions perchlorate sans ajout de catalyseurs, mais nécessite énormément d'électricité et impose de changer régulièrement l'électrode à cause de la corrosion.

Ces méthodes sont néanmoins de plus en plus citées dans les études pour leurs qualités dans l'élimination des ions perchlorate de l'EDCH en combinaison avec d'autres méthodes plus adaptées, que l'on peut alors nommer méthodes hybrides d'élimination des ions perchlorate.

Par exemple, des recherches exposent l'utilisation d'ultra-filtration hybridée avec un résine échangeuses d'ions (186).Également, l'hybridation de résines échangeuses d'ions avec la biodégradation pourrait ouvrir de nouvelles portes sur l'élimination complète des ions perchlorate de l'EDCH (163).

Toutes ces recherches, même si elles ne permettent pas pour l'instant la mise en évidence d'une méthode particulière à adopter en France ou dans le monde pour régler la problématique des ions perchlorate dans l'EDCH, permettent notamment, via par exemple la récente utilisation des nZVI modifiés, d'ouvrir de nouveaux champs de recherche, et l'hybridation des méthodes agrandit encore les possibilités d'élimination.

En effet, la combinaison de différentes méthodes va permettre d'éliminer leurs inconvénients respectifs, par exemple une méthode physico-chimique générant des déchets riches en ions perchlorate combinée à une biodégradation ou une réduction chimique de ces derniers pourrait être intéressant à développer.

Cependant, la recherche doit s'orienter, dans la mesure du possible, vers des méthodes plus économiques afin de faciliter sa mise en action sur le sol français, une fois les considérations techniques de l'élimination des ions perchlorate de l'EDCH réglés.

4. Conclusion de la quatrième partie

Cette quatrième et dernière partie permet de mieux caractériser la problématique des ions perchlorate dans l'EDCH en France.

En effet, la présence des ions perchlorate dans l'EDCH a été mise en évidence sur le sol français en 2011. Or depuis cette détection, aucun moyen technique réellement efficace n'a été mis en place pour les éliminer.

Les causes de cette inaction ont néanmoins été identifiées, avec la réglementation à deux vitesses, observée sur le territoire français, qui vacille entre restrictions de consommation dans le nord de la France et simples recommandations dans le reste de l'hexagone, et l'interrogation portant sur la qualité de l'administration devant assumer les frais de l'élimination des ions perchlorate.

L'autre cause importante mise en évidence par ce paragraphe est la difficulté technique de la mise en place de moyens d'élimination des ions perchlorate, tant du côté du développement ou que de l'obtention de l'AMM.

Ce contexte de flou réglementaire et la récente augmentation du nombre de communes concernées par les restrictions de consommations de l'EDCH, en lien avec les ions perchlorate en France, confirment l'importance du rôle du pharmacien d'officine dans la problématique des ions perchlorate, pour rassurer, informer et conseiller ses patients. La position de « première ligne » de la santé des pharmaciens d'officine fait d'eux des atouts majeurs en termes de prévention.

Cinquième partie : Le rôle du pharmacien d'officine dans la problématique des ions perchlorate

1. Résultats du questionnaire (Questionnaire vierge : annexe 8)

Afin d'avoir une représentation des connaissances et du niveau d'information des pharmaciens d'officine, un questionnaire leur a été soumis, ainsi qu'à leurs collaborateurs préparateurs. Il porte sur la qualité de l'eau du robinet en général et sur les ions perchlorate. Cependant, le questionnaire n'a pas été présenté comme portant sur ce sujet afin d'éviter un biais, en incitant des répondants à se renseigner avant de répondre.

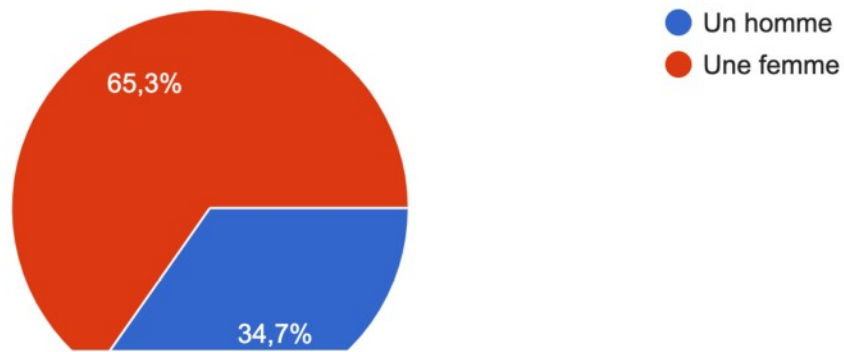
Ce questionnaire a obtenu 96 réponses. Il a été transmis par internet, auprès de groupes professionnels sur les réseaux sociaux et par messageries entre pharmaciens.

Les réponses sur la qualité de l'eau vont être comparées aux résultats d'une enquête menée par Beaumais et Veyronnet (2017) (187), portant sur la perception de la qualité et le choix de l'eau potable (eau du robinet, eau filtrée, eau embouteillée) de la population générale. Cette enquête reprend les données issues d'une enquête réalisée en 2013, par l'Institut français d'opinion publique (IFOP). Elle compte 4 003 personnes, entre 18 et 90 ans, répartis sur l'ensemble de la France métropolitaine.

1.1. Profil des répondants

Le profil type majoritaire des répondants est une femme pharmacien adjoint de moins de 30 ans.

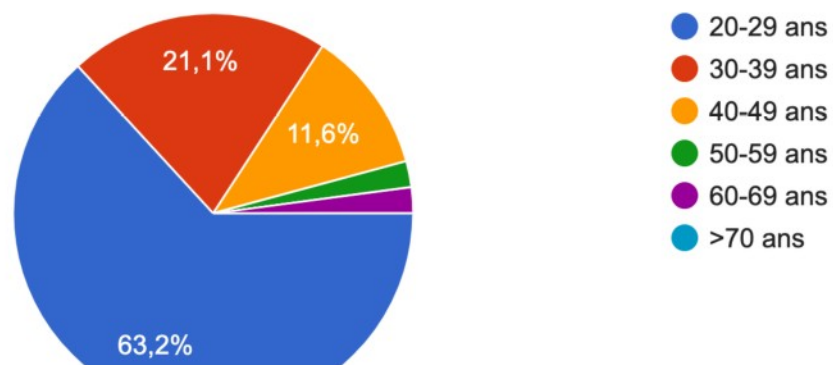
En effet, la majorité des personnes ayant répondu à ce questionnaire sont des femmes, à 65,3 % (figure 33). La catégorie d'âge majoritairement représentée au sein des répondants est celle des 20-29 ans et des 30-39 ans (figure 34), qui sont principalement des pharmaciens adjoints (71,6%), puis des préparateurs en pharmacie (16,8 %). Les pharmaciens titulaires sont moins représentés (11,6%) (Figure 35).



Quel âge avez vous?

95 réponses

Répartition Homme-Femme parmi les répondants au questionnaire



Fonction au sein de l'officine

95 réponses

Répartition des âges parmi les répondants au questionnaire

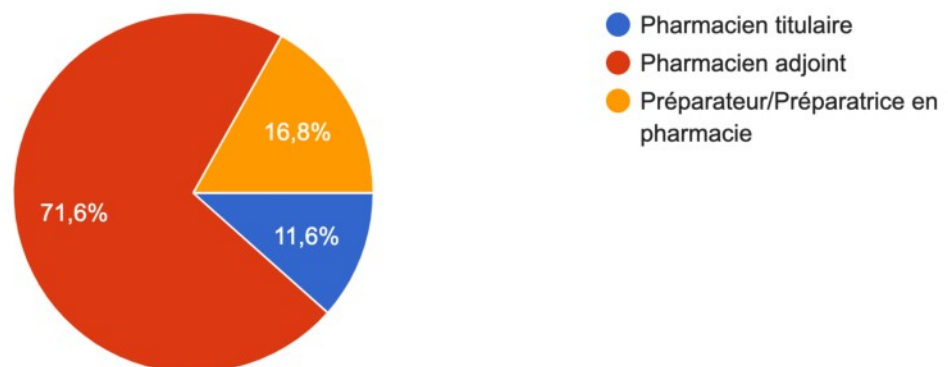


Figure 35 : Représentation des différentes fonctions occupées par les répondants

Ce profil type peut s'expliquer par plusieurs arguments :

Tout d'abord la féminisation de la profession de pharmacien. L'ordre des pharmaciens, dans un dossier nommé « démographie des pharmaciens au 1^{er} janvier 2018 », a représenté la répartition homme/femme au sein de la profession, en se basant sur des éléments démographiques de 2017 : « La pharmacie est une

profession particulièrement féminisée : comme en 2016, 67,3 % des pharmaciens sont des femmes. Les postes de pharmaciens adjoints d'officine (81,2 % de femmes) sont le plus souvent occupés par des femmes » (188). Chez les pharmaciens titulaires, 54,7 % sont des femmes.

Ensuite, il y a une majorité d'adjoints dans la profession, (26 558 titulaires contre 27 586 adjoints), et ce profil type est probablement en lien avec le canal numérique de diffusion du questionnaire : Facebook® et via mail.

De plus, le profil type est également à relier avec l'âge moyen de la profession : les moins de 33 ans sont devenus prépondérants depuis 2016 et représentent 15,9 % des pharmaciens (188). De plus, la majorité des femmes pharmaciens adjoints sont âgées de 27-31 ans (Figure 36). L'âge moyen général des pharmaciens titulaires est de 50,2 ans, et celui des adjoints de 43,8 ans (figure 36 et 37). 1/3 des adjoints ont moins de 35 ans.

Finalement, un facteur englobe les précédents. Le questionnaire a obtenu de nombreuses réponses grâce à des « groupes Facebook® » d'entraide entre pharmaciens. Ils y échangent leurs ressentis sur la profession et s'y conseillent.

De nombreux pharmaciens adjoints y sont inscrits et actifs, et les titulaires, majoritairement plus âgés, donc moins « connectés », sont peut-être moins demandeurs d'aide dans leur exercice quotidien.

D'ailleurs, les pharmaciens adjoints ont vraisemblablement plus de temps « libre », que les titulaires pour répondre aux questionnaires qui leur sont soumis. Mais, la raison première est qu'ils doivent également, étant plus jeunes, se sentir plus concernés dans le fait d'aider les jeunes doctorants dans leur travail de thèse.

● PYRAMIDE DES ÂGES

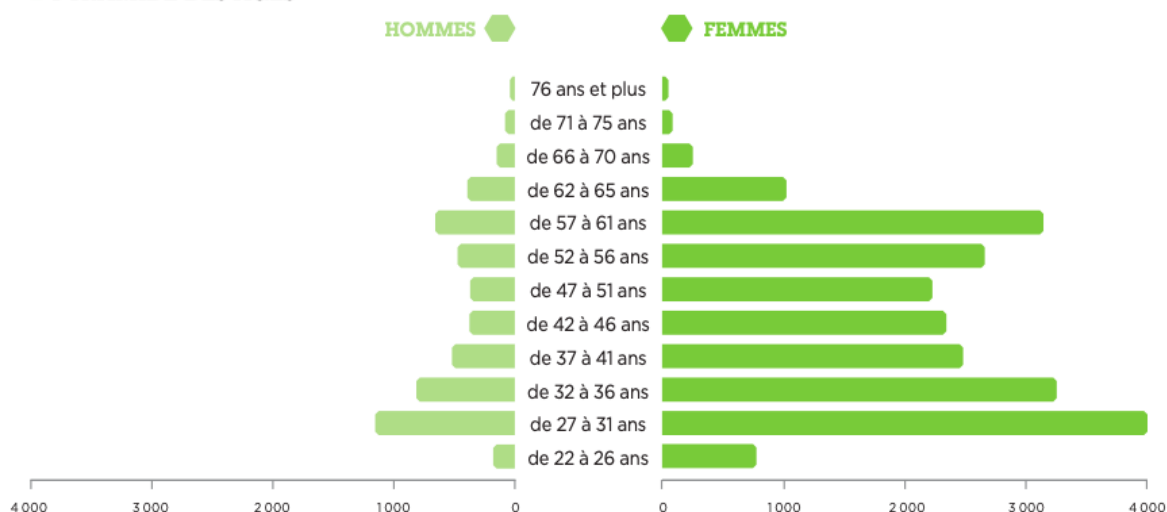


Figure 36 : Pyramide des âges au sein des Pharmaciens adjoints à l'officine (188)

● PYRAMIDE DES ÂGES

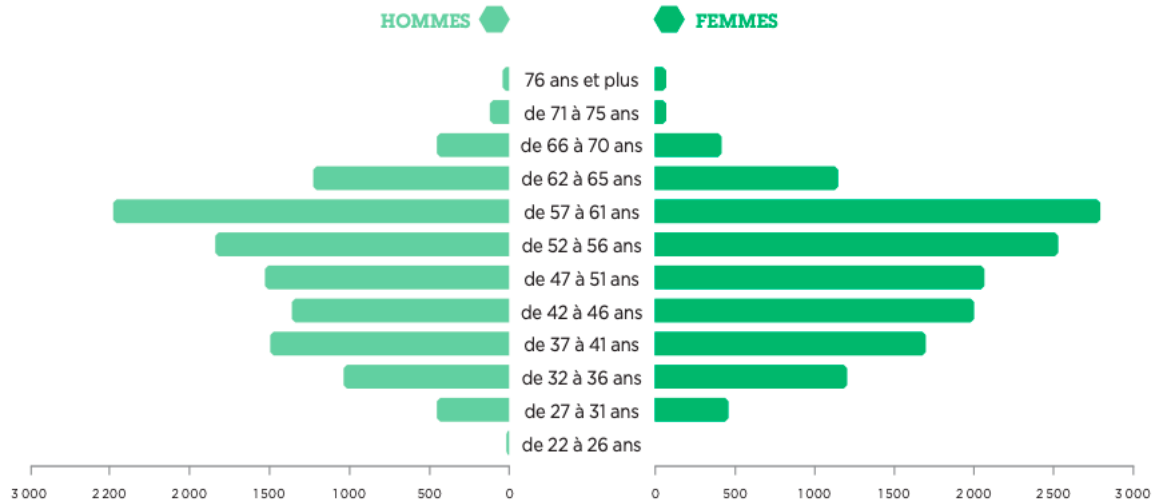


Figure 37 : Pyramide des âges au sein des Pharmaciens titulaires à l'officine (188)

Au sein des répondants, tous les types de pharmacies sont représentés, avec une majeure partie de pharmacies de petite ville (autour de 2 000 – 10 000 habitants) (35,8%) et de villes moyennes (autour de 50 000 habitants) (46,3%). Les grandes villes (plus de 200 000 habitants, comme Lille, Paris, Bordeaux) sont moins représentées (17,9%) (figure 38).

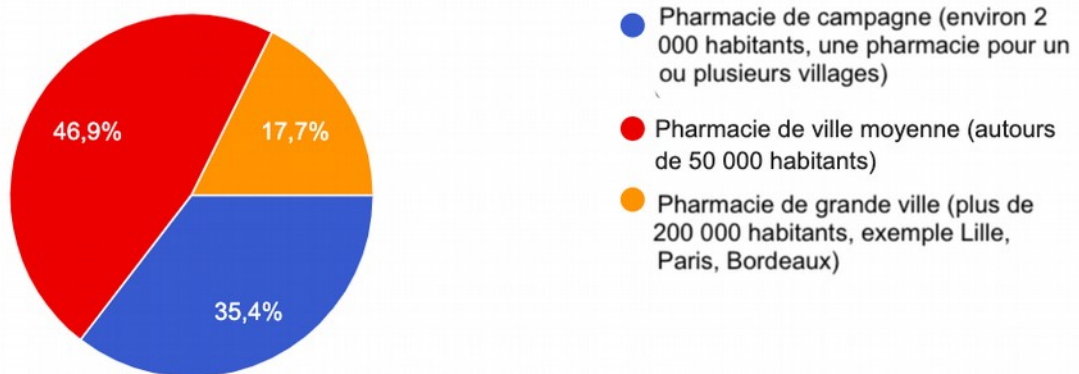


Figure 38 : Représentation des différentes catégories de pharmacies dans lesquelles exercent les répondants

Concernant la répartition géographique des réponses :

- 52,08 % des réponses proviennent des Hauts-de-France,
- 7,30 % d'Ile-de-France,
- 7,30 % d'Occitanie,
- 6,25 % de Provence-Alpes-Côte-d'Azur et Corse,
- 4,60 % de Normandie,
- 4,16 % du Grand-Est,
- 4,16 % de Nouvelle Aquitaine,
- 3,13 % d'Auvergne Rhône-Alpes,
- 3,12 % de Bretagne,
- 2,10 % des Pays de la Loire,
- 2,10 % du Centre val de Loire,
- 0 % de Bourgogne-Franche comté.

La répartition des réponses n'est pas homogène sur le territoire, et ne reflète pas la répartition générale des officines en France (Figure 39).

Ce biais provient essentiellement du bon vouloir des répondants, sûrement plus enclins à répondre au questionnaire d'un futur pharmacien de leur région. De plus, ayant de nombreuses connaissances dans le Nord, la diffusion du questionnaire y a été favorisée.

Néanmoins, le but premier de ce questionnaire est d'évaluer les connaissances des pharmaciens envers les ions perchlorate. Obtenir une majorité de répondants concernés ou proches de zones concernées par des restrictions de consommation de l'eau en lien avec les ions perchlorate est alors intéressant.

Parmi les répondants, 38,6 % sont concernés directement, au niveau de leur lieu d'exercice, par une restriction en lien avec les ions perchlorate et 16,7 % sont proches d'une zone concernée. Donc 55,3 % des répondants correspondent à des pharmaciens ou préparateurs censés être sensibilisés à la problématique des ions perchlorate.

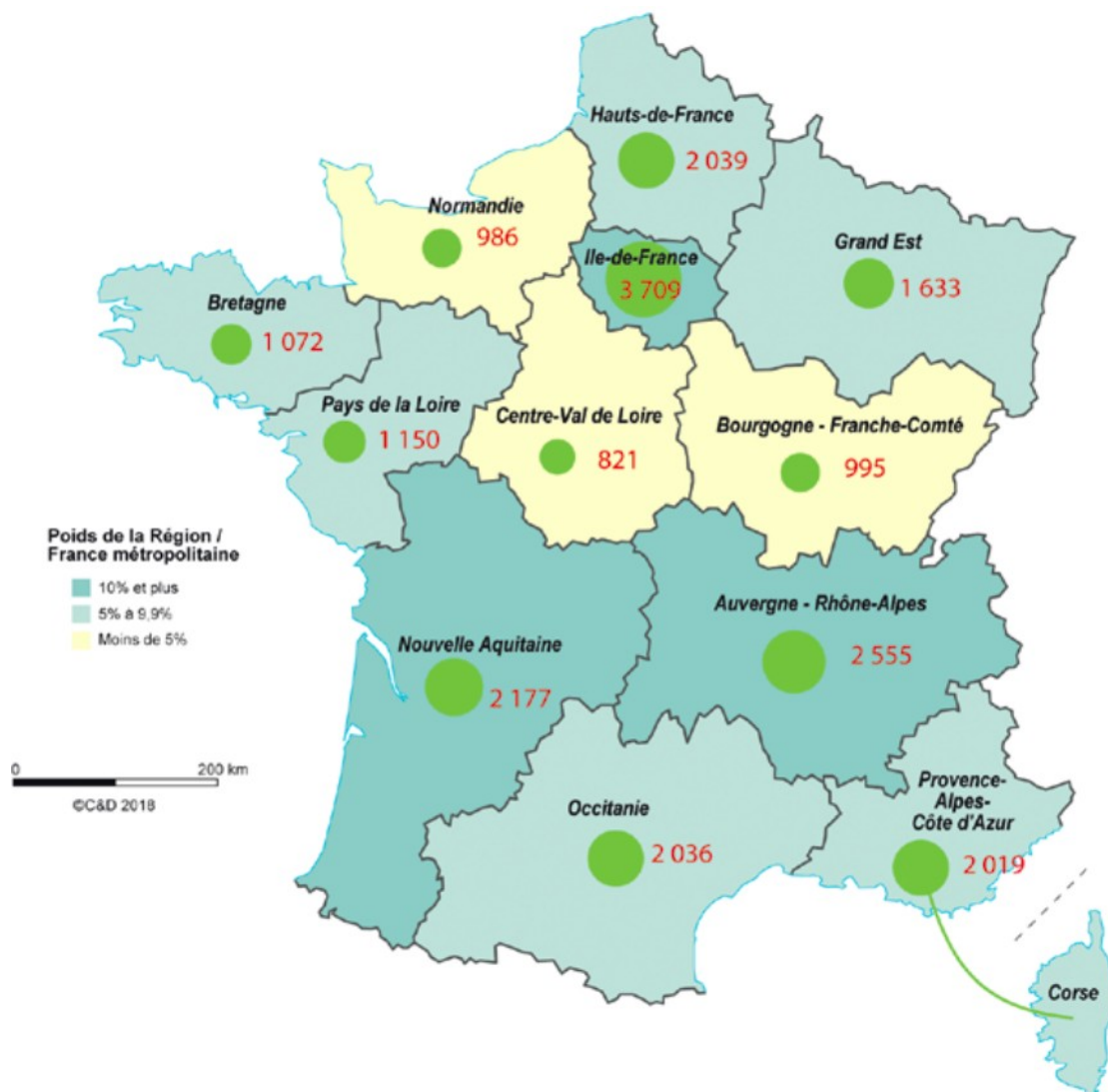


Figure 39 : Nombre de pharmacies d'officine par régions en 2017

1.2. La perception de la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine

Majoritairement, les répondants ont confiance en la qualité de l'eau distribuée (figure 40), 40,6 % des répondants ayant plutôt confiance, et 26 % une confiance totale. 8,3 % des répondants n'ont aucune confiance et 25 % peu confiance en l'eau du robinet.

Près de la moitié (55,2%) des répondants consomment régulièrement l'eau du robinet (figure 41).

Ces résultats rejoignent ceux de l'étude de Beaumais et Veyronnet, qui montre que l'eau du robinet est l'eau majoritairement consommée par les Français (40,44%). L'eau embouteillée est préférée par 38,59 % des Français, puis l'eau filtrée (par des carafes filtrantes par exemple), avec 20,96 % (187).

Globalement, les régions les plus consommatrices d'eau du robinet se situent dans le Sud de la France (Sud-Est : 57 % ; Sud-Ouest : 52 % ; Méditerranée : 49 %), et la région la moins consommatrice est le Nord de la France, avec 17 % de consommateurs seulement. Le questionnaire ayant reçu une majorité de réponses

de pharmaciens et préparateurs du Nord de la France, les réponses auraient dû alors être plus en faveur de l'eau en bouteille.

Il en est de même, avec la majorité féminine des répondants, qui d'après l'étude apparaissent moins satisfaites de la qualité de l'eau du robinet que les hommes (187).

Cette répartition peut être en lien avec l'augmentation du niveau de satisfaction, et donc du taux de consommation de l'eau du robinet, qui coïncide avec l'augmentation des revenus (187). Les salaires sont normalement plus élevés que la moyenne au sein des répondants.

Autrement, un changement de mentalités s'opère peut-être ces dernières années, avec la volonté générale de consommer moins de plastique, les gourdes réutilisables sont désormais préférées aux bouteilles.



Buvez-vous l'eau du robinet? (hors préparation des aliments, du café, des potages...)

96 réponses
confiance, 4 = confiance totale

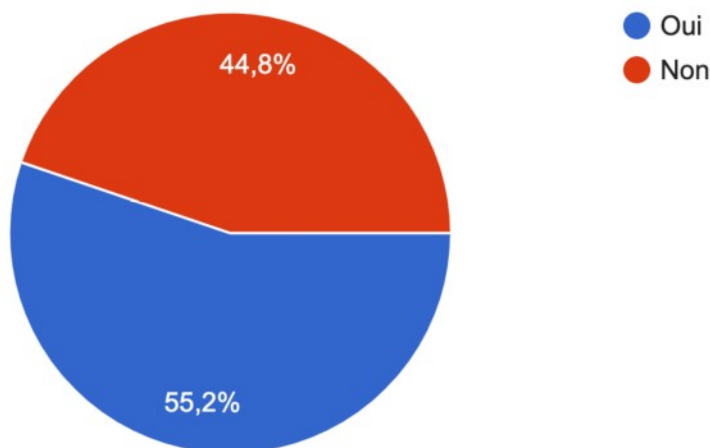


Figure 41 : Réponses obtenues à la question : buvez-vous l'eau du robinet ? (hors préparation des aliments, du café, des potages, etc)

Le goût représente de loin la 1^{ère} cause de non consommation de l'eau du robinet (68,2%). La crainte de la présence de polluants est avancée comme raison première, par 27,3% des répondants non consommateurs (figure 42). À titre anecdotique, deux réponses étaient « problèmes digestifs » et l'autre « culture de la famille qui boit l'eau en bouteille ».

Les raisons secondaires invoquées dans le fait de ne pas consommer l'eau du robinet sont proches des raisons principales, avec 57,9 % de répondants craignant la présence de polluants ou de substances nocives pour la santé, puis 36,8 % invoquant le goût.

Une autre notion, de confo-acceptabilité, émerge cependant, avec la perception de l'odeur de l'eau, à 31,6 %, et de sa couleur, à 10,5 % (figure 43).

En effet, selon Beaumais et Veyronnet, ces caractéristiques influencent

Si vous avez répondu non à la question précédente, pour quelle raison prioritairement?

44 réponses
connaissances pour interpréter les résultats des analyses.

oir des

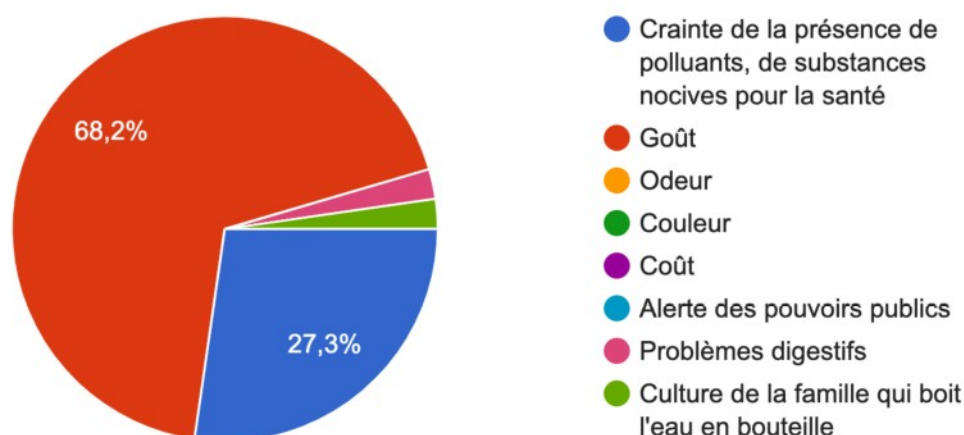


Figure 42 : Raisons prioritaires du refus de consommer l'eau du robinet

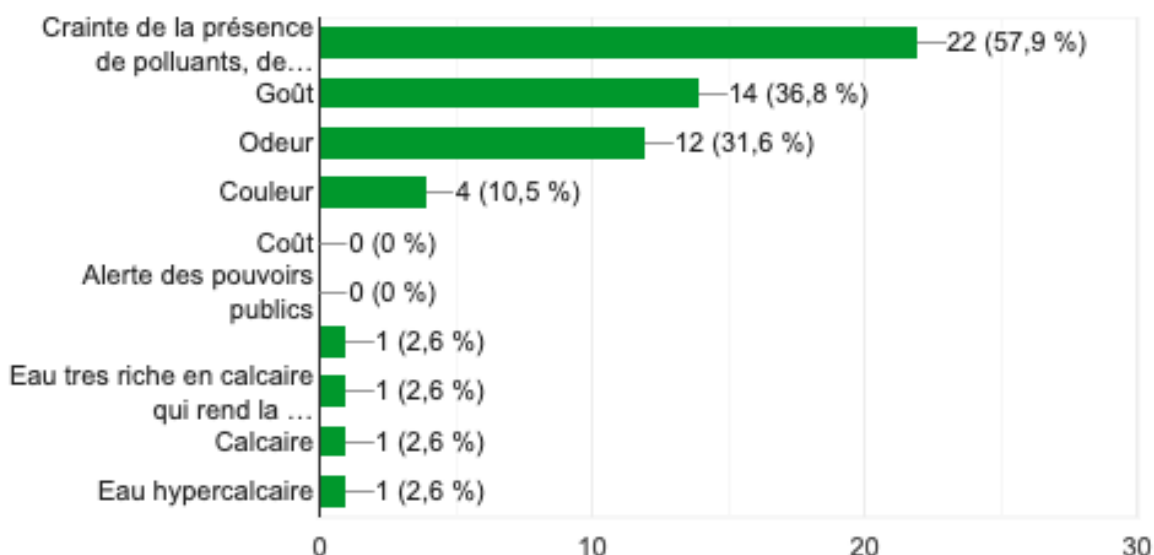


Figure 43 : Raisons secondaires du refus de consommer l'eau du robinet

1.3. Connaissances des contaminants de l'eau en général

51 % des répondants craignent la présence d'éléments nocifs dans l'eau distribuée au robinet de la ville où se situe leur officine (figure 44).

Ces résultats coïncident avec le pourcentage de répondants ne consommant pas d'eau du robinet.

Principalement, les substances « novices » craintes sont les pesticides (77,6%), le calcaire (57,1%) et les résidus de médicaments (49%). Viennent ensuite le plomb (40,8%), les ions nitrate (38,8%), les micro-organismes (36,7%), les ions perchlorate (26,5%), sulfate (22,4%), et enfin l'aluminium (18,4%) (figure 45).

Ces réponses mettent en évidence que les connaissances des répondants sur les risques liés à la présence de ces substances dans l'eau du robinet sont parfois lacunaires. Ainsi, pour certaines familles de substances, tels les pesticides ou les résidus de médicaments, la crainte de leur présence dans l'eau distribuée peut être compréhensible voire légitime, en revanche, pour d'autres substances, elle n'est pas fondée.

En effet, la recherche de pesticides ne concerne que les molécules utilisées dans l'environnement de l'unité de distribution considérée et les limites de qualité en vigueur sont encore principalement basées sur les seuils de détection analytiques disponibles dans les années 80 et non sur les éléments de toxicité connus à ce jour.

Pour les résidus de médicaments dans l'EDCH, il n'existe pas de limite de qualité et les réglementations, européenne et française, ne prévoient pas de les rechercher. Dès 2009, le Laboratoire d'hydrologie de Nancy a initié une campagne nationale de dosages dans les EDCH et les eaux brutes correspondantes de 45 molécules à usages thérapeutiques humains ou vétérinaires et leurs principaux métabolites, représentant les principales classes pharmacologiques de médicaments. Des concentrations, de l'ordre du ng/L, de résidus de médicaments ont été détectées dans la majorité des EB et ponctuellement dans des eaux destinées à la consommation humaine. Les molécules les plus fréquemment détectées sont la carbamazépine, l'époxy carbamazépine, l'oxazépam et l'hydroxybupropifène. Les tentatives d'évaluation du risque sanitaire, en particulier via l'eau de boisson, ont conclu à « des risques négligeables au moins dans les pays disposant d'unités de potabilisation de bonne qualité et fiabilité » (189).

Néanmoins, les estimations se sont heurtées à une insuffisance de données et il est stipulé que « des freins existent concernant les accès libres aux données permettant de mener une évaluation des risques et notamment les chiffres précis de commercialisation des médicaments par zone géographique ». Cette problématique a été inscrite dans le PNSE3 avec notamment l'action n°46 qui présente la nécessité de « travailler sur la disponibilité et le partage de données permettant de connaître le danger et l'exposition pour les résidus de médicaments humains et vétérinaires dans les eaux ».

Actuellement, la refonte de la Directive 98/83/CE relative aux eaux destinées à la consommation humaine est en cours de discussion. Il est probable que la législation évolue en matière de pesticides, en revanche, les médicaments ne devraient pas être concernés.

La crainte de la présence de calcaire ou d'ions sulfate dans l'eau du robinet relatée par respectivement 57,1 % et 22,4 % des répondants au questionnaire pointent leurs connaissances approximatives voire erronées quant aux risques sanitaires liés ces substances.

Le calcaire résulte directement de la présence dans l'eau des ions calcium, magnésium et de carbonate, éléments sans impacts négatifs sur la santé.

Les ions sulfate, peuvent avoir un effet laxatif à partir de 400 mg/L pour une consommation quotidienne d'eau. Or il n'y a aucune raison sanitaire de craindre leur présence, la référence de qualité les concernant est de 250 mg/L, et une forte concentration donne un goût marqué à l'eau, qui ne sera donc pas spontanément consommée.

Craignez vous la présence d'éléments nocifs dans l'eau distribuée au robinet de la ville où se situe votre officine?

968 réponses

largement les circonstances d'exposition.

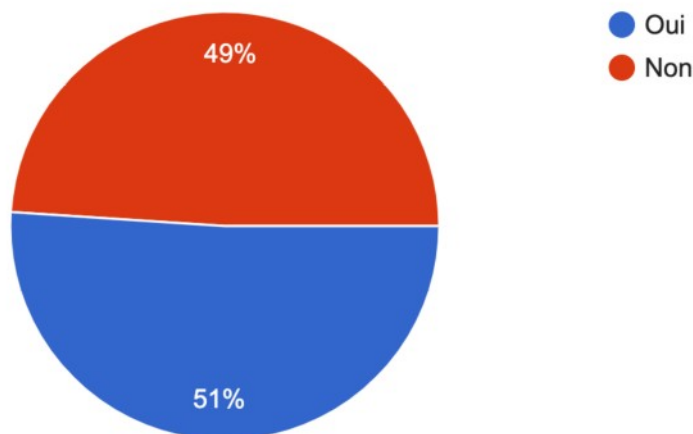
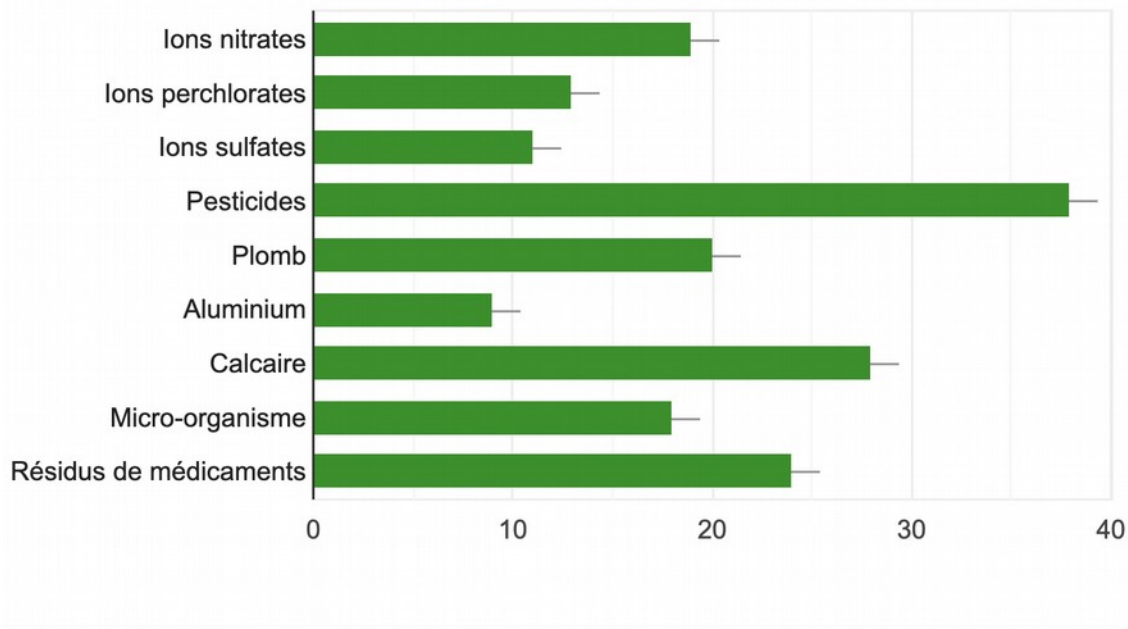


Figure 44 : Crainte de la présence d'éléments nocifs dans l'eau distribuée au robinet de la ville où se situe l'officine des répondants



Vous êtes-vous déjà renseigné sur la qualité de l'eau distribuée au robinet de la c... où se trouve votre officine?

96 réponses

qualité de l'eau destinée à la consommation humaine (figure 48).

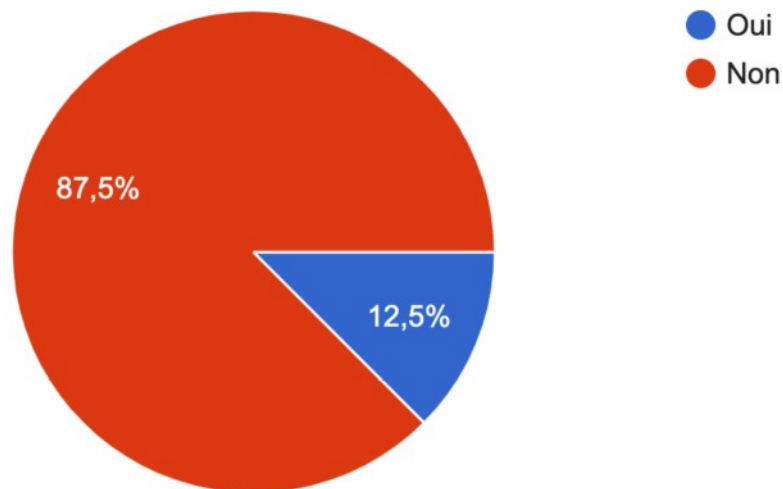
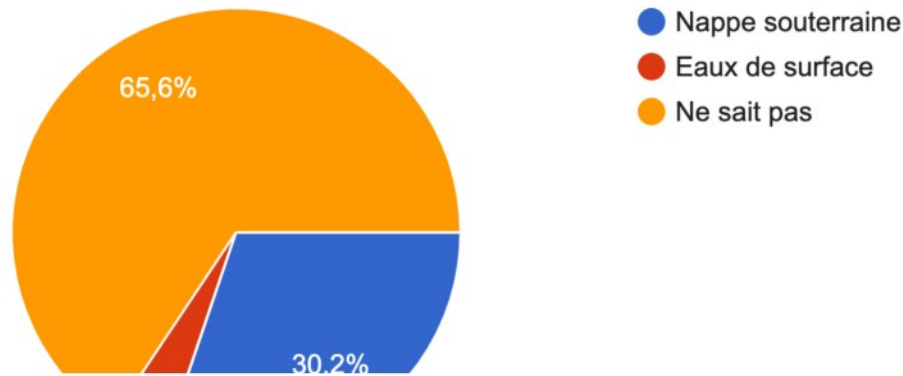


Figure 46 : Nombre de répondants s'étant renseignés sur la qualité de l'eau distribuée dans leur officine



Vous sentez-vous en général concerné par la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine?

96 réponses
officine ou à leur domicile

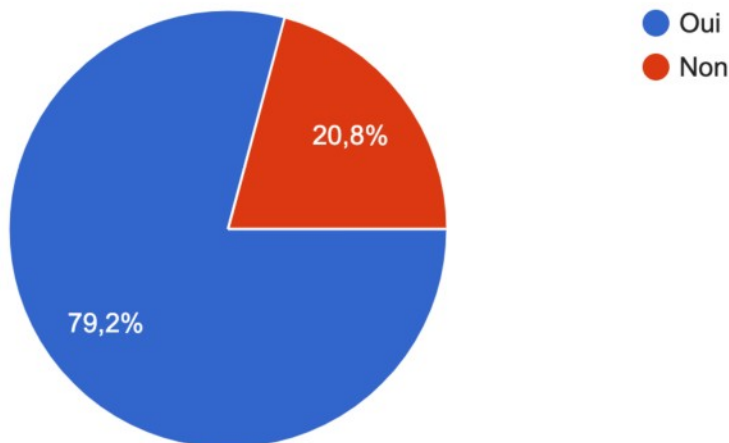


Figure 48 : Nombre de répondants se sentant concernés par la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine

71,9 % des répondants disent ne jamais être consultés à l'officine pour des questions sur l'eau du robinet (figure 49), et 17,7 % le sont en général une fois par an. (6,3 % 1 fois par semestre, 3,1 % une fois par trimestre et 1 % une fois par mois).

Ces pourcentages apparaissent relativement peu élevés compte tenu des nombreuses inquiétudes, exprimées par les consommateurs (dont un certain nombre fréquentent régulièrement les officines), vis-à-vis de l'eau du robinet. Inquiétudes régulièrement ravivées, notamment avec alertes quotidiennes émises sur les réseaux sociaux ou aux informations télévisées.

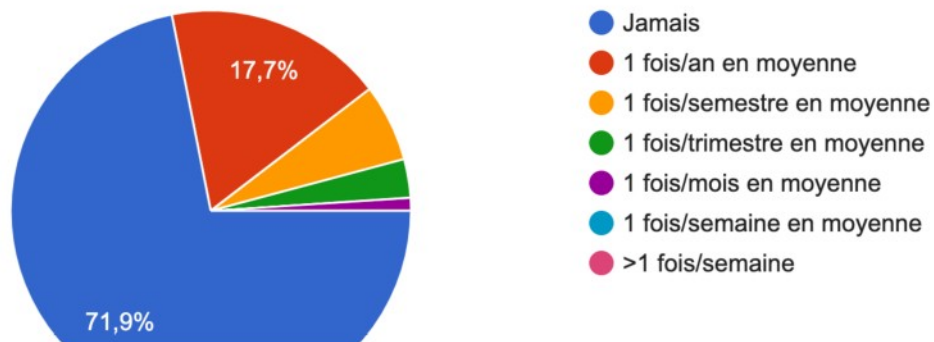
Le pharmacien d'officine n'apparaît donc pas considéré comme un interlocuteur pouvant apporter des réponses relatives à la qualité de l'eau, en tous cas pas en première intention. Or, ces connaissances sont parties intégrantes de sa formation universitaire initiale, les informations doivent pouvoir être disponibles aux comptoirs de chaque officine.

Faut-il plus d'interrogations de la part de la patientèle pour encourager les pharmaciens à se renseigner sur la qualité de l'eau de leur ville d'exercice, et en général ? Ou aborder régulièrement ce sujet, en lien avec leur santé, ne va-t'il pas montrer aux patients que le personnel de leur officine habituelle peut répondre à toute interrogation quant à la qualité pour l'eau de consommation, mais aussi pour tout autre usage de l'eau ? Plus les informations seront délivrées par du personnel

ponses

Êtes-vous parfois consultés à l'officine pour des question concernant l'eau du robinet?

968 nb de réponses : biberons (35,7%), puis le problème du calcaire (3,6%) (figure 50).



Si oui, quelles sont les principales préoccupations des patients?

288 nb de réponses : pour des questions concernant l'eau du robinet ?

3

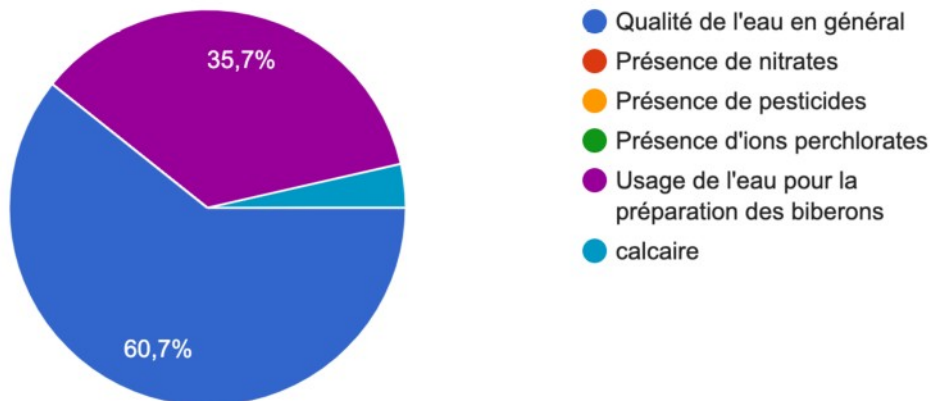


Figure 50 : Principales préoccupations des patients concernant l'eau au comptoir de l'officine

Concernant la recherche de renseignements sur la qualité de l'eau, les répondants qui se sont déjà informés, disent l'avoir fait principalement via : la mairie de la commune (21,4 %), la facture d'eau de l'officine (21,4 %) et l'organisme en charge de l'assainissement de l'eau de la commune (figure 51).

Les autres le feraient également via : La mairie de la commune (33,3%), l'organisme en charge de la distribution de l'eau de la commune (20,7%), l'ARS et l'organisme en charge de l'assainissement de l'eau de la commune (13,8 %), ou via un site internet (10,3%). La facture d'eau de l'officine ne serait consultée que par 4,6 %, puis le conseil départemental et régional (1,1%) (figure 52).

Ces résultats montrent que le personnel officinal sait globalement où se renseigner. Néanmoins, les réponses telles que « l'organisme en charge de l'assainissement de l'eau de la commune », « le conseil départemental » et « le conseil régional », qui représentent près de 15% des réponses, pointent une méconnaissance des systèmes de gestion de la qualité de l'eau. L'assainissement concerne, en effet, les eaux usées et non l'EDCH et la gestion de la qualité des eaux n'est pas du ressort direct des conseils départementaux (anciennement dénommés conseils généraux) et régionaux.

Les sources d'informations les plus fiables et simples sont la mairie de la commune où sont affichées ou consultables les analyses réglementaires complètes, mais aussi l'organisme en charge de la distribution/production de l'eau de la commune et l'ARS aussi détenteurs des analyses complètes. La facture d'eau de l'officine et le site internet du ministère de la santé où les résultats du contrôle sanitaire de l'eau du robinet sont accessibles commune par commune et sont

Si oui, auprès de qui?

14 réponses

les
s

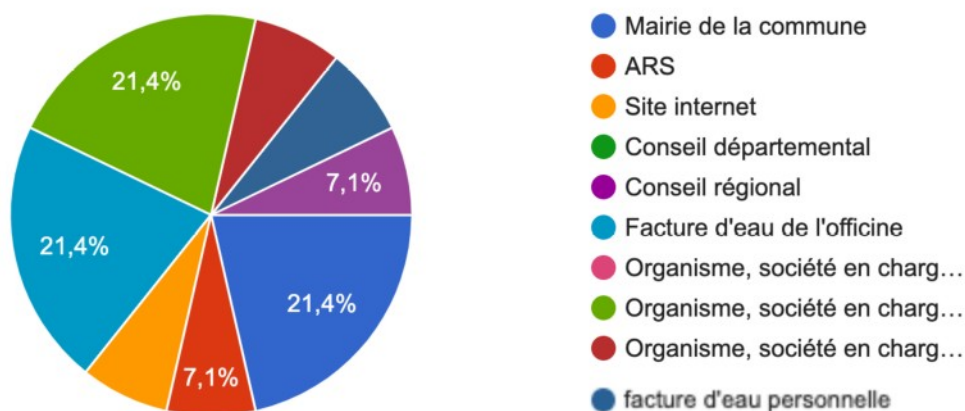


Figure 51 : Lieux de prise d'information sur la qualité de l'eau (les % non affichés sont de 7,1%)

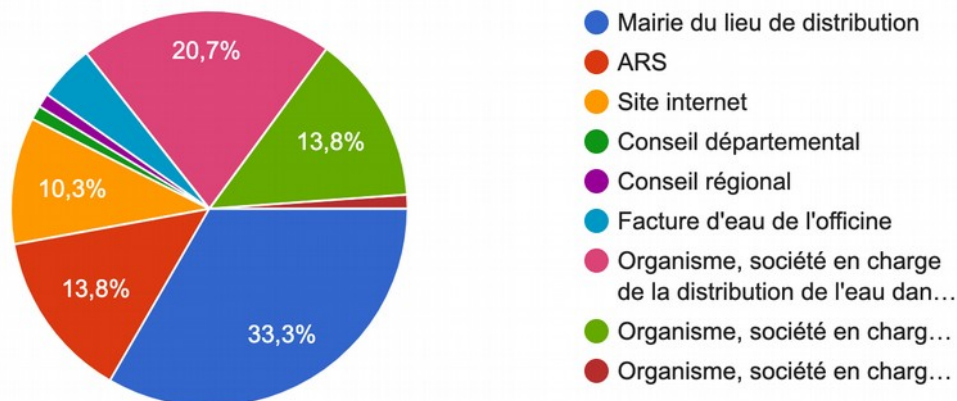


Figure 52 : Lieux de prise d'information potentiels sur la qualité de l'eau

1.4. Connaissances sur les ions perchlorate

Il faut rappeler que 38,6 % des répondants sont concernés directement, au niveau de leur lieu d'exercice, par une restriction en lien avec les ions perchlorate et 16,7 % sont proches d'une zone concernée. Soit 55,3 % des répondants sont censés avoir des informations ou des connaissances sur ces ions.

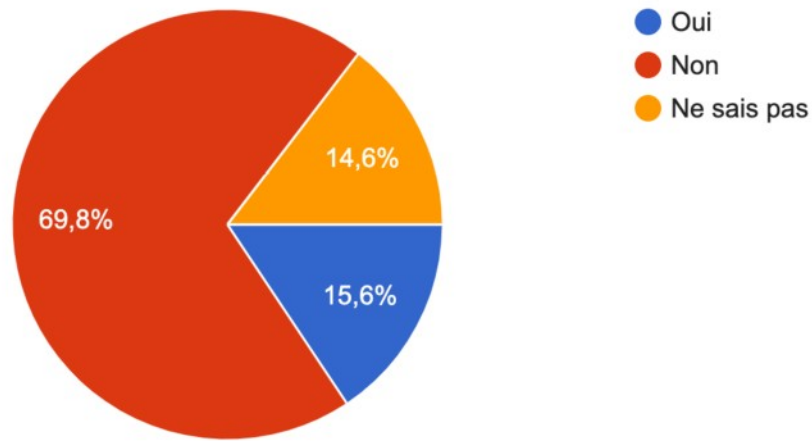
Or, seulement 15,6 % d'entre eux ont entendu parler d'une possible restriction de consommation de l'eau du robinet spécifiquement en lien avec la présence des ions perchlorate. 14,6 % ne savent pas et donc 69,8 % n'en n'ont jamais entendu parler (figure 53).

Parmi les répondants avertis, seul 6,3 % d'entre eux l'ont été lors de la mise en évidence des ions perchlorate en France, 56,3 % récemment avec les nouvelles restrictions dans la MEL, et 37,5 % entre ces deux périodes (figure 54).

Lors de l'interrogation ciblée : « Savez-vous si votre lieu d'exercice est concerné par une restriction de consommation en lien avec les ions perchlorate ? », 46,9 % des réponses sont « non », ce qui est plausible vu les répondants. Or, 52,1 % des réponses est « Ne sait pas », pour 1 % de « oui », soit une seule réponse (figure 55).

Ce constat est alarmant, on observe que 38,6 % des répondants sont concernés directement par une restriction de consommation de l'eau du robinet liées aux ions perchlorate, mais seul 1 % est au courant.

Comparé aux nombres de répondants concernés par les ions perchlorate, directement ou proches, le taux de connaissance d'une restriction aurait dû être bien supérieur. Et la moitié de ceux au courant l'ont été récemment, or la problématique est plus ancienne. Cela témoigne d'un manque d'informations et de renseignements de la part des autorités sanitaires, mais également de la part des pharmaciens.



Si oui, depuis quand en avez vous entendu parler?

perchlorate

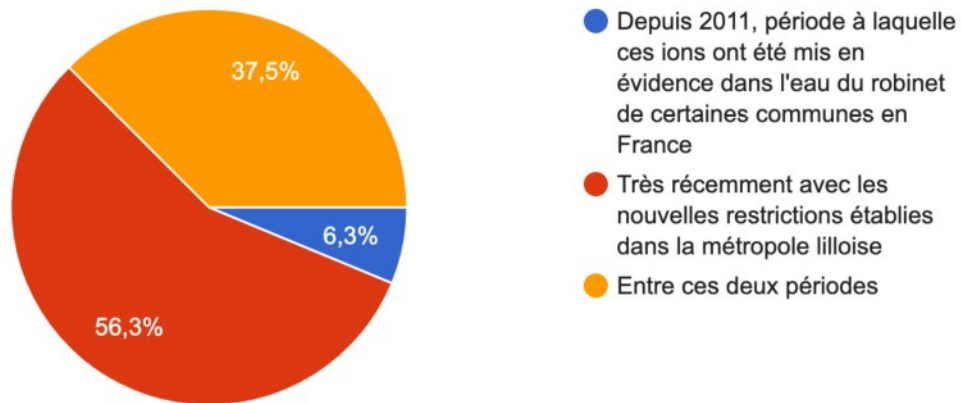


Figure 54 : Période pendant laquelle les répondants ont été avertis de la présence de restrictions de consommation de l'eau du robinet spécifiquement en lien avec la présence des ions perchlorate

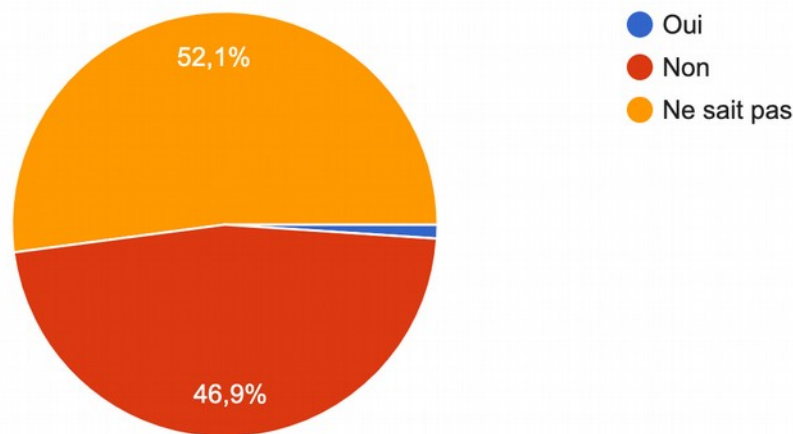


Figure 55 : Réponses à la question : Savez-vous si votre lieu d'exercice est concerné par une restriction de consommation en lien avec les ions perchlorate ?

91,7 % des personnes interrogées ne connaissent pas les effets potentiels des ions perchlorate sur la santé (figure 56). Parmi les 8,3 % ayant répondu positivement, soit 8 personnes, seules 5 personnes ont donné une information juste en ciblant des effets thyroïdiens (Les réponses « effets cancéreux » et « puissant oxydant » sont considérées comme fausses).

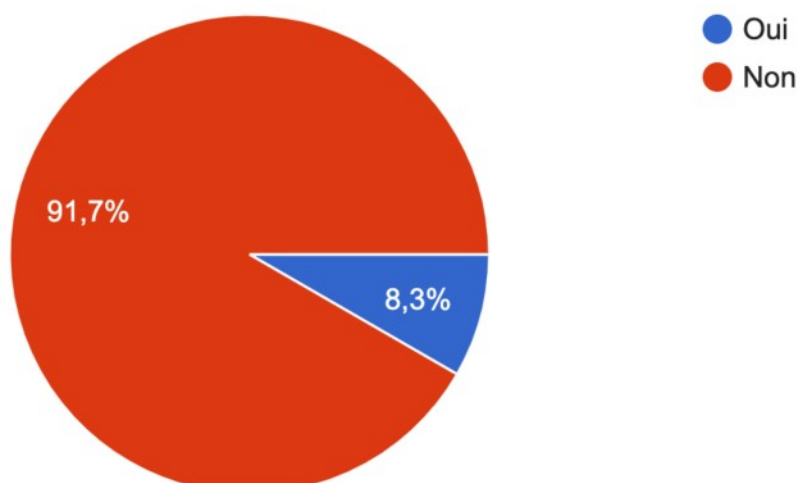
À la question à choix multiples relatives aux patients les plus sensibles aux effets des ions perchlorate (figure 57), 41,7 % ont répondu « tout le monde ». Les nourrissons ont été ciblés à 39,6 %. Arrivent ensuite les femmes enceintes à 30,2 %, puis les enfants (16,7%) et les personnes âgées (14,6%), le reste étant la réponse « je ne sais pas » (17,5%).

À nouveau, les réponses témoignent du manque de connaissances des pharmaciens et de leurs collaborateurs sur les ions perchlorate. Il en est de même avec la question sur l'origine de la présence de ces ions : 90,6 % de répondants affirment ne pas la connaître. Sur les 9,4 % la connaissant, la plupart des répondants répondent de manière juste en ciblant les armes utilisées pendant la première guerre mondiale ou encore l'industrie. Cependant une réponse met en cause la purification, un amalgame entre le chlore, utilisé dans la désinfection de l'eau, et les ions perchlorate.

Ne pas connaître les effets des ions et les populations les plus à risque diminue toutes possibilités de communication et de prévention.

ions perchlorates?

96 réponses



Savez-vous quels patients sont sensibles aux effets des ions perchlorates?

ions perchlorate ?

96 réponses

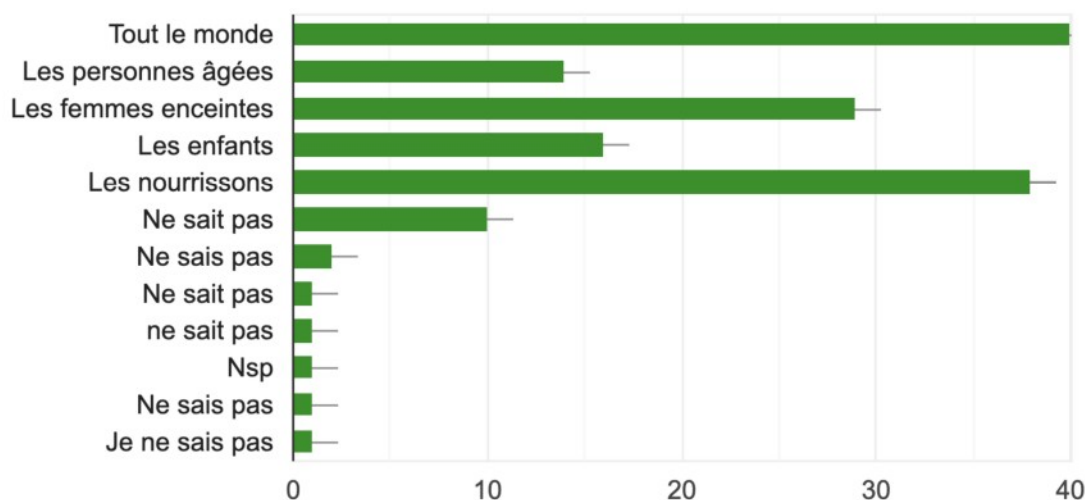


Figure 57 : Réponses à la question : Connaissez-vous les populations sensibles aux effets des ions perchlorate ?

1.5. Voies d'information des patients

Si les répondants avaient à informer leurs patients d'une restriction de consommation concernant les ions perchlorate, 60,5 % d'entre eux informeraient tous les patients. 14 % n'informeraient que les patients qui leur en parlent, 7 % n'informeraient que les femmes enceintes ou les mamans avec un nouveau-né, et 11,6 % n'informeraient aucun patient (figure 58).

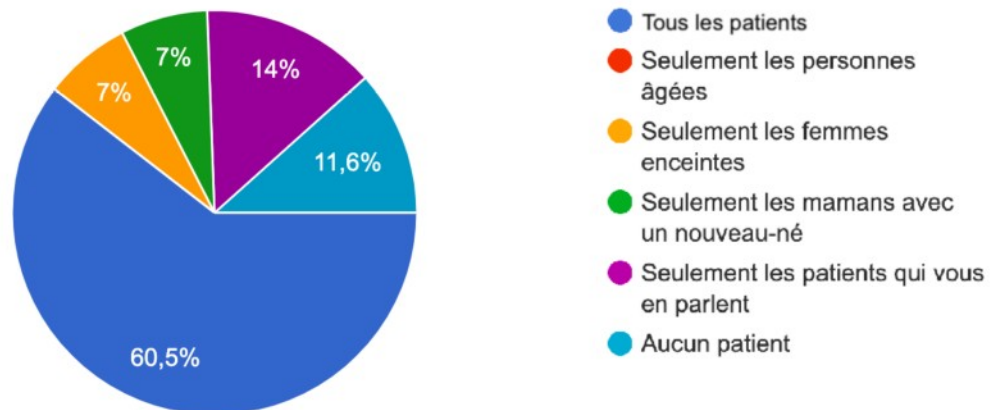
Si des répondants ont choisi de n'informer aucun patient, c'est essentiellement par ce qu'ils n'y pensent pas (52,4%), ou qu'ils ne se sentent pas

assez informés sur la problématique des ions perchlorate (42,9%). Ce constat va dans le sens d'un manque d'information général, mais également de la nécessité pour le pharmacien et son équipe de se tenir informés.

L'information serait transmise à 95,7 % par oral, à 48,9 % via des affiches, des

Si votre lieu d'exercice est concerné par une restriction de consommation liée à la présence... "du robinet", informez-vous :
 patients, pour aborder plus facilement le sujet.
 43 réponses

mettre



Si vous informez vos patients, comment passez-vous l'information?
 qui informez-vous ?
 47 réponses

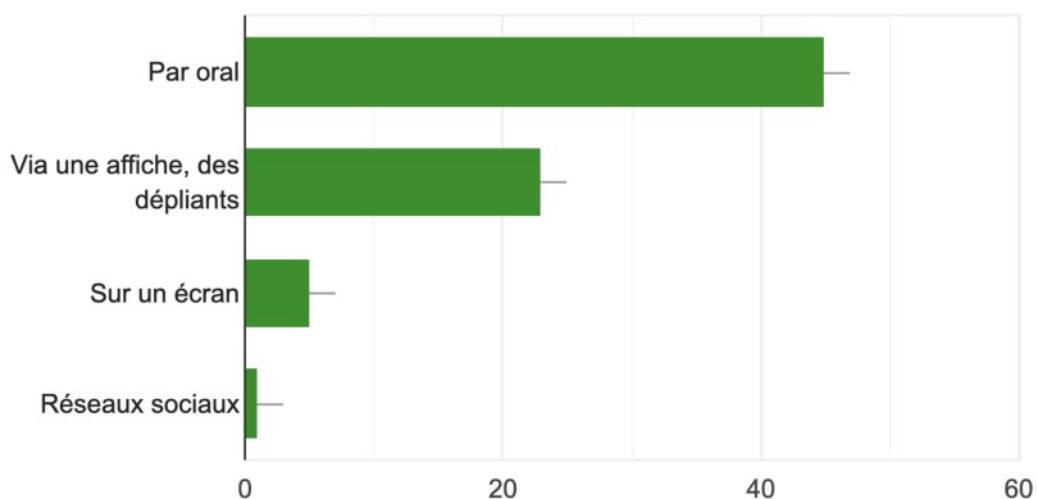


Figure 59 : Moyens employés pour diffuser de l'information sur les ions perchlorate

1.6. Constats

Plusieurs constats ressortent de ce questionnaire :

- La problématique des ions perchlorate est mal connue même dans les communes concernées par la distribution d'une eau présentant des taux d'ions perchlorate supérieurs à 4 µg/l (38,6 % des répondants), alors que des informations et recommandations de non consommation de l'eau par les moins de 6 mois ont été diffusées par l'ARS ou la MEL depuis 17 septembre dernier, et relayées par les médias.

- Les ions perchlorate, même s'ils ne sont présents dans toutes les régions, sont un sujet de santé publique, un manque d'information de la part des autorités publiques se fait donc sentir. En effet, les pharmaciens d'officine sont des acteurs de premier ordre en santé publique. Mais, si l'état les considère acteurs pour la vaccination par exemple, ils ne sont pas vus comme tels pour les contaminants de l'eau. Nombreux sont les pharmaciens travaillant dans des communes mises récemment sous restrictions ou dans des zones de restrictions plus anciennes, n'ayant jamais reçu d'information officielle directe, de la part de la commune, des sociétés distributrices d'eau ou des ARS. Nombre de jeunes pharmaciens débutant leur carrière dans des zones concernées par des restrictions de consommation liées aux ions perchlorate n'en ont jamais été informés.

- Le dernier constat est que les pharmaciens d'officine ne s'informent pas suffisamment sur la qualité de l'eau en général. Un manque d'information est certes manifeste de la part des autorités sanitaires, mais le pharmacien d'officine, de par ses connaissances et sa position d'acteur de santé publique se doit de s'informer et d'actualiser ses connaissances, d'autant qu'il possède toutes les compétences pour jouer son rôle d'acteur de santé publique auprès de la population. Il peut ainsi prévenir l'exposition à des polluants et participer à une meilleure information du grand public sur l'eau.

Beumais et Veyronnet (187) concluent que la qualité perçue de l'eau apparaît toujours pour les consommateurs comme un déterminant fort du choix d'alimentation en eau potable. Pour le régulateur public, cela implique que l'infléchissement des comportements de consommation d'eau potable passe sans doute par une meilleure information sur la qualité de l'eau. En d'autres termes, l'information sur la qualité de l'eau est un facteur important qui contribue à décider les individus à consommer telle ou telle eau. Le pharmacien lui-même, scientifiquement bien informé sur la qualité de l'eau du robinet et sur les risques éventuels à la consommer, peut s'avérer être un bon acteur de prévention en relayant l'information auprès des populations les plus sensibles au risque sanitaire considéré. Cette information peut être décisive dans le choix du consommateur à boire ou ne pas boire telle ou telle eau et donc à bien adhérer aux recommandations de consommation émises localement, comme c'est le cas pour les ions perchlorate.

2. Le rôle du pharmacien d'officine concernant les ions perchlorate

La récente mise en lumière des ions perchlorate sur la métropole lilloise montre le manque d'information des populations et les désinformations qui peuvent en ressortir comme la confusion entre les ions perchlorate et le chlore, une peur de l'eau du robinet, etc, d'où le rôle que peut jouer le pharmacien d'officine en termes de prévention face à cette problématique.

2.1. L'analyse du lieu d'exercice

Il est tout d'abord nécessaire d'établir le fait que tous les pharmaciens exerçant en France ne sont pas concernés aux mêmes degrés par cette prévention (figure 21), les pharmaciens exerçant dans des villes où les concentrations en ions perchlorate dépassent les recommandations sont les plus sollicités.

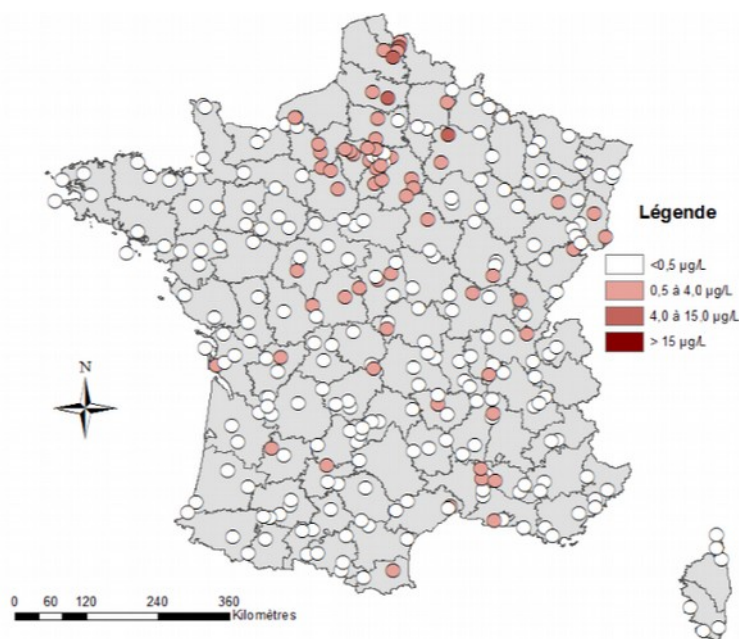


Figure 21 : Représentation des concentrations en ions perchlorate en µg/L en sortie d'installations de traitement en France métropolitaine (62) mesurées par échantillon ponctuel au cours de la campagne réalisée entre octobre 2011 et mai 2012 par le laboratoire d'hydrologie de Nancy de l'Anses (LHN)

2.2. Repérer les personnes à risque

Les personnes concernées par la présence d'ions perchlorate dans l'EDCH, sont principalement les futurs mamans/parents et les parents de jeunes enfants, mais également les personnes potentiellement carencées en iode et donc vulnérables aux effets potentiels néfastes des ions perchlorate. À noter qu'un régime alimentaire de type végétarien, végétalien ou végan peut exposer à des carences en vitamines et augmente le risque de déficit en fer, en vitamine D et en iode (190). Le reste de la population peut aussi être concerné puisqu'elle pourra à son tour informer son entourage et ainsi augmenter le nombre de personnes informées.

2.3. La prévention en elle-même

Le but de la démarche n'est pas d'inquiéter la patientèle de l'officine avec des informations floues, afin de vendre des accessoires, comme des carafes filtrantes, peu utiles dans la problématique des ions perchlorate.

Une fois la population ciblée, la prévention peut se faire de façon personnelle, par exemple au comptoir lors de l'annonce, du désir de procréer, du début d'une grossesse, de la venue au monde d'un enfant ou encore à la présentation d'une ordonnance pédiatrique et tout simplement lors de dialogues généraux avec les patients. Si la commune est concernée par des restrictions de consommation de l'eau liées à la présence d'ions perchlorate, l'équipe officinale peut alors informer au comptoir les patients, de la présence d'une restriction et du comportement à adopter.

L'information se doit rassurante, via la présentation de documents mis à dispositions, d'affiches, de dépliants ou via un lien internet envoyant vers le site de l'ARS afin que les patients puissent se renseigner à leur domicile, s'ils recherchent des informations complémentaires. Par exemple : <https://www.hauts-de-france.ars.sante.fr/une-eau-potable-de-qualite>.

Selon les disponibilités de l'équipe officinale, le pharmacien peut avoir recours à des entretiens personnalisés afin de rassurer et d'informer pleinement les patients qui le souhaitent.

Le pharmacien peut éventuellement tenir à jour un affichage de la qualité de l'eau distribuée dans la commune (mise à jour de chaque nouveaux résultats de prélèvement par exemple, ou annuellement, il y a souvent des nouveaux habitants ou des personnes peu renseignées). Cet affichage peut être fait sous forme d'affiches, de dépliants, de fiches conseils, mais aussi par le biais d'un écran servant habituellement aux annonces d'offres publicitaires, ou sur la page internet de la pharmacie (figure 60). Les ARS publient également des bilans régionaux sur la qualité de l'eau du robinet. Ces documents sont mis en ligne sur les sites Internet des ARS accessibles à partir du site www.ars.sante.fr



Les recommandations

Au-delà de **4 microgrammes (μg) de perchlorates** par litre, ne pas utiliser l'eau du robinet pour les **nourrissons de moins de six mois**

A partir de **15 μg de perchlorates par litre**, ne pas utiliser l'eau du robinet pour **les femmes enceintes**

Figure 60 : Exemple de brochure d'information, réalisée par la Voix du Nord pour son article paru dans le journal du 13/09/19 (157)

Pour être facilement comprise, l'information doit être simple. Il ne sert à rien de rentrer dans les détails, informer sur les éventuelles restrictions, sur les ions perchlorate et leurs impacts possibles sur la santé, les personnes à risque et les conduites à tenir est amplement suffisant.

La prévention peut également porter sur des conseils alimentaires et pharmaceutiques pour les personnes sensibles : par exemple, prévenir une possible carence en iode, comme le présentent Dessailou et Wemeau (2016) « L'utilisation de compléments nutritionnels comportant une supplémentation d'iodure de potassium de 150 mg chez la femme enceinte constituerait la solution idéale : les femmes enceintes ont un suivi systématique mensuel ; elles ont le plus souvent une substitution en fer, parfois multi-vitaminique puisque parallèlement les besoins en folates, en vitamine D et en fer s'accroissent. La correction de la carence iodée systématiquement appliquée chez toutes les femmes enceintes, et éventuellement prise en charge par la collectivité, constituerait une mesure sans doute plus efficace dans la prévention d'un éventuel méfait du perchlorate » (14).

Une semaine sur la thématique de l'eau, comme il en existe déjà sur la vaccination, ou d'autres sujets comme « la semaine du bébé », avec l'intervention de professionnels de l'eau peut également être envisagée, voire une soirée d'information dans la commune afin d'aborder la problématique des ions perchlorate de façon ludique, en lien avec les projets de la mairie et de la région.

2.4. Les ions perchlorate uniquement ?

Il apparaît compliqué d'informer uniquement sur les ions perchlorate. Le pharmacien d'officine, de par ses connaissances, sera à même d'informer sur les autres indicateurs présents dans les infofactures et pour répondre aux questions plus générales de ses patients. C'est pourquoi il pourra dans ses documents informatifs ou lors de ces entretiens apporter des conseils plus généraux sur l'eau distribuée.

Exemples de conseils simples que peut apporter le pharmacien sur la présence des ions perchlorate dans l'EDCH :

- il n'y a aucun risque, pour toute la famille de se laver, de se brosser les dents avec de l'eau contaminée par des ions perchlorate,
- faire la vaisselle des biberons ou encore laver le linge de nourrissons de moins de 6 mois avec de l'eau contaminée par des ions perchlorate n'expose à aucun risque,
- les personnes non concernées par les restrictions de consommation de l'eau peuvent sans aucun risque consommer de l'eau du robinet contaminée par les ions perchlorate.

Exemples de conseils généraux que peut apporter le pharmacien quant à la manière optimale de consommer l'eau :

- laisser couler l'eau avant de la consommer lorsqu'elle a stagné dans les canalisations, de quelques secondes à une à deux minutes (en cas de stagnation prolongée, après plusieurs jours d'absence, par exemple),
- utiliser l'eau du réseau d'eau froide pour la boisson, la préparation ou la cuisson des aliments : une température élevée peut favoriser le transfert dans l'eau des métaux qui constituent les canalisations et la dégradation de la qualité bactériologique,

- laisser l'eau du robinet dans une carafe ouverte pendant quelques heures dans le réfrigérateur pour éliminer un éventuel goût de chlore,
- en l'absence de consignes particulières du responsable de la distribution, du maire ou de l'ARS (ou éventuellement du médecin pour les nourrissons), l'eau du robinet peut être consommée sans risque,
- éviter les carafes filtrantes (avis de l'ANSES),
- consommer 1,5 L d'eau par jour est une valeur moyenne, variant selon l'âge, l'activité physique, l'état physiologique et/ou pathologique (nourrisson de 6 à 12 mois : 800 à 1000 mL ; enfants de 1 à 6 ans : 1 L, de 7 à 10 ans : 1,8 L , de 11 à 18 ans: 2,2 L ; adulte : hommes : 1,75 L - femmes : 1,4 L),
- il faut éviter de consommer des eaux minérales naturelles quotidiennement fortement minéralisées (résidu secs à 180°C > 1500 mg/l).

Exemples de conseils spécifiques que peut apporter le pharmacien quant à la manière optimale de consommer l'eau :

- femme ménopausée : ces patientes présentent un risque de décalcification osseuse et ont donc des besoins augmentés d'apport calcique. On l'orientera alors vers des eaux embouteillées riches en calcium, ou pour des résidents du Nord vers l'eau du robinet. Cependant, une eau peu minéralisée sera conseillée pour la prise de bisphosphonates,
- personne âgée ou hypertendue : surveiller le taux de sodium présent dans l'eau du robinet ou dans l'eau embouteillée préférée du patient, déconseiller les eaux gazeuses riches en sodium,
- pathologie rénale : en cas de lithiase rénale calcique, les besoins en eau sont augmentés, et il faudra préférer des eaux pauvres en calcium (à ajuster selon l'alimentation). En cas de lithiase urique ou cystinique, il faudra préférer une eau alcalinisante riche en bicarbonates,
- troubles dyspeptiques : une eau bicarbonatée sera recommandée.

L'eau n'est pas un produit banal, c'est un produit indispensable. Dans un certain nombre de circonstances, on peut conseiller ou déconseiller une eau, d'autant plus avec le nombre d'eaux désormais sur le marché. Auparavant, les eaux minérales étaient vendues à l'officine, avec des propriétés thérapeutiques reconnues.

Conclusion :

Dans son recueil de textes « Comment je vois le monde », Albert Einstein évoque la guerre : «La pire des institutions grégaires se nomme l'armée. Je la hais. Si un homme peut éprouver quelque plaisir à défiler en rang au son d'une musique, je méprise cet homme. Il ne mérite pas un cerveau humain puisqu'une moelle épinière le satisfait. Nous devrions faire disparaître le plus rapidement possible ce cancer de la civilisation. [...] La guerre est la chose la plus méprisable. Je préférerais me laisser assassiner que de participer à cette ignominie.».

Or, un siècle après le massacre dont est responsable la première guerre mondiale, des cicatrices sont toujours visibles et présentes. L'évocation de « cancer de la société » prend alors tout son sens.

Même si ce n'est pas la seule cause, cette guerre mondiale est en partie responsable, de la présence des ions perchlorate en France. Ce travail n'a pas permis de trancher quant à l'association entre l'exposition aux ions perchlorate et la perturbation du bilan thyroïdien. Cependant, il ne met pas en évidence l'absence d'effets sanitaires, la prudence est donc de mise. D'autant plus que cette thèse a permis de mettre en évidence la répartition quasi générale des ions perchlorate sur le territoire français. En effet, outre leur présence dans de nombreuses sources superficielles et souterraines d'eau, les ions perchlorate se retrouvent également dans de nombreuses denrées alimentaires, et notamment dans les laits destinés aux nouveau-nés.

Malgré cela, aucune solution n'est aujourd'hui mise en place pour éliminer les ions perchlorate. Le recours à des procédés d'élimination requiert au préalable l'uniformisation de la réglementation des ions perchlorate en France, où seules des recommandations sont établies.

Ainsi, depuis leur mise en évidence, les ions perchlorate restent présents dans les eaux destinées à la consommation humaine, et leur élimination, même si elle n'est pas prioritaire comparée à d'autres problèmes de santé publique, n'est pas encore prête à être mise en place. Des solutions sont cependant en cours de développement en France et dans de nombreux pays du globe, afin de trouver le moyen technique conciliant un fonctionnement à grande échelle, une innocuité vis-à-vis de l'eau traitée, et enfin présentant un coût relativement faible.

Un des principes fondamentaux en santé est la prévention primaire, prévenir vaut mieux que guérir. Il est donc indispensable de mettre en place des moyens de contenir ou d'éliminer les ions perchlorate. La prévention doit être au cœur des missions du pharmacien. Il a un rôle important à y jouer, tant dans la problématique des ions perchlorate que concernant la qualité de l'eau en général. Pour cela, les autorités sanitaires doivent les informer, les former, cependant il doit en être de même du côté des pharmaciens, qui doivent également réaliser eux-mêmes ce travail. Ainsi, le pharmacien se doit de s'informer sur la qualité de l'eau distribuée au robinet de ses patients, ce qui permettra d'améliorer la prise en charge de leurs pathologies et d'améliorer la qualité de ses conseils.

Une urgence relative se présente d'ailleurs, depuis que les conséquences climatiques du réchauffement de la planète causent la raréfaction de l'eau, et rendent caduques les moyens actuellement utilisés face aux fortes concentrations en ions perchlorate. Ainsi, le déploiement de moyens d'éliminations concrets des ions perchlorate doit être mis en place.

Annexes :

Annexe 1 : Contenu des analyses types (121)

RESSOURCE			POINT DE MISE EN DISTRIBUTION		DISTRIBUTION aux robinets visés à l'article R. 1321-5 (1°)	
RP	RS	RSadd	P1	P2	D1	D2
Paramètres microbiologiques						
			Spores de microorganismes anaérobies sulfito-réducteurs (pour les eaux d'origine superficielle ou influencées par une eau d'origine superficielle)		Spores de microorganismes anaérobies sulfito-réducteurs (pour les eaux d'origine superficielle ou influencées par une eau d'origine superficielle)	
			Bactéries coliformes		Bactéries coliformes	
Entérocoques intestinaux	Entérocoques intestinaux		Entérocoques intestinaux		Entérocoques intestinaux	
Escherichia coli	Escherichia coli		Escherichia coli		Escherichia coli	
			Dénombrement des microorganismes revivifiables à 22° C et 36° C		Dénombrement des microorganismes revivifiables à 22° C et 36° C	
Paramètres chimiques et organoleptiques						
				Acrylamide (3)		Acrylamide (3)
	Agents de surface réagissant au bleu de méthylène (lauryl sulfate de sodium)					
	Aluminium			Aluminium	Aluminium (lorsqu'il est utilisé comme agent de floculation)	
Ammonium (NH4 +)	Ammonium (NH4 +)		Ammonium (NH4 +)		Ammonium (NH4 +)	
Antimoine						Antimoine
Arsenic	Arsenic			Arsenic (2)		
Aspect, couleur, odeur	Aspect, couleur, odeur		Aspect, couleur, odeur, saveur		Aspect, couleur, odeur, saveur	
	Azote Kjeldhal (N)					
	Baryum (Ba)			Baryum (Ba)		
		Benzène		Benzène		
Bore	Bore			Bore (2)		
				Bromates (si l'eau subit un traitement d'ozonation ou un traitement de chloration)		
		Diphényléther-bromés : somme des congénères n° s 28, 47, 99, 100, 153 et 154				
Cadmium (Cd)	Cadmium (Cd)	Cadmium (Cd)				Cadmium (Cd)
Carbone organique total	Carbone organique total		Carbone organique total (6) ou oxydabilité au KMnO4 à chaud en milieu acide			
			Chlore libre et total (ou tout autre paramètre représentatif du traitement de désinfection)		Chlore libre et total (ou tout autre paramètre représentatif du traitement de désinfection)	
						Chlorites (si l'eau subit un traitement au dioxyde de chlore)
		Chloroalcanes C10-13				

				Chlorure de vinyle		Chlorure de vinyle (3)
Chlorures (Cl-)	Chlorures (Cl-)		Chlorures (Cl-) (1)			
	Chrome (Cr)					Chrome (Cr)
Conductivité	Conductivité		Conductivité		Conductivité	
	Cuivre (Cu)					Cuivre (Cu)
	Cyanures totaux			Cyanures totaux (2)		
	Demande biochimique en oxygène à 5 jours (DBO5)					
	Demande chimique en oxygène (DCO)					
Calcium	Calcium		Dureté (ou Titre hydrotimétrique) (1)			
Magnésium	Magnésium					
		1, 2 dichloroéthane		1, 2-dichloroéthane		
		Dichlorométhane				
		Di-(2-éthylhexyl) phtalate				
				Epichlorhydrine (3)		Epichlorhydrine (3)
Equilibre calcocarbonique	Equilibre calcocarbonique			Equilibre calcocarbonique (5)		
Fer dissous (sur échantillon filtré à 0,45 µm)	Fer dissous (sur échantillon filtré à 0,45 µm)			Fer total	Fer total (lorsqu'il est utilisé comme agent de floculation et pour les eaux déferrisées)	Fer total
Fluorures (F-)	Fluorures (F-)			Fluorures (F-) (2)		
	Hydrocarbures aromatiques polycycliques : somme de fluoranthène, benzo [b] fluoranthène, benzo [k] fluoranthène, benzo [a] pyrène, benzo [g, h, i] pérylène et indéno [1, 2, 3-cd] pyrène	Hydrocarbures aromatiques polycycliques (par substance individuelle) : anthracène, naphthalène, fluoranthène, benzo [b] fluoranthène, benzo [k] fluoranthène, benzo [a] pyrène, benzo [g, h, i] pérylène et indéno [1, 2, 3-cd] pyrène				Hydrocarbures aromatiques polycycliques : benzo [a] pyrène (substance individuelle) et somme de benzo [b] fluoranthène, benzo [k] fluoranthène, benzo [g, h, i] pérylène et indéno [1, 2, 3-cd] pyrène
		Hexachlorobenzène				
Hydrocarbures dissous ou émulsionnés	Hydrocarbures dissous ou émulsionnés					
Manganèse	Manganèse		Manganèse (si traitement de démanganisation)	Manganèse (2)		
	Matières en suspension					
	Mercure (Hg)	Mercure (Hg)		Mercure (Hg) (2)		
	Microcystines (4)			Microcystines (4)		
Nickel	Nickel	Nickel				Nickel
Nitrates (NO3-)	Nitrates (NO3-)		Nitrates (NO3-)		Nitrates (NO3-) (si plusieurs ressources en eau au niveau de l'unité de distribution dont une au moins délivre une eau dont la concentration en nitrates est supérieure à 50 mg / L)	
Nitrites (NO2-)	Nitrites (NO2-)		Nitrites (NO2-)			Nitrites (NO2-)
		4-nonylphénol				
		4-(1, 1', 3, 3'-tétraméthylbutyl)-phénol				
Pesticides (par substance individuelle)	Pesticides (par substance)	Pesticides (par substance individuelle) : alachlore, atrazine,		Pesticides (2) (par substance individuelle) : les substances susceptibles d'être		

	individuelle)	chlorfenvinphos, chlorpyrifos, diuron, endosulfan (somme des isomères alpha- et bêta-), hexachlorobutadiène, hexachlorocyclohexane (somme des isomères alpha-, bêta-, delta-, gamma-), isoproturon, pentachlorobenzène, pentachlorophénol, simazine et trifluraline		présentes doivent être recherchées en priorité)		
Potentiel hydrogène (pH)	Potentiel hydrogène (pH)		Potentiel hydrogène (pH)		Potentiel hydrogène (pH)	
	Phénols (indice phénol)					
Phosphore total (P2O5)	Phosphore total (P2O5)					
	Plomb	Plomb				Plomb
Sélénium (Se)	Sélénium (Se)			Sélénium (Se) (2)		
Silice	Silice					
Sodium	Sodium			Sodium		
Sulfates	Sulfates		Sulfates			
Taux de saturation en oxygène dissous	Taux de saturation en oxygène dissous					
Température	Température		Température		Température	
Tétrachloroéthylène et trichloroéthylène	Tétrachloroéthylène et trichloroéthylène			Tétrachloroéthylène et trichloroéthylène		
				Trihalométhanes : somme de chloroforme, bromoforme, dibromochlorométhane et bromodichlorométhane (si l'eau subit un traitement de chloration)		Trihalométhanes : somme de chloroforme, bromoforme, dibromochlorométhane et bromodichlorométhane (s'il y a une rechloration ou si la teneur en chlore ¹ 0,5 mg / L)
Carbonates	Carbonates		Titre alcalimétrique complet (1)			
Hydrogénocarbonates	Hydrogénocarbonates					
		Tributylétain-cation				
		Trichlorobenzène : somme des isomères 1, 2, 4-, 1, 2, 3-et 1, 3, 5-				
		Trichlorométhane (chloroforme)				
Turbidité	Turbidité		Turbidité		Turbidité	
	Zinc (Zn)					
Paramètres radiologiques						
				Activité alpha globale (1, 7)		
				Activité bêta globale (1, 7)		
				Tritium (2, 1, 7)		
(1) Ces paramètres peuvent être exclus de l'analyse dans les conditions mentionnées à l'article 3-IV du présent arrêté.		(3) La limite de qualité se réfère à la concentration résiduelle en monomères dans l'eau, calculée conformément aux spécifications de la migration maximale du polymère correspondant en contact avec l'eau.				
(2) Ces paramètres peuvent être exclus de l'analyse dans les conditions mentionnées à l'article 3-V du présent arrêté.		(4) Seulement nécessaire lorsque les observations visuelles et / ou analytiques mettent en évidence un risque de prolifération de cyanobactéries.				
		(5) Les concentrations en calcium, magnésium et potassium doivent être exprimées par le laboratoire d'analyses concomitamment au calcul de l'équilibre calcocarbonique.				
		(6) Ce paramètre doit être mesuré pour les systèmes de production et de distribution desservant au moins 5 000 habitants.				
		(7) Afin de déterminer l'activité bêta globale résiduelle, le potassium doit être recherché concomitamment à la mesure des paramètres radiologiques.				

Annexe 2 : Autres paramètres chimiques et organoleptiques des limites et références de qualités fixées par la directive européenne 98/83/CE et les articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du code de la santé publique (125)

PARAMÈTRES	LIMITES DE QUALITÉ	UNITÉS	NOTES
Acrylamide.	0,10	µg/L	La limite de qualité se réfère à la concentration résiduelle en monomères dans l'eau, calculée conformément aux spécifications de la migration maximale du polymère correspondant en contact avec l'eau.
Antimoine.	5,0	µg/L	
Arsenic.	10	µg/L	
Baryum.	0,70	mg/L	
Benzène.	1,0	µg/L	
Benzo[a]pyrène.	0,010	µg/L	
Bore.	1,0	mg/L	
Bromates.	10	µg/L	La valeur la plus faible possible inférieure à cette limite doit être visée sans pour autant compromettre la désinfection. La limite de qualité est fixée à 25 µg/L jusqu'au 25 décembre 2008. Toutes les mesures appropriées doivent être prises pour réduire le plus possible la concentration de bromates dans les eaux destinées à la consommation humaine, au cours de la période nécessaire pour se conformer à la limite de qualité de 10 µg/L.
Cadmium.	5,0	µg/L	
Chlorure de vinyle.	0,50	µg/L	La limite de qualité se réfère également à la concentration résiduelle en monomères dans l'eau, calculée conformément aux spécifications de la migration maximale du polymère correspondant en contact avec l'eau.
Chrome.	50	µg/L	
Cuivre.	2,0	mg/L	
Cyanures totaux.	50	µg/L	
1,2-dichloroéthane.	3,0	µg/L	
Epichlorhydrine.	0,10	µg/L	La limite de qualité se réfère à la concentration résiduelle en monomères dans l'eau, calculée conformément aux spécifications de la migration maximale du polymère correspondant en contact avec l'eau.

PARAMÈTRES	LIMITES DE QUALITÉ	UNITÉS	NOTES
Fluorures.	1,50	mg/L	
Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).	0,10	µg/L	Pour la somme des composés suivants: benzo[b]fluoranthène, benzo[k]fluoranthène, benzo[ghi]pérylène, indénol[1,2,3-cd]pyrène.
Mercure.	1,0	µg/L	
Total microcystines.	1,0	µg/L	Par « total microcystines », on entend la somme de toutes les microcystines détectées et quantifiées.
Nickel.	20	µg/L	
Nitrates (NO ₃).	50	mg/L	La somme de la concentration en nitrates divisée par 50 et de celle en nitrites divisée par 3 doit rester inférieure à 1.
Nitrites (NO ₂).	0,50	mg/L	En sortie des installations de traitement, la concentration en nitrites doit être inférieure ou égale à 0,10 mg/L.
Pesticides (par substance individuelle).	0,10	µg/L	Par « pesticides », on entend :
Aldrine, dieldrine, heptachlore, heptachlorépoxyde (par substance individuelle).	0,03	µg/L	<ul style="list-style-type: none"> - les insecticides organiques ; - les herbicides organiques ; - les fongicides organiques ; - les nématocides organiques ; - les acaricides organiques ; - les algicides organiques ; - les rodenticides organiques ; - les produits antimoisissures organiques ; - les produits apparentés (notamment les régulateurs de croissance) et leurs métabolites, produits de dégradation et de réaction pertinents.
Total pesticides.	0,50	µg/L	Par « total pesticides », on entend la somme de tous les pesticides individualisés détectés et quantifiés.
Plomb.	10	µg/L	<p>La limite de qualité est fixée à 25 µg/L jusqu'au 25 décembre 2013. Les mesures appropriées pour réduire progressivement la concentration en plomb dans les eaux destinées à la consommation humaine au cours de la période nécessaire pour se conformer à la limite de qualité de 10 µg/L sont précisées aux articles R. 1321-55 et R. 1321-49 (arrêté d'application).</p> <p>Lors de la mise en œuvre des mesures destinées à atteindre cette valeur, la priorité est donnée aux cas où les concentrations en plomb dans les eaux destinées à la consommation humaine sont les plus élevées.</p>
Sélénium.	10	µg/L	
Tétrachloroéthylène et trichloroéthylène.	10	µg/L	Somme des concentrations des paramètres spécifiés.
Total trihalométhanes (THM).	100	µg/L	<p>La valeur la plus faible possible inférieure à cette valeur doit être visée sans pour autant compromettre la désinfection. Par « total trihalométhanes », on entend la somme de: chloroforme, bromoforme, dibromochlorométhane et bromodichlorométhane.</p> <p>La limite de qualité est fixée à 150 µg/L jusqu'au 25 décembre 2008. Toutes les mesures appropriées doivent être prises pour réduire le plus possible la concentration de THM dans les eaux destinées à la consommation humaine, au cours de la période nécessaire pour se conformer à la limite de qualité.</p>
PARAMÈTRES	LIMITES DE QUALITÉ	UNITÉS	NOTES
Turbidité.	1,0	NFU	<p>La limite de qualité est applicable au point de mise en distribution, pour les eaux visées à l'article R. 1321-37 et pour les eaux d'origine souterraine provenant de milieux fissurés présentant une turbidité périodique importante et supérieure à 2,0 NFU. En cas de mise en œuvre d'un traitement de neutralisation ou de reminéralisation, la limite de qualité s'applique hors augmentation éventuelle de turbidité due au traitement.</p> <p>Pour les installations qui sont d'un débit inférieur à 1 000 m³/j ou qui desservent des unités de distribution de moins de 5 000 habitants, la limite de qualité est fixée à 2,0 NFU jusqu'au 25 décembre 2008. Toutes les mesures appropriées doivent être prises pour réduire le plus possible la turbidité, au cours de la période nécessaire pour se conformer à la limite de qualité de 1,0 NFU.</p>

PARAMÈTRES	RÉFÉRENCES DE QUALITÉ	UNITÉS	NOTES
Aluminium total.	200	µg/L	A l'exception des eaux ayant subi un traitement thermique pour la production d'eau chaude pour lesquelles la valeur de 500 µg/L (Al) ne doit pas être dépassée.
Ammonium (NH ₄ ⁺).	0,10	mg/L	S'il est démontré que l'ammonium a une origine naturelle, la valeur à respecter est de 0,50 mg/L pour les eaux souterraines.
Carbone organique total (COT). Oxydabilité au permanganate de potassium mesurée après 10 minutes en milieu acide.	2,0 et aucun changement anormal 5,0	mg/L mg/L O ₂	
Chlore libre et total.			Absence d'odeur ou de saveur désagréable et pas de changement anormal.
Chlorites.	0,20	mg/L	Sans compromettre la désinfection, la valeur la plus faible possible doit être visée.
Chlorures.	250	mg/L	Les eaux ne doivent pas être corrosives.
Conductivité.	≥ 180 et ≤ 1 000 ou ≥ 200 et ≤ 1 100	µS/cm à 20 °C µS/cm à 25 °C	Les eaux ne doivent pas être corrosives.

PARAMÈTRES	RÉFÉRENCES DE QUALITÉ	UNITÉS	NOTES
Couleur.	Acceptable pour les consommateurs et aucun changement anormal notamment une couleur inférieure ou égale à 15	mg/L (Pt)	
Cuivre.	1,0	mg/L	
Equilibre calcocarbonique.	Les eaux doivent être à l'équilibre calcocarbonique ou légèrement incrustantes		
Fer total.	200	µg/L	
Manganèse.	50	µg/L	
Odeur.	Acceptable pour les consommateurs et aucun changement anormal, notamment pas d'odeur détectée pour un taux de dilution de 3 à 25 °C		
pH (concentration en ions hydrogène).	≥ 6,5 et ≤ 9	unités pH	Les eaux ne doivent pas être agressives.
Saveur.	Acceptable pour les consommateurs et aucun changement anormal, notamment pas de saveur détectée pour un taux de dilution de 3 à 25 °C		
Sodium.	200	mg/L	
Sulfates.	250	mg/L	Les eaux ne doivent pas être corrosives.
Température.	25	°C	A l'exception des eaux ayant subi un traitement thermique pour la production d'eau chaude. Cette valeur ne s'applique pas dans les départements d'outre-mer.
Turbidité.	0,5	NFU	La référence de qualité est applicable au point de mise en distribution, pour les eaux visées à l'article R. 1321-37 et pour les eaux d'origine souterraine provenant de milieux fissurés présentant une turbidité périodique importante et supérieure à 2,0 NFU. En cas de mise en œuvre d'un traitement de neutralisation ou de reminéralisation, la référence de qualité s'applique hors augmentation éventuelle de turbidité due au traitement.
	2	NFU	La référence de qualité s'applique aux robinets normalement utilisés pour la consommation humaine.



PREFET DU NORD

Agence Régionale de
Santé
Nord Pas de Calais

Direction de la Santé
Publique et Environnementale

**Arrêté portant restriction d'usage à des fins alimentaires
de l'eau distribuée par les réseaux publics**

Le Préfet de la zone de défense et de sécurité Nord
Préfet de la région Nord-Pas-de-Calais
Préfet du Nord
Officier de la Légion d'Honneur
Commandeur de l'Ordre National du Mérite

Vu la Constitution de la République Française

Vu le Code de la santé publique, et notamment les articles L.1321-1 à L.1321-10 et R.1321-2, R.1321-29 et R.1321-30 ;

Vu la loi n° 82.213 du 2 mars 1982 modifiée relative aux droits et libertés des communes, des départements et des régions ;

Vu la loi n°2009-879 du 21 juillet 2009 modifiée portant réforme de l'hôpital et relative aux patients, à la santé et aux territoires ;

Vu le décret n° 2004-374 du 29 avril 2004 modifié relatif aux pouvoirs des préfets, à l'organisation et à l'action des services de l'Etat dans les régions et départements,

Vu le décret n°2010-336 du 31 mars 2009 portant création des agences régionales de santé ;

Vu le décret du 8 avril 2011 portant nomination de M. Dominique BUR, préfet de la région Nord-Pas-de-Calais, Préfet de la zone de défense Nord, Préfet du Nord ;

Vu l'avis émis par le Conseil Départemental de l'Environnement et des Risques Technologiques lors de sa réunion du 16 octobre 2012 ;

Vu les résultats des analyses d'autosurveillance d'une part, et des analyses réalisées dans le cadre de la campagne exploratoire menée par l'ARS d'autre part ;

Considérant que les eaux destinées à la consommation humaine ne doivent pas contenir un nombre ou une concentration de micro-organismes, de parasites ou de toutes autres substances constituant un danger potentiel pour la santé des personnes ;

Considérant le rapport du 26 juillet 2012 du Directeur Général de l'ARS qui précise que la distribution de l'eau en l'état, pour tout ou partie du territoire des communes identifiées dans les listes visées dans le présent arrêté et qui seront annexées à un arrêté complémentaire, est susceptible d'exposer les populations sensibles (les nourrissons de moins de six mois, les femmes enceintes et les femmes allaitantes), à un risque pour leur santé, en raison d'une teneur en perchlorates supérieure aux seuils déterminés par la Direction Générale de la Santé sur la base de l'avis de l'Agence Nationale de Sécurité Sanitaire, de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail (ANSES) ;

Annexe 4 : Arrêté fixé par le préfet du Nord portant restriction d'usage à des fins alimentaires de l'eau distribuée par les réseaux publics du 25.10.2012 partie 2

Sur proposition du Directeur Général de l'Agence Régionale de Santé Nord Pas-de-Calais et du Secrétaire Général de la Préfecture du Nord ;

ARRÊTE

Article 1^{er} : Une restriction d'usage de l'eau destinée à la consommation humaine distribuée par les réseaux publics est prononcée pour :

- l'alimentation des nourrissons de moins de 6 mois, lorsque la concentration en ions perchlorates dépasse 4µg/l,
- l'alimentation des femmes enceintes et des femmes allaitantes, dès lors que la concentration en ions perchlorates dépasse 15µg/l.

Cette restriction est valable jusqu'à la mise en place de solutions, validées par des résultats analytiques, permettant de respecter les recommandations en vigueur émises par la Direction Générale de la Santé, relatives à la teneur en perchlorates dans l'eau distribuée et ainsi de mettre fin aux risques existants pour la santé publique.

Article 2 : Les listes de communes concernées par cette restriction sont fixées par un arrêté préfectoral complémentaire. Elles sont mises à jour régulièrement par l'Agence Régionale de Santé (ARS) Nord-Pas-de-Calais en fonction des évolutions des concentrations liées à la mise en œuvre de solutions permettant d'abaisser durablement les teneurs en perchlorates. Pour valider ces évolutions, l'ARS peut demander des analyses complémentaires. En l'absence d'information sur la mise en œuvre de solution, l'analyse des ions perchlorates peut également être ajoutée au contrôle sanitaire à une fréquence définie par l'ARS.

Ces analyses sont à la charge des responsables de la production ou de la distribution d'eau.

Article 3 : Les personnes responsables de la production ou de la distribution d'eau informent tous les consommateurs concernés par la présente restriction des mesures à prendre pour protéger la santé des nourrissons de moins de six mois, des femmes enceintes et des femmes allaitantes.

Article 4 : Les personnes responsables de la production ou de la distribution d'eau informent le maire, le directeur général de l'agence régionale de santé de l'application effective des mesures prises. Le directeur général de l'agence régionale de santé transmet cette information au Préfet.

Article 5 : La présente décision est susceptible de faire l'objet d'un recours contentieux devant le Tribunal administratif de Lille dans un délai de deux mois à compter de sa publication. Elle est également susceptible de faire l'objet d'un recours gracieux auprès de mes services ainsi que d'un recours hiérarchique auprès du Ministre des Affaires Sociales et de la Santé dans le même délai.

Un recours contentieux peut ensuite être formé auprès du Tribunal administratif de Lille dans le délai de deux mois suivant le rejet explicite ou implicite du recours gracieux ou hiérarchique.

Article 6 : Le Secrétaire Général de la Préfecture du Nord, le Directeur Général de l'Agence Régionale de Santé Nord-Pas-de-Calais ainsi que les responsables de la production ou de la distribution d'eau des communes concernées par la mesure de restriction sont chargés, chacun en ce qui le concerne, de l'exécution du présent arrêté qui sera notifié aux intéressés et publié au recueil des actes administratifs de la Préfecture du Nord.

Une copie du présent arrêté sera adressée aux Sous-préfets d'arrondissement du département du Nord.

Fait à Lille, le 25 OCT. 2012



Dominique BUR

Annexe 5 : Arrêté fixé par le préfet du Pas-de-Calais portant restriction d'usage à des fins alimentaires de l'eau distribuée par les réseaux publics du 25.10.2012 partie 1



PREFET DU PAS-DE-CALAIS

Agence Régionale de
Santé
Nord Pas de Calais

Direction de la Santé
Publique et Environnementale

Arrêté complémentaire à l'arrêté préfectoral en date du 25 octobre 2012
portant restriction d'usage, à des fins alimentaires,
de l'eau distribuée par les réseaux publics

Le Préfet du Pas-de-Calais
Chevalier de l'ordre national du Mérite

VU la Constitution de la République Française;

VU le Code de la santé publique, et notamment les articles L. 1321-1 à L. 1321-10 et R. 1321-2, R. 1321-29 et R. 1321-30 ;

Vu la loi n° 82.213 du 2 mars 1982 modifiée relative aux droits et libertés des communes, des départements et des régions ;

Vu la loi n°2009-879 du 21 juillet 2009 modifiée portant réforme de l'hôpital et relative aux patients, à la santé et aux territoires ;

Vu le décret n°2010-336 du 31 mars 2009 portant création des agences régionales de santé ;

VU le décret n° 2004-374 du 29 avril 2004 modifié relatif aux pouvoirs des préfets, à l'organisation et à l'action des services de l'État dans les régions et départements;

Vu le décret du 26 janvier 2012 portant nomination de M. Denis ROBIN, en qualité de Préfet du Pas-de-Calais (hors-classe) ;

Vu le Conseil Départemental de l'Environnement et des Risques Technologiques consulté lors de sa réunion du 25 octobre 2012 ;

Vu l'arrêté préfectoral en date du 25 octobre 2012, portant restriction d'usage, à des fins alimentaires, de l'eau distribuée par les réseaux publics ;

Vu les résultats des analyses d'autosurveillance d'une part, et des analyses réalisées dans le cadre de la campagne exploratoire menée par l'ARS d'autre part ;

Considérant que les eaux destinées à la consommation humaine ne doivent pas contenir un nombre ou une concentration de micro-organismes, de parasites ou de toutes autres substances constituant un danger potentiel pour la santé des personnes ;

Considérant le rapport du 26 juillet 2012 du Directeur Général de l'ARS, qui précise que la distribution de l'eau en l'état, pour tout ou partie du territoire des communes identifiées dans les listes annexées au présent arrêté complémentaire, est susceptible d'exposer les populations sensibles (les nourrissons de moins de six mois, les femmes enceintes et les femmes allaitantes), à un risque pour leur santé, en raison d'une teneur en perchlorates supérieure aux seuils déterminés par la Direction Générale de la Santé sur la base de l'avis de l'Agence Nationale de Sécurité Sanitaire, de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail (ANSES);

Sur proposition de M. le Directeur Général de l'Agence Régionale de Santé Nord Pas-de-Calais,

1

Annexe 6 : Arrêté fixé par le préfet du Pas-de-Calais portant restriction d'usage à des fins alimentaires de l'eau distribuée par les réseaux publics du 25.10.2012 partie 2

ARRÊTE


Article 1er Les listes des communes concernées par la restriction édictée par l'arrêté du 25 octobre 2012 portant restriction d'usage, à des fins alimentaires, de l'eau distribuée par les réseaux publics, dont la teneur en ions perchlorates est supérieure aux seuils recommandés par la Direction Générale de la Santé, pour les nourrissons de moins de six mois, les femmes enceintes et les femmes allaitantes, sont annexées au présent arrêté.

Article 2 La présente décision est susceptible de faire l'objet d'un recours contentieux devant le Tribunal administratif de Lille dans un délai de deux mois à compter de sa publication. Elle est également susceptible de faire l'objet d'un recours gracieux auprès de mes services ainsi que d'un recours hiérarchique auprès du Ministre des Affaires Sociales et de la Santé dans le même délai. Un recours contentieux peut ensuite être formé auprès du Tribunal administratif de Lille dans le délai de deux mois suivant le rejet explicite ou implicite du recours gracieux ou hiérarchique.

Article 3 Le Secrétaire Général de la Préfecture du Pas-de-Calais, le Directeur Général de l'Agence Régionale de Santé, ainsi que les responsables de la production ou de la distribution d'eau des communes concernées par la mesure de restriction sont chargés, chacun en ce qui le concerne, de l'exécution du présent arrêté qui sera publié au recueil des actes administratifs de la Préfecture du Pas-de-Calais.

Fait à ARRAS, le

25 OCT. 2012

Le Préfet,

Denis ROBIN

Annexe 7: Mise à jour des communes concernées par la restriction de consommation dans le Nord de la France le 14.02.2018 concernant la présence d'ions perchlorate dans les EDCH

Mise à jour des communes modifiées (14/02/2013)



Levée de restriction

Communes sorties de la liste de restriction (taux maintenant inférieur à 4µg/l)

Département	Communes	Unité de distribution (UDI)
59	BRUNEMONT	BUGNICOURT
59	BUGNICOURT	BUGNICOURT
59	ESCAUDOEUVRES	ESCAUDOEUVRES
59	RAMILLIES	ESCAUDOEUVRES
59	TILLOY LEZ CAMBRAI	ESCAUDOEUVRES
59	CAMBRAI Morenchies	MORENCHIES
59	VILLERS OUTREAUX	VILLERS OUTREAUX

Changement de classe de restriction

Liste des communes passées à un taux inférieur à 15µg/l mais supérieur à 4µg/l

Département	Communes	Unité de distribution (UDI)
59	MARQUETTE EN OSTREVANT	MARQUETTE EN OSTREVANT

Le Pharmacien d'officine, son équipe et la perception de la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine

Dans le cadre de ma thèse, je cherche à évaluer la perception qu'a le pharmacien d'officine, ainsi que son équipe, de la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine et de ses polluants potentiels. Ce questionnaire permettra de voir les différents ressentis selon les régions, les zones d'exercices et les polluants propres aux différentes zones.

Je vous remercie d'avance pour votre temps et vos réponses.

***Obligatoire**

Votre profil

1. Vous êtes *

Une seule réponse possible.

- Un homme
 Une femme

2. Quel âge avez vous? *

Une seule réponse possible.

- 20-29 ans
 30-39 ans
 40-49 ans
 50-59 ans
 60-69 ans
 >70 ans
 Autre : _____

3. Fonction au sein de l'officine *

Une seule réponse possible.

- Pharmacien titulaire
 Pharmacien adjoint
 Préparateur/Préparatrice en pharmacie

4. Département et ville d'exercice (Numéro de département, nom de la ville et son code postal) *

5. Type de pharmacie **Une seule réponse possible.*

- Pharmacie de campagne (environs 2 000 habitants, une pharmacie pour un ou plusieurs villages)
- Pharmacie de ville moyenne (autours de 50 000 habitants)
- Pharmacie de grande ville (autours de 200 000 habitants, exemple Lille, Paris, Bordeaux)

la perception de la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine**6. Faites vous confiance à l'eau distribuée au robinet des consommateurs? ****Une seule réponse possible.*

1	2	3	4		
Pas du tout confiance	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Tout à fait confiance

7. Buvez-vous l'eau du robinet? (hors préparation des aliments, du café, des potages...)**Une seule réponse possible.*

- Oui
- Non

8. Si vous avez répondu non à la question précédente, pour quelle raison prioritairement?*Une seule réponse possible.*

- Crainte de la présence de polluants, de substances nocives pour la santé
- Goût
- Odeur
- Couleur
- Coût
- Alerte des pouvoirs publics
- Autre : _____

9. Toujours si vous avez répondu non à l'avant dernière question. Y a-t'il d'autre(s) raison(s) qui vous poussent à ne pas consommer l'eau du robinet?*Plusieurs réponses possibles.*

- Crainte de la présence de polluants, de substances nocives pour la santé
- Goût
- Odeur
- Couleur
- Coût
- Alerte des pouvoirs publics
- Autre : _____

10. L'eau arrivant à votre robinet a pour principale origine : **Une seule réponse possible.*

- Nappe souterraine
 Eaux de surface
 Ne sait pas

11. Craignez vous la présence d'éléments nocifs dans l'eau distribuée au robinet de la ville où se situe votre officine? **Une seule réponse possible.*

- Oui
 Non

12. Si oui, le ou lesquels?*Plusieurs réponses possibles.*

- Ions nitrates
 Ions perchlorates
 Ions sulfates
 Pesticides
 Plomb
 Aluminium
 Calcaire
 Micro-organisme
 Résidus de médicaments
 Autre : _____

13. Vous êtes-vous déjà renseigné sur la qualité de l'eau distribuée au robinet de la commune où se trouve votre officine? **Une seule réponse possible.*

- Oui
 Non

14. Si oui, auprès de qui?*Une seule réponse possible.*

- Mairie de la commune
 ARS
 Site internet
 Conseil départemental
 Conseil régional
 Facture d'eau de l'officine
 Organisme, société en charge de la distribution de l'eau dans la commune
 Organisme, société en charge de l'assainissement de l'eau dans la commune
 Organisme, société en charge de la production d'eau potable dans la commune
 Autre : _____

15. Si non, où iriez vous chercher les renseignements si besoin?*Une seule réponse possible.*

- Mairie du lieu de distribution
- ARS
- Site internet
- Conseil départemental
- Conseil régional
- Facture d'eau de l'officine
- Organisme, société en charge de la distribution de l'eau dans la commune
- Organisme, société en charge de l'assainissement de l'eau dans la commune
- Organisme, société en charge de la production de l'eau dans la commune
- Autre : _____

16. Êtes-vous parfois consultés à l'officine pour des question concernant l'eau du robinet? **Une seule réponse possible.*

- Jamais
- 1 fois/an en moyenne
- 1 fois/semestre en moyenne
- 1 fois/trimestre en moyenne
- 1 fois/mois en moyenne
- 1 fois/semaine en moyenne
- >1 fois/semaine

17. Si oui, quelles sont les principales préoccupations des patients?*Une seule réponse possible.*

- Qualité de l'eau en général
- Présence de nitrates
- Présence de pesticides
- Présence d'ions perchlorates
- Usage de l'eau pour la préparation des biberons
- Autre : _____

18. Dans certaines circonstances, des restrictions d'usage de l'eau du robinet peuvent être émises par les pouvoirs publics. Êtes vous au courant de l'existence d'une restriction en qui concerne l'eau distribuée actuellement dans la commune de votre lieu d'exercice? **Une seule réponse possible.*

- Oui
- Non

19. Si oui, cette restriction concerne*Une seule réponse possible.*

- La concentration de pesticides dans l'eau du robinet jugée préoccupante
- La concentration de nitrates dans l'eau du robinet jugée préoccupante
- La concentration d'ions perchlorates dans l'eau du robinet jugée préoccupante
- La baisse du niveau des nappes phréatiques jugée préoccupante
- Autre : _____

20. Avez-vous déjà entendu parler d'une possible restriction de consommation de l'eau du robinet spécifiquement en lien avec la présence des ions perchlorates? **Une seule réponse possible.*

- Oui
- Non
- Ne sais pas

21. Si oui, depuis quand en avez vous entendu parler?*Une seule réponse possible.*

- Depuis 2011, période à laquelle ces ions ont été mis en évidence dans l'eau du robinet de certaines communes en France
- Très récemment avec les nouvelles restrictions établies dans la métropole lilloise
- Entre ces deux périodes
- Autre : _____

22. Connaissiez vous les effets potentiels des ions perchlorates? **Une seule réponse possible.*

- Oui
- Non

23. Si oui, pouvez vous les préciser?

24. Savez-vous quels patients sont sensibles aux effets des ions perchlorates? **Plusieurs réponses possibles.*

- Tout le monde
- Les personnes âgées
- Les femmes enceintes
- Les enfants
- Les nourrissons
- Ne sait pas
- Autre : _____

25. Connaissez-vous l'origine de la présence des ions perchlorates en France? **Une seule réponse possible.*

- Oui
 Non

26. Si oui, pouvez-vous préciser?

27. Vous sentez-vous assez informés sur la problématiques des ions perchlorates? **Une seule réponse possible.*

- Oui
 Non
 Non concerné

28. Savez-vous si votre lieu d'exercice est concerné par une restriction de consommation en lien avec les ions perchlorates? **Une seule réponse possible.*

- Oui
 Non
 Ne sait pas

29. Si oui, cette restriction concerne*Plusieurs réponses possibles.*

- Toute population
 Les femmes enceintes
 Les nourrissons
 Les enfants
 Les personnes âgées
 Les personnes atteintes de certaines pathologies

30. Si oui, comment avez-vous eu connaissance de la restriction de consommation liée aux ions perchlorates?*Plusieurs réponses possibles.*

- Presse scientifique
- Presse locale (type Voix du Nord, Var matin...)
- Messages informatifs de la région/commune ou arrêté officiel
- Au comptoir à l'officine
- Sur votre facture d'eau
- Lors de discussions avec des collègues
- Lors de discussions avec des professionnels de santé (autres que pharmaciens/préparateurs)
- Autre : _____

31. Si votre lieu d'exercice est concerné par une restriction de consommation liée à la présence d'ions perchlorates dans l'eau "du robinet", informez-vous :*Une seule réponse possible.*

- Tout les patients
- Seulement les personnes âgées
- Seulement les femmes enceintes
- Seulement les mamans avec un nouveau-né
- Seulement les patients qui vous en parlent
- Aucun patient

32. Si vous n'informez aucun patient, pour quelle raison?*Une seule réponse possible.*

- Ce n'est pas le rôle du pharmacien/préparateur
- Vous ne vous sentez pas assez informé sur la problématique des ions perchlorates
- Vous n'avez pas le temps
- Vous n'y pensez pas
- Autre : _____

33. Si vous informez vos patients, comment passez-vous l'information?*Plusieurs réponses possibles.*

- Par oral
- Via une affiche, des dépliants
- Sur un écran
- Autre : _____

34. Vous sentez-vous en général concerné par la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine? **Une seule réponse possible.*

- Oui
- Non

35. Vous sentez-vous en général concerné par la qualité de l'eau de loisir? (baignade autorisées à proximité de votre lieu d'exercice) *

Une seule réponse possible.

Oui

Non

36. Commentaires

Bibliographie :

1. GOUZY A. INERIS - Données technico-économiques sur les substances chimiques en France PERCHLORATE D'AMMONIUM. 2014 mars p. 71.
2. Ye L, You H, Yao J, Su H. Water treatment technologies for perchlorate: A review. *Desalination*. 16 juill 2012;298:1-12.
3. Sturchio NC, Beloso A, Heraty LJ, Wheatcraft S, Schumer R. Isotopic tracing of perchlorate sources in groundwater from Pomona, California. *Applied Geochemistry*. 1 avr 2014;43:80-7.
4. TOXNET HSBD perchlorate d'AMMONIUM [Internet]. [cité 27 janv 2019]. Disponible sur: <https://www.toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search2/f?./temp/~ueLsth:1>
5. Kumarathilaka P, Oze C, Indraratne SP, Vithanage M. Perchlorate as an emerging contaminant in soil, water and food. *Chemosphere*. mai 2016;150:667-77.
6. Snyder SA, Vanderford BJ, Rexing DJ. Trace Analysis of Bromate, Chlorate, Iodate, and Perchlorate in Natural and Bottled Waters. *Environ Sci Technol*. 1 juin 2005;39(12):4586-93.
7. Wagner HP, Pepich BV, Pohl C, Later D, Joyce R, Srinivasan K, et al. US Environmental Protection Agency Method 314.1, an automated sample preconcentration/matrix elimination suppressed conductivity method for the analysis of trace levels (0.50µg/L) of perchlorate in drinking water. *Journal of Chromatography A*. juin 2006;1118(1):85-93.
8. Wendelken SC, Vanatta LE, Coleman DE, Munch DJ. Perchlorate in water via US Environmental Protection Agency Method 331. *Journal of Chromatography A*. juin 2006;1118(1):94-9.
9. Wagner HP, Pepich BV, Pohl C, Later D, Srinivasan K, Lin R, et al. Selective method for the analysis of perchlorate in drinking waters at nanogram per liter levels, using two-dimensional ion chromatography with suppressed conductivity detection. *Journal of Chromatography A*. juin 2007;1155(1):15-21.
10. Mosier-Boss PA, Putnam MD. Detection of perchlorate using Ag/DMAH+ SERS-active capture matrices. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. déc 2014;133:156-64.
11. TOXNET HSBD perchlorate SODIUM [Internet]. [cité 27 janv 2019]. Disponible sur: <https://www.toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search2/f?./temp/~ueLsth:4>
12. TOXNET HSBD perchlorate POTASSIUM [Internet]. [cité 27 janv 2019]. Disponible sur: <https://www.toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search2/f?./temp/~ueLsth:2>

13. Pleus RC, Corey LM. Environmental exposure to perchlorate: A review of toxicology and human health. *Toxicology and Applied Pharmacology*. 1 nov 2018;358:102-9.
14. Desaillood R, Wemeau J-L. Faut-il craindre les ions perchlorate dans l'environnement ? *La Presse Médicale*. 1 janv 2016;45(1):107-16.
15. Greer MA, Goodman G, Pleus RC, Greer SE. Health effects assessment for environmental perchlorate contamination: the dose response for inhibition of thyroidal radioiodine uptake in humans. *Environ Health Perspect*. sept 2002;110(9):927-37.
16. Council NR, Studies D on E and L, Toxicology B on ES and, Ingestion C to A the HI of P. *Health Implications of Perchlorate Ingestion*. National Academies Press; 2005. 276 p.
17. Clewell HJ, Gentry PR, Hack CE, Greene T, Clewell RA. An evaluation of the USEPA Proposed Approaches for applying a biologically based dose-response model in a risk assessment for perchlorate in drinking water. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 1 avr 2019;103:237-52.
18. Iodide handling disorders (NIS, TPO, TG, IYD). *Best Practice & Research Clinical Endocrinology & Metabolism*. 1 mars 2017;31(2):195-212.
19. Anses. Etude INCA 2: Données de consommations et habitudes alimentaires de l'étude INCA 2 [Internet]. 2014 [cité 6 sept 2019]. Disponible sur: fr/datasets/donnees-de-consommations-et-habitudes-alimentaires-de-letude-inca-2-3/
20. ANSES R d'expertise collective. ANSES 2016 Actualisation des repères du PNNS : élaboration des références nutritionnelles [Internet]. 2016 [cité 17 sept 2018]. Disponible sur: www.anses.fr
21. Skeaff S. Iodine Deficiency in Pregnancy: The Effect on Neurodevelopment in the Child. *Nutrients*. 18 févr 2011;3(2):265-73.
22. Caron Ph, Glinoeur D, Lecomte P, Orgiazzi J, Wémeau J-L. Apport iodé en France: prévention de la carence iodée au cours de la grossesse et l'allaitement. *Annales d'Endocrinologie*. sept 2006;67(4):281-6.
23. Vermiglio F, Lo Presti VP, Moleti M, Sidoti M, Tortorella G, Scaffidi G, et al. Attention deficit and hyperactivity disorders in the offspring of mothers exposed to mild-moderate iodine deficiency: a possible novel iodine deficiency disorder in developed countries. *J Clin Endocrinol Metab*. déc 2004;89(12):6054-60.
24. Román GC. Autism: transient in utero hypothyroxinemia related to maternal flavonoid ingestion during pregnancy and to other environmental antithyroid agents. *J Neurol Sci*. 15 nov 2007;262(1-2):15-26.
25. Haddow JE, Palomaki GE, Allan WC, Williams JR, Knight GJ, Gagnon J, et al. Maternal thyroid deficiency during pregnancy and subsequent neuropsychological development of the child. *N Engl J Med*. 19 août 1999;341(8):549-55.

26. Brent GA. Perchlorate Exposure in Pregnancy and Cognitive Outcomes in Children: It's Not Your Mother's Thyroid. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*. nov 2014;99(11):4066-8.
27. Bienkowski B. Lower IQ in Children Linked to Chemical in Water. *Scientific American*. :5.
28. Caron P. Carence iodée: épidémiologie, conséquences, prophylaxie au cours de la grossesse et l'allaitement. *Journal de Pédiatrie et de Puériculture*. 1 févr 2007;20(1):9-13.
29. Steinmaus C, Pearl M, Kharrazi M, Blount BC, Miller MD, Pearce EN, et al. Thyroid Hormones and Moderate Exposure to Perchlorate during Pregnancy in Women in Southern California. *Environmental Health Perspectives*. juin 2016;124(6):861-7.
30. Thyroid Dysfunction Induced by Amiodarone Therapy Treatment & Management: Medical Care, Surgical Care, Consultations. 20 oct 2019 [cité 23 oct 2019]; Disponible sur: <https://emedicine.medscape.com/article/129033-treatment>
31. Dohán O, Portulano C, Basquin C, Reyna-Neyra A, Amzel LM, Carrasco N. The Na⁺/I⁻ symporter (NIS) mediates electroneutral active transport of the environmental pollutant perchlorate. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 18 déc 2007;104(51):20250-5.
32. Blount BC, Valentin-Blasini L. Analysis of perchlorate, thiocyanate, nitrate and iodide in human amniotic fluid using ion chromatography and electrospray tandem mass spectrometry. *Analytica Chimica Acta*. 10 mai 2006;567(1):87-93.
33. Logothetopoulos J, Scott RF. Active iodide transport across the placenta of the guinea-pig, rabbit and rat. *J Physiol*. 28 mai 1956;132(2):365-71.
34. Blount BC, Rich DQ, Valentin-Blasini L, Lashley S, Ananth CV, Murphy E, et al. Perinatal exposure to perchlorate, thiocyanate, and nitrate in New Jersey mothers and newborns. *Environ Sci Technol*. 1 oct 2009;43(19):7543-9.
35. Glinoe D. The regulation of thyroid function during normal pregnancy: importance of the iodine nutrition status. *Best Practice & Research Clinical Endocrinology & Metabolism*. 1 juin 2004;18(2):133-52.
36. Fantz CR, Dagogo-Jack S, Ladenson JH, Gronowski AM. Thyroid Function during Pregnancy. *Clinical Chemistry*. 1 déc 1999;45(12):2250-8.
37. Pearce EN, Lazarus JH, Smyth PPA, He X, Dall'amico D, Parkes AB, et al. Perchlorate and thiocyanate exposure and thyroid function in first-trimester pregnant women. *J Clin Endocrinol Metab*. juill 2010;95(7):3207-15.
38. Pearce EN, Spencer CA, Mestman JH, Lee RH, Bergoglio LM, Mereshian P, et al. Effect of environmental perchlorate on thyroid function in pregnant women from Córdoba, Argentina, and Los Angeles, California. *Endocr Pract*. juin 2011;17(3):412-7.

39. Pearce EN, Alexiou M, Koukkou E, Braverman LE, He X, Ilias I, et al. Perchlorate and thiocyanate exposure and thyroid function in first-trimester pregnant women from Greece. *Clinical Endocrinology*. 1 sept 2012;77(3):471-4.
40. Schreinemachers DM, Ghio AJ, Sobus JR, Williams MA. Perchlorate Exposure is Associated with Oxidative Stress and Indicators of Serum Iron Homeostasis Among NHANES 2005–2008 Subjects. *Biomark Insights*. 28 janv 2015;10:9-19.
41. Zhang A-S, Enns CA. Molecular mechanisms of normal iron homeostasis. *Hematology*. 1 janv 2009;2009(1):207-14.
42. Moore AM, De Leon CH, Young TM. Rate and extent of aqueous perchlorate removal by iron surfaces. *Environ Sci Technol*. 15 juill 2003;37(14):3189-98.
43. Adamson JW. Regulation of red blood cell production. *Am J Med*. 26 août 1996;101(2A):4S-6S.
44. ATSDR - Toxicological Profile: Perchlorates [Internet]. [cité 24 juin 2018]. Disponible sur: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp.asp?id=895&tid=181>
45. Health Implications of Perchlorate Ingestion (2005) : Division on Earth and Life Studies [Internet]. [cité 4 nov 2018]. Disponible sur: <http://dels.nas.edu/Report/Health-Implications-Perchlorate-Ingestion/11202>
46. Gorecki S, Nesslany F, Hubé D, Mullot J-U, Vasseur P, Marchioni E, et al. Human health risks related to the consumption of foodstuffs of plant and animal origin produced on a site polluted by chemical munitions of the First World War. *Science of The Total Environment*. 1 déc 2017;599-600:314-23.
47. Cartier T, Baert A, Cabillic P-J, Casellas C, Creppy E, Montiel A, et al. Risk assessment of chemicals in drinking water: Perchlorate and bromate. *Environnement Risques Santé*. 2012;(4):316–321.
48. Lamm SH, Braverman LE, Li FX, Richman K, Pino S, Howearth G. Thyroid health status of ammonium perchlorate workers: a cross-sectional occupational health study. *J Occup Environ Med*. avr 1999;41(4):248-60.
49. Braverman LE, He X, Pino S, Cross M, Magnani B, Lamm SH, et al. The effect of perchlorate, thiocyanate, and nitrate on thyroid function in workers exposed to perchlorate long-term. *J Clin Endocrinol Metab*. févr 2005;90(2):700-6.
50. ANSES. Pertinence de la ré-évaluation de la valeur guide pour les ions perchlorate dans l'eau destinée à la consommation humaine. Saisines n° 2016-SA-0155 et 2017-SA-0170. 2018.
51. ANSES. Campagne nationale d'occurrence de polluants émergents dans les eaux destinées à la consommation humaine Perchlorates et Nitrosamines [Internet]. 2013 oct. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/system/files/LABO-Ra-PolluantsEmergents-T01Ra.pdf>
52. Snyder SA, Vanderford BJ, Rosario-Ortiz FL. Chapter 30 - Iodate and Perchlorate in Bottled Water: Methods for Discovery and Impact on Humans. In: Preedy VR, Burrow GN, Watson R, éditeurs. *Comprehensive Handbook of*

- Iodine [Internet]. San Diego: Academic Press; 2009 [cité 11 mai 2019]. p. 287-94. Disponible sur: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123741356000303>
53. Scientific Opinion on the risks to public health related to the presence of perchlorate in food, in particular fruits and vegetables. EFSA Journal. 1 oct 2014;12(10):3869.
 54. european commission. Statement as regards the presence of perchlorate in food endorsed by the Standing Committee on Plants, Animals, Food and Feed on 10 March 2015, updated on 23 June 2015 [Internet]. [cité 19 août 2018]. Disponible sur: https://ec.europa.eu/food/sites/food/files/safety/docs/cs_contaminants_catalogue_perchlorate_statement_food_update_en.pdf
 55. Nutrition C for FS and A. Chemical Contaminants - 2004-2005 Exploratory Survey Data on Perchlorate in Food [Internet]. [cité 21 août 2018]. Disponible sur: <https://www.fda.gov/Food/FoodborneIllnessContaminants/ChemicalContaminants/ucm077685.htm>
 56. El Aribi H, Le Blanc YJC, Antonsen S, Sakuma T. Analysis of perchlorate in foods and beverages by ion chromatography coupled with tandem mass spectrometry (IC-ESI-MS/MS). *Analytica Chimica Acta*. 10 mai 2006;567(1):39-47.
 57. Wang Z, Forsyth D, Lau BP-Y, Pelletier L, Bronson R, Gaertner D. Estimated dietary exposure of Canadians to perchlorate through the consumption of fruits and vegetables available in Ottawa markets. *J Agric Food Chem*. 14 oct 2009;57(19):9250-5.
 58. ANSES. AVIS de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à l'évaluation des risques sanitaires liés à la présence d'ions perchlorate dans les eaux destinées à la consommation humaine. 2011.
 59. Murray CW, Egan SK, Kim H, Beru N, Bolger PM. US Food and Drug Administration's Total Diet Study: Dietary intake of perchlorate and iodine. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*. nov 2008;18(6):571-80.
 60. Contamination de certaines denrées alimentaires par les nitrates, les ions perchlorate et les chlorates [Internet]. Le portail des ministères économiques et financiers. [cité 3 avr 2018]. Disponible sur: <https://www.economie.gouv.fr/dgccrf/contamination-certaines-denrees-alimentaires-par-nitrates-ions-perchlorate-et-chlorates>
 61. Borjan M, Marcella S, Blount B, Greenberg M, Zhang J (Jim), Murphy E, et al. Perchlorate exposure in lactating women in an urban community in New Jersey. *Science of The Total Environment*. 1 janv 2011;409(3):460-4.
 62. ANSES. AVIS de l' ANSES relatif à la présence d'ions perchlorate dans le lait infantile et dans l'eau destinée à la consommation humaine en France, Saisine

n° 2011-SA-0208 et n° 2011-SA-0336 [Internet]. 2014 [cité 26 août 2018].
Disponible sur: <https://www.anses.fr/en/system/files/EAUX2011sa0336.pdf>

63. ANSES. AVIS de l'ANSES relatif à l'évaluation des risques sanitaires liés à la présence d'ions perchlorate dans les eaux destinées à la consommation humaine Anses – Saisine n° 2011-SA-0024 [Internet]. 2011 [cité 24 juin 2018].
Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/system/files/EAUX2011sa0024.pdf>
64. Braverman LE, Pearce EN, He X, Pino S, Seeley M, Beck B, et al. Effects of six months of daily low-dose perchlorate exposure on thyroid function in healthy volunteers. *J Clin Endocrinol Metab.* juill 2006;91(7):2721-4.
65. Anses. Saisine 2012-SA-0119: Avis de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif aux études épidémiologiques portant sur les associations entre une exposition aux ions perchlorate dans l'eau de boisson et la fonction thyroïdienne dans des populations spécifiques. 2012.
66. Lamm SH, Doemland M. Has perchlorate in drinking water increased the rate of congenital hypothyroidism? *J Occup Environ Med.* mai 1999;41(5):409-11.
67. Cao Y, Blount BC, Valentin-Blasini L, Bernbaum JC, Phillips TM, Rogan WJ. Goitrogenic Anions, Thyroid-Stimulating Hormone, and Thyroid Hormone in Infants. *Environ Health Perspect.* sept 2010;118(9):1332-7.
68. Leung AM, Braverman LE, He X, Schuller KE, Roussilhes A, Jahreis KA, et al. Environmental Perchlorate and Thiocyanate Exposures and Infant Serum Thyroid Function. *Thyroid.* sept 2012;22(9):938-43.
69. Charatcharoenwitthaya N, Ongphiphadhanakul B, Pearce EN, Somprasit C, Chanthasenont A, He X, et al. The Association Between Perchlorate and Thiocyanate Exposure and Thyroid Function in First-Trimester Pregnant Thai Women. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism.* juill 2014;99(7):2365-71.
70. Horton MK, Blount BC, Valentin-Blasini L, Wapner R, Whyatt R, Gennings C, et al. CO-occurring exposure to perchlorate, nitrate and thiocyanate alters thyroid function in healthy pregnant women. *Environmental Research.* nov 2015;143:1-9.
71. Brechner RJ, Parkhurst GD, Humble WO, Brown MB, Herman WH. Ammonium perchlorate contamination of Colorado River drinking water is associated with abnormal thyroid function in newborns in Arizona. *J Occup Environ Med.* août 2000;42(8):777-82.
72. Crump C, Michaud P, Téllez R, Reyes C, Gonzalez G, Montgomery EL, et al. Does perchlorate in drinking water affect thyroid function in newborns or school-age children? *J Occup Environ Med.* juin 2000;42(6):603-12.
73. Li FX, Byrd DM, Deyhle GM, Sesser DE, Skeels MR, Katkowsky SR, et al. Neonatal thyroid-stimulating hormone level and perchlorate in drinking water. *Teratology.* déc 2000;62(6):429-31.

74. Li Z, Li FX, Byrd D, Deyhle GM, Sesser DE, Skeels MR, et al. Neonatal thyroxine level and perchlorate in drinking water. *J Occup Environ Med.* févr 2000;42(2):200-5.
75. Kelsh MA, Buffler PA, Daaboul JJ, Rutherford GW, Lau EC, Barnard JC, et al. Primary congenital hypothyroidism, newborn thyroid function, and environmental perchlorate exposure among residents of a Southern California community. *J Occup Environ Med.* oct 2003;45(10):1116-27.
76. Buffler PA, Kelsh MA, Lau EC, Edinboro CH, Barnard JC, Rutherford GW, et al. Thyroid Function and Perchlorate in Drinking Water: An Evaluation among California Newborns, 1998. *Environ Health Perspect.* mai 2006;114(5):798-804.
77. Amitai Y, Winston G, Sack J, Wasser J, Lewis M, Blount BC, et al. Gestational exposure to high perchlorate concentrations in drinking water and neonatal thyroxine levels. *Thyroid.* sept 2007;17(9):843-50.
78. Steinmaus C, Miller MD, Smith AH. Perchlorate in drinking water during pregnancy and neonatal thyroid hormone levels in California. *J Occup Environ Med.* déc 2010;52(12):1217-24.
79. Téllez Téllez R, Michaud Chacón P, Reyes Abarca C, Blount BC, Van Landingham CB, Crump KS, et al. Long-term environmental exposure to perchlorate through drinking water and thyroid function during pregnancy and the neonatal period. *Thyroid.* sept 2005;15(9):963-75.
80. Gibbs JP, Van Landingham C. Urinary perchlorate excretion does not predict thyroid function among pregnant women. *Thyroid.* juill 2008;18(7):807-8.
81. Mortensen ME, Birch R, Wong L-Y, Valentin-Blasini L, Boyle EB, Caldwell KL, et al. Thyroid antagonists and thyroid indicators in U.S. pregnant women in the Vanguard Study of the National Children's Study. *Environmental Research.* août 2016;149:179-88.
82. Knight BA, Shields BM, He X, Pearce EN, Braverman LE, Sturley R, et al. Effect of perchlorate and thiocyanate exposure on thyroid function of pregnant women from South-West England: a cohort study. *Thyroid Res.* 2018;11:9.
83. Stable Isotopes Technique - an overview | ScienceDirect Topics [Internet]. [cité 30 sept 2018]. Disponible sur: <https://www-sciencedirect-com.ressources-electroniques.univ-lille.fr/topics/earth-and-planetary-sciences/stable-isotopes-technique>
84. Bao H, Gu B. Natural Perchlorate Has a Unique Oxygen Isotope Signature. *Environ Sci Technol.* 1 oct 2004;38(19):5073-7.
85. Perchlorate Isotope Forensics - Analytical Chemistry (ACS Publications) [Internet]. [cité 30 sept 2018]. Disponible sur: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ac051360d>
86. Urbansky ET, Brown SK, Magnuson ML, Kelty CA. Perchlorate levels in samples of sodium nitrate fertilizer derived from Chilean caliche. *Environmental Pollution.* mai 2001;112(3):299-302.

87. Duncan PB, Morrison RD, Vavricka E. Forensic Identification of Anthropogenic and Naturally Occurring Sources of Perchlorate. *Environmental Forensics*. 1 juin 2005;6(2):205-15.
88. Simon Blake, Tom Hall, Mark Harman, Rakesh Kanda(1), Clare McLaughlin, Paul Rumsby. Perchlorate - risks to uk drinking water sources.pdf [Internet]. 2009. Disponible sur: http://dwi.defra.gov.uk/research/completed-research/reports/DWI70_2_218.pdf
89. Dasgupta PK, Dyke JV, Kirk AB, Jackson WA. Perchlorate in the United States. Analysis of relative source contributions to the food chain. *Environ Sci Technol*. 1 nov 2006;40(21):6608-14.
90. Cao F, Jaunat J, Sturchio N, Cancès B, Morvan X, Devos A, et al. Worldwide occurrence and origin of perchlorate ion in waters: A review. *Science of The Total Environment*. 15 avr 2019;661:737-49.
91. Plummer LN, Böhlke JK, Doughten MW. Perchlorate in pleistocene and holocene groundwater in north-central New Mexico. *Environ Sci Technol*. 15 mars 2006;40(6):1757-63.
92. Trumpolt CW, Crain M, Cullison GD, Flanagan SJP, Siegel L, Lathrop S. Perchlorate: Sources, uses, and occurrences in the environment. *Remediation Journal*. 1 déc 2005;16(1):65-89.
93. Kang N, Jackson WA, Dasgupta PK, Anderson TA. Perchlorate production by ozone oxidation of chloride in aqueous and dry systems. *Science of The Total Environment*. 1 nov 2008;405(1):301-9.
94. Zewdie T, Smith CM, Hutcheson M, West CR. Basis of the Massachusetts Reference Dose and Drinking Water Standard for Perchlorate. *Environ Health Perspect*. janv 2010;118(1):42-8.
95. Robic S, Midi-Pyrénées D. Commission Mixte du 30 janvier 2015 PERCHLORATE EN GARONNE. :6.
96. Perchlorate Environmental Contamination: Toxicological Review and Risk Characterization. :534.
97. Épaves et Pollution - Les Larmes Noires de l'Océan (2017) Documentaire Arte [Internet]. [cité 11 juin 2019]. Disponible sur: <https://www.dailymotion.com/video/x616ql6>
98. Ospar commission. OSPAR commission, overview of past dumping at sea of chemical munitions and weapons in the OSPAR maritime area.pdf [Internet]. 2010 [cité 12 juin 2019]. Disponible sur: https://www.ospar.org/ospar-data/p00519_2010%20revised%20dumping%20at%20sea%20of%20munitions%20and%20weapons.pdf
99. Missiaen T, Henriot J-P. Chemical munition dump sites in coastal environments : a border-transgressing problem. :13.

100. B. Lopez, J.F. Vernoux, A. Neveux, F. Barrez, A. Brugeron. Recherche des origines de la pollution en perchlorate impactant des captages d'eau potable au sein des AAC de la région de Nemours et Bourron-Marlotte (77) et (45) rapport final. BRGM/RP-64840-FR. 2015 nov.
101. Wilkin RT, Fine DD, Burnett NG. Perchlorate behavior in a municipal lake following fireworks displays. *Environ Sci Technol.* 1 juin 2007;41(11):3966-71.
102. Le grand cycle de l'eau (cycle naturel) | Agence de l'Eau Artois-Picardie [Internet]. [cité 31 juill 2018]. Disponible sur: <http://www.eau-artois-picardie.fr/education-leau-dossiers-thematiques/le-grand-cycle-de-leau>
103. Dean KE, Palachek RM, Noel JM, Warbritton R, Aufderheide J, Wireman J. Development of freshwater water-quality criteria for perchlorate. *Environmental Toxicology and Chemistry.* 2004;23(6):1441-51.
104. Crane HM, Pickford DB, Hutchinson TH, Brown JA. Effects of Ammonium Perchlorate on Thyroid Function in Developing Fathead Minnows, *Pimephales promelas*. *Environ Health Perspect.* avr 2005;113(4):396-401.
105. Kosaka K, Asami M, Matsuoka Y, Kamoshita M, Kunikane S. Occurrence of perchlorate in drinking water sources of metropolitan area in Japan. *Water Research.* 1 août 2007;41(15):3474-82.
106. Nadaraja AV, Puthiyaveetil PG, Bhaskaran K. Surveillance of perchlorate in ground water, surface water and bottled water in Kerala, India. *J Environ Health Sci Eng* [Internet]. 28 juill 2015 [cité 14 juin 2019];13. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4517559/>
107. Lopez B, Brugeron A, Devau N, Ollivier P. Vulnérabilité des eaux souterraines de France métropolitaine vis-à-vis des ions perchlorates. :108.
108. Parker DR, Seyfferth AL, Reese BK. Perchlorate in Groundwater: A Synoptic Survey of "Pristine" Sites in the Coterminous United States. *Environ Sci Technol.* 1 mars 2008;42(5):1465-71.
109. Brandhuber P. Perchlorate occurrence mapping.pdf. American Water Works Association; 2005.
110. Quiñones O, Oh J-E, Vanderford B, Kim JH, Cho J, Snyder SA. Perchlorate assessment of the Nakdong and Yeongsan watersheds, Republic of Korea. *Environmental Toxicology and Chemistry.* 2007;26(7):1349-54.
111. Kannan K, Praamsma ML, Oldi JF, Kunisue T, Sinha RK. Occurrence of perchlorate in drinking water, groundwater, surface water and human saliva from India. *Chemosphere.* 1 juin 2009;76(1):22-6.
112. Alternative Causes of Widespread, Low Concentration Perchlorate Impacts to Groundwater. :54.
113. Le petit cycle de l'eau (cycle domestique) | Agence de l'Eau Artois-Picardie [Internet]. [cité 31 juill 2018]. Disponible sur:

<http://www.eau-artois-picardie.fr/education-leau-dossiers-thematiques/le-petit-cycle-de-leau>

114. Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie. Les traitements de l'eau potable.pdf [Internet]. 2012 [cité 9 août 2019]. Disponible sur: http://www.lesagencesdeleau.fr/wp-content/uploads/2012/07/9-Fiche-eau-potable_web.pdf
115. Srinivasan R, Sorial GA. Treatment of perchlorate in drinking water: A critical review. *Separation and Purification Technology*. sept 2009;69(1):7-21.
116. Interconnexion des réseaux d'alimentation en eau potable | Economie [Internet]. [cité 9 août 2019]. Disponible sur: <http://www.economie.eaufrance.fr/content/interconnexion-des-r%C3%A9seaux-d'alimentation-en-eau-potable>
117. Heyman C, Raoul C, Binet G, Chaud P. EFFET DES IONS PERCHLORATES SUR LA SANTÉ ET L'EAU D'ALIMENTATION PUBLIQUE. :8.
118. La station d'épuration | Agence de l'Eau Artois-Picardie [Internet]. [cité 9 août 2019]. Disponible sur: <http://www.eau-artois-picardie.fr/education-leau-dossiers-thematiques/les-stations-depuration>
119. Quelle exigence de qualité pour l'eau du robinet ? [Internet]. Centre d'Information sur l'eau. [cité 26 oct 2019]. Disponible sur: <https://www.cieau.com/leau-et-votre-sante/qualite-de-leau/exigence-de-qualite/>
120. Directive 98/83/CE du 3 novembre 1998, relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine [Internet]. [cité 20 mars 2018]. Disponible sur: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=LEGISSUM:l28079>
121. Arrêté du 21 janvier 2010 modifiant l'arrêté du 11 janvier 2007 relatif au programme de prélèvements et d'analyses du contrôle sanitaire pour les eaux fournies par un réseau de distribution, pris en application des articles R. 1321-10, R. 1321-15 et R. 1321-16 du code de la santé publique.
122. Arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du code de la santé publique | Legifrance [Internet]. [cité 11 nov 2019]. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=LEGITEXT000031642768&dateTexte=20190223>
123. ARS Pays de Loire. La qualité de l'eau destinée à la consommation humaine. 2015.
124. Unité de distribution d'eau potable | OIEau - Eaudoc [Internet]. [cité 28 oct 2019]. Disponible sur: <https://www.oieau.fr/eaudoc/page/Unit%C3%A9-de-distribution-deau-potable>
125. Arrêté du 11/01/07 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du code de la santé publique | AIDA

[Internet]. [cité 16 juill 2019]. Disponible sur:
https://aida.ineris.fr/consultation_document/4837

126. Flandrois M, Paon J-C, Letouze N, Villedieu F, Jokic M. La méthémoglobinémie: une maladie à ne pas oublier. *Archives de Pédiatrie*. 1 oct 2013;20(10):1160-1.
127. Tournoud C, Puskarczyk E, Bretaudeau-Deguigne M, Labadie M, Nisse P, Patat A-M, et al. Méthémoglobinémies d'origine toxique chez l'enfant. *Toxicologie Analytique et Clinique*. mai 2019;31(2):S25-6.
128. Gamet-Payrastre L. Effets physiopathologiques des mélanges de pesticides. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*. 1 avr 2011;46(2):82-5.
129. Juricek L, Coumoul X. Alimentation, pesticides et pathologies neurologiques. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*. avr 2014;49(2):74-80.
130. Garnier R. Toxicité du plomb et de ses dérivés. *EMC - Toxicologie-Pathologie*. 1 juin 2005;2(2):67-88.
131. Garnier R, Langrand J, Nikolova N, Médernach C, Bassi C, Villa A. Interprétation de la plombémie de l'enfant : ajuster sur la concentration d'hémoglobine en cas d'anémie. *Toxicologie Analytique et Clinique*. 1 févr 2018;30(1):43-9.
132. Etchevers A, Glorennec P, Lucas J-P, Le Bot B, Lecoffre C, Le Tertre A. Exposition au plomb des enfants en France : niveaux d'imprégnation et déterminants. *Toxicologie Analytique et Clinique*. déc 2017;29(4):483-95.
133. Diomande D, Castaings-Carlio C, Folquet Amorissani M, Zo'O M, Gilles I, Checoury A. Le saturnisme infantile : il faut encore y penser. *Journal de Pédiatrie et de Puériculture*. 1 juill 2009;22(4):167-70.
134. Secretan B, Straif K. Les sujets de préoccupation actuels du CIRC en matière de cancérogènes professionnels. *Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement*. mai 2006;67(2):303-4.
135. Agence de l'eau Artois-Picardie. État d'avancement des périmètres de protection des captages d'eau potable,. 2016.
136. Anses, Afssa. Évaluation des risques sanitaires liés aux situations de dépassement des limites et références de qualité des eaux destinées à la consommation humaine [Internet]. 2004 [cité 29 oct 2019]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/system/files/EAUX-Ra-LimitesRef.pdf>
137. Légifrance. Code de la santé publique - Article R1321-36 relatif à la délivrance de dérogation aux limites de qualité fixées. *Code de la santé publique* mars 31, 2010.
138. MINISTERE DE LA SANTÉ, DE LA FAMILLE, ET DES PERSONNES HANDICAPÉES. CIRCULAIRE DGS/SD7A n° 90 du 1er mars 2004 concernant l'application de l'arrêté du 25 novembre 2003 relatif aux modalités de demande de dérogation pris en application des articles R. 1321-31 à R. 1321-36 du code de la santé publique. 2004.

139. LA CARTE DES DEROGATIONS AUX NORMES DE QUALITE DE L'EAU POTABLE EN FRANCE [Internet]. France Libertés - Fondation Danielle Mitterrand. 2013 [cité 29 oct 2019]. Disponible sur: <https://www.france-libertes.org/fr/la-carte-des-derogations-aux-normes-de-qualite-de-leau-potable-en-france/>
140. Jacquemot S. Regard archéologique sur les villages martyrs de la Grande Guerre en Lorraine. Archéopages Archéologie et société. 1 juill 2014;(40):140-7.
141. Perchlorates : éléments historiques et d'expertise pour une évaluation de l'impact environnemental [Internet]. Mission Centenaire 14-18. [cité 23 août 2019]. Disponible sur: <http://centenaire.org/fr/espace-scientifique/societe/perchlorates-elements-historiques-et-dexpertise-pour-une-evaluation-de>
142. BRGM. Potentialité d'un marquage des eaux souterraines par des substances pyrotechniques en relation avec les zone de combats de la première guerre mondiale, cas des perchlorates.pdf. 2013.
143. OMS. DIRECTIVES DE QUALITÉ POUR L'EAU DE BOISSON 4ème édition [Internet]. 2017 [cité 3 sept 2019]. Disponible sur: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/258887/9789242549959-fre.pdf;jsessionid=10C394F9AB2F7A5298A38F8C411F7AC3?sequence=1>
144. Anses. Etude INCA 3: Données de consommations et habitudes alimentaires de l'étude INCA 3. 2017.
145. BAuA Federal Institute for Occupational Safety and Health. SUBSTANCE EVALUATION CONCLUSION as required by REACH Article 48 and EVALUATION REPORT for sodium perchlorate EC No 231-511-9 CAS No 7601-89-0 [Internet]. 2016 [cité 6 sept 2019]. Disponible sur: <https://echa.europa.eu/documents/10162/b1e3eb0f-020c-40c6-9ad0-ba38b0b054dc>
146. Règlement (CE) n o 1907/2006 du Parlement européen et du Conseil du 18 décembre 2006 concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH), instituant une agence européenne des produits chimiques, modifiant la directive 1999/45/CE et abrogeant le règlement (CEE) n o 793/93 du Conseil et le règlement (CE) n o 1488/94 de la Commission ainsi que la directive 76/769/CEE du Conseil et les directives 91/155/CEE, 93/67/CEE, 93/105/CE et 2000/21/CE de la Commission (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE) [Internet]. 2014 [cité 6 sept 2019]. Disponible sur: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A02006R1907-20140410>
147. Occitanie D. Plan National Santé Environnement 1 (PNSE 1) 2004-2008 [Internet]. 2014 [cité 30 oct 2019]. Disponible sur: <http://www.occitanie.developpement-durable.gouv.fr/plan-national-sante-environnement-1-pnse-1-2004-a4902.html>
148. Ministère de la transition écologique et solidaire, Ministère des solidarités et de la santé. PNSE 3, plan national 2015-2019, rapport de suivi 2016. 2017.

149. Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, Ministère des affaires sociales, de la santé et du droit des femmes. PNSE 3, plan national 2015-2019. 2014.
150. Le Plan national Santé Environnement et les plans régionaux santé environnement [Internet]. Ministère de la Transition écologique et solidaire. [cité 30 oct 2019]. Disponible sur: <http://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/plan-national-sante-environnement-et-plans-regionaux-sante-environnement>
151. Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer, Ministère des affaires sociales et de la santé, Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt. Plan micropolluants 2016-2021 pour préserver la qualité des eaux et la biodiversité.pdf [Internet]. [cité 6 sept 2019]. Disponible sur: <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Plan%20micropolluants%202016-2021%20pour%20pr%C3%A9server%20la%20qualit%C3%A9%20des%20eaux%20et%20la%20biodiversit%C3%A9.pdf>
152. Perchlorates dans l'eau : pourquoi rien ne bouge. La Voix du Nord [Internet]. 28 janv 2016 [cité 16 sept 2019]; Disponible sur: <https://www.lavoixdunord.fr/archive/recup/region/perchlorates-dans-l-eau-pourquoi-rien-ne-bouge-ia0b0n3297562>
153. Notre eau toujours polluée aux ions perchlorates. La Voix du Nord [Internet]. 14 mars 2018 [cité 16 sept 2019]; Disponible sur: <https://www.lavoixdunord.fr/334526/article/2018-03-13/notre-eau-du-robinet-est-toujours-polluee-aux-ions-perchlorates>
154. Question n°20010 - Assemblée nationale [Internet]. [cité 30 août 2019]. Disponible sur: <http://questions.assemblee-nationale.fr/q15/15-20010QE.htm>
155. Question n°12003 - Assemblée nationale [Internet]. [cité 16 sept 2019]. Disponible sur: <http://questions.assemblee-nationale.fr/q15/15-12003QE.htm>
156. Question n°3014 - Assemblée nationale [Internet]. [cité 16 sept 2019]. Disponible sur: <http://questions.assemblee-nationale.fr/q15/15-3014QE.htm>
157. Métropole lilloise : pourquoi l'eau du robinet sera-t-elle déconseillée aux nourrissons de moins de six mois ? LA VDN [Internet]. 13 sept 2019 [cité 16 sept 2019]; Disponible sur: <https://www.lavoixdunord.fr/637145/article/2019-09-13/pourquoi-l-eau-du-robinet-est-elle-deconseillee-pour-les-biberons-des>
158. Eau - Restriction de la consommation d'eau du robinet pour les nourrissons de moins de 6 mois - Les services de l'État dans le Nord [Internet]. [cité 17 sept 2019]. Disponible sur: <http://www.nord.gouv.fr/Actualites/Actualites/Eau-Restiction-de-la-consommation-d-eau-du-robinet-pour-les-nourrissons-de-moins-de-6-mois>
159. Métropole lilloise - Pourquoi la ressource en eau de la métropole lilloise est mal en point (1/2) [Internet]. La Voix du Nord. 2019 [cité 17 sept 2019]. Disponible sur: <https://www.lavoixdunord.fr/577017/article/2019-05-03/pourquoi-la-ressource-en-eau-de-la-metropole-lilloise-est-mal-en-point-12>

160. Restriction de la consommation d'eau du robinet pour les nourrissons de moins de 6 mois [Internet]. [cité 28 oct 2019]. Disponible sur: <https://www.lillemetropole.fr/communique-de-presse/restriction-de-la-consommation-deau-du-robinet-pour-les-nourrissons-de-moins>
161. Légifrance. Code de la santé publique - Article R1321-50 relatif aux produits et procédés mis sur le marché et destinés au traitement de l'eau destinée à la consommation humaine. Code de la santé publique.
162. FNCCR. Guide d'exploitation des unités de production et de distribution d'eau potable. Partie 2 [Internet]. 2017 [cité 21 sept 2019]. Disponible sur: https://www.pseau.org/outils/ouvrages/fnccr_guide_d_exploitation_des_unites_d_e_production_et_de_distribution_d_eau_potable_partie_2_guide_de_potabilisation_des_eaux_2017.pdf
163. Xie Y, Ren L, Zhu X, Gou X, Chen S. Physical and chemical treatments for removal of perchlorate from water—A review. *Process Safety and Environmental Protection*. mai 2018;116:180-98.
164. Kołodyńska D, Hałas P, Michalski R. Development of ion exchangers for the removal of health-hazardous perchlorate ions from aqueous systems. *Applied Geochemistry*. févr 2019;101:75-87.
165. Song W, Gao B, Guo Y, Xu X, Yue Q, Ren Z. Effective adsorption/desorption of perchlorate from water using corn stalk based modified magnetic biopolymer ion exchange resin. *Microporous and Mesoporous Materials*. nov 2017;252:59-68.
166. Anses. Saisine n° 2015-SA-0217: Avis de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à l'utilisation de la résine échangeuse d'anions « Amberlite™ PWA5 » sous forme chlorure (Cl-) pour le traitement des perchlorates dans l'eau destinée à la consommation humaine. 2016 févr.
167. Darracq G, Baron J, Joyeux M. Kinetic and isotherm studies on perchlorate sorption by ion-exchange resins in drinking water treatment. *Journal of Water Process Engineering*. 1 sept 2014;3:123-31.
168. Roach JD, Tush D. Equilibrium dialysis and ultrafiltration investigations of perchlorate removal from aqueous solution using poly(diallyldimethylammonium) chloride. *Water Research*. 1 févr 2008;42(4):1204-10.
169. Srinivasan A, Viraraghavan T. Perchlorate: Health Effects and Technologies for Its Removal from Water Resources. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. avr 2009;6(4):1418-42.
170. Anses. Saisine n° 2012-SA-0201: Avis de l'Anses relatif à une demande d'approbation du procédé « NanEau Force » mettant en œuvre les modules de filtration membranaire « Filmtec NF90B 400 » pour le traitement des eaux destinées à la consommation humaine vis-à-vis des paramètres chlorures, nickel, sélénium et perchlorates. 2013 févr.
171. Xu J, Gao N, Zhao D, Liu Z, Tang M, Chen Y, et al. Different iron salt impregnated granular activated carbon (Fe-GAC) for perchlorate removal:

- Characterization, performance and mechanism. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. nov 2016;509:99-108.
172. Hou P, Yan Z, Cannon FS, Yue Y, Byrne T, Nieto-Delgado C. Enhancement of perchlorate removal from groundwater by cationic granular activated carbon: Effect of preparation protocol and surface properties. *Chemosphere*. juin 2018;201:756-63.
173. Krishnan G. R, Radhika R, Jayalatha T, Jacob S, Rajeev R, K. George B, et al. Removal of perchlorate from drinking water using granular activated carbon modified by acidic functional group: Adsorption kinetics and equilibrium studies. *Process Safety and Environmental Protection*. juill 2017;109:158-71.
174. R. R, T. J, G. RK, Jacob S, R. R, George BK. Adsorption performance of packed bed column for the removal of perchlorate using modified activated carbon. *Process Safety and Environmental Protection*. juill 2018;117:350-62.
175. Hsu Y-S, Lou J-C, Chou M-S, Hsu K-L, Han J-Y. Characterization of Single-Walled Carbon Nanotubes and Adsorption of Perchlorate in Water. *Water Air Soil Pollut*. 24 févr 2015;226(3):58.
176. Luo W, Fukumori T, Guo B, Osseo-Asare K, Hirajima T, Sasaki K. Effects of grinding montmorillonite and illite on their modification by dioctadecyl dimethyl ammonium chloride and adsorption of perchlorate. *Applied Clay Science*. sept 2017;146:325-33.
177. Wang DM, Lin HY, Shah SI, Ni CY, Huang CP. Indirect electrochemical reduction of perchlorate and nitrate in dilute aqueous solutions at the Ti–water interface. *Separation and Purification Technology*. 2 juin 2009;67(2):127-34.
178. Lee C, Batchelor B, Park SH, Han DS, Abdel-Wahab A, Kramer TA. Perchlorate reduction during electrochemically induced pitting corrosion of zero-valent titanium (ZVT). *Journal of Hazardous Materials*. 15 déc 2011;197:183-9.
179. Chung J, Shin S, Oh J. Characterization of a microbial community capable of reducing perchlorate and nitrate in high salinity. *Biotechnol Lett*. 1 juill 2009;31(7):959-66.
180. Bender KS, Shang C, Chakraborty R, Belchik SM, Coates JD, Achenbach LA. Identification, Characterization, and Classification of Genes Encoding Perchlorate Reductase. *Journal of Bacteriology*. 1 août 2005;187(15):5090-6.
181. Shi D, Zhang X, Wang J, Fan J. Highly reactive and stable nanoscale zero-valent iron prepared within vesicles and its high-performance removal of water pollutants. *Applied Catalysis B: Environmental*. 1 févr 2018;221:610-7.
182. Cao J, Elliott D, Zhang W. Perchlorate Reduction by Nanoscale Iron Particles. *J Nanopart Res*. 1 oct 2005;7(4):499-506.
183. Xie Y, Yi Y, Qin Y, Wang L, Liu G, Wu Y, et al. Perchlorate degradation in aqueous solution using chitosan-stabilized zero-valent iron nanoparticles. *Separation and Purification Technology*. oct 2016;171:164-73.

184. Xu J, Gao N, Tang Y, Deng Y, Sui M. Perchlorate removal using granular activated carbon supported iron compounds: Synthesis, characterization and reactivity. *Journal of Environmental Sciences*. 1 nov 2010;22(11):1807-13.
185. Xiong Z, Zhao D, Pan G. Rapid and complete destruction of perchlorate in water and ion-exchange brine using stabilized zero-valent iron nanoparticles. *Water Research*. 1 août 2007;41(15):3497-505.
186. Li T, Ren Y, Zhai S, Zhang W, Zhang W, Hua M, et al. Integrating cationic metal-organic frameworks with ultrafiltration membrane for selective removal of perchlorate from Water. *Journal of Hazardous Materials*. janv 2020;381:120961.
187. Beaumais O, Veyronnet P. Hétérogénéité des préférences individuelles, perception de la qualité et choix d'alimentation en eau potable en France: Un Logit multinomial à facteurs d'échelle. *Revue économique*. 2017;68(6):1077.
188. Ordre National des Pharmaciens. DÉMOGRAPHIE DES PHARMACIENS PANORAMA AU 1ER JANVIER 2018 [Internet]. 2018 [cité 7 nov 2019]. Disponible sur: <http://www.ordre.pharmacien.fr/content/download/399974/1888607/version/1/file/brochure-la-demographie-+2018.pdf>
189. ACADEMIE NATIONALE DE PHARMACIE : Rapport Médicaments et Environnement. Mars 2019
190. Thomas E. Prendre en charge les femmes enceintes végétariennes ou végétaliennes. [//www.em-premium.com/data/revues/16340760/v16i128/S1634076017300951/](http://www.em-premium.com/data/revues/16340760/v16i128/S1634076017300951/) [Internet]. 10 sept 2017 [cité 30 août 2019]; Disponible sur: <http://www.em-premium.com/article/1140198/resultatrecherche/2>



DEMANDE D'AUTORISATION DE SOUTENANCE

Nom et Prénom de l'étudiant : Delmotte Victor INE : 0903005295V

Date, heure et lieu de soutenance :

Le 05 11 2019 à 18h15 Amphithéâtre ou salle : CURIE
jour mois année

Engagement de l'étudiant - Charte de non-plagiat

J'atteste sur l'honneur que tout contenu qui n'est pas explicitement présenté comme une citation est un contenu personnel et original.

Signature de l'étudiant :



Avis du directeur de thèse

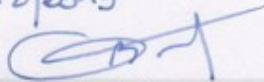
Nom : GRAVE Prénom : Béatrice

- Favorable
 Défavorable

Motif de l'avis défavorable :

Date : 7/12/2019

Signature:



Avis du président du jury

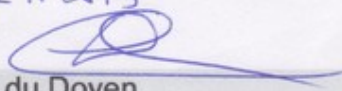
Nom : CHEVACIER Prénom : DANY

- Favorable
 Défavorable

Motif de l'avis défavorable :

Date : 12/11/2019

Signature:



Décision du Doyen

- Favorable
 Défavorable

Le 15/11/19
Le Doyen

B. DÉCAUDIN


Université de Lille
FACULTE DE PHARMACIE DE LILLE
DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN PHARMACIE
Année Universitaire 2019/2020

Nom : DELMOTTE
Prénom : Victor

Titre de la thèse : Les ions perchlorate dans les eaux : Impact sanitaire et environnemental

Mots-clés : Ions perchlorate, Rôle du pharmacien, Impact sanitaire et environnemental, Eaux destinées à la consommation humaine (EDCH), Prévention, Santé publique

Résumé :

Ils ont des origines différentes selon les régions : les munitions utilisées durant la première guerre mondiale, l'utilisation du salpêtre chilien dans l'agriculture jusque 1950, ou encore l'industrie. Néanmoins, les ions perchlorate sont aujourd'hui largement répandus dans les eaux souterraines et superficielles de France. Leurs effets délétères n'ont pas été confirmés, cependant, de nombreuses études constatent des effets thyroïdiens chez les femmes enceintes et les nourrissons.

Des recommandations sont établies sur le territoire, mais les difficultés réglementaires et la complexité des procédés techniques retardent la mise en place de moyens d'éliminations concrets.

Ce travail aborde la problématique des ions perchlorate dans son ensemble, et introduit le rôle qu'y joue, ou doit y jouer, le pharmacien d'officine.

Membres du jury :

Président :

M. CHEVALIER Dany, Maître de conférences des Universités, Laboratoire de Toxicologie, Université Lille

Directeur, conseiller de thèse :

Mme GRAVE Béatrice, Maître de Conférences des Universités, Laboratoire de Toxicologie, Santé Publique et Environnement, Université Lille

Assesseurs :

Mme HUS Céline, Docteur en Pharmacie, Pharmacien titulaire, Le Quesnoy

Mme LANCEL Mathilde, Docteur en Pharmacie, Pharmacien hospitalier, hôpital privé Arras Les Bonnettes