

***Synthèse des  
connaissances sur  
l'origine et la  
disponibilité du cadmium  
dans les eaux  
continentales***

**- Synthèse documentaire -**

***DAMY Pierre-Clément***

***Septembre 2011***

En partenariat avec des organismes d'enseignement supérieur, l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (Onema) et les Agences de l'eau disposent d'états de l'art synthétiques sur différents sujets liés à l'eau.

Rédigées par des élèves de l'enseignement supérieur dans le cadre de leur cursus de formation, ces synthèses sont mises en place et suivies par l'Office International de l'Eau (OIEau).

La synthèse documentaire « **Synthèse des connaissances sur l'origine et la disponibilité du cadmium dans les eaux continentales** » a été effectuée par Pierre-Clément DAMY, élève post-master (bac+6/7) d'AgroParisTech-ENGREF en voie d'approfondissement et mastère spécialisé « Gestion de l'eau ».

Le contenu de ce document reste sous la responsabilité de son auteur.

Courriel : [pierre.damy@engref.agroparistech.fr](mailto:pierre.damy@engref.agroparistech.fr)

*Toute utilisation, diffusion, citation ou reproduction, en totalité ou en partie, de ce document doit se faire avec la mention expresse de l'auteur et de la mention des principaux partenaires à savoir l'établissement d'origine, l'Onema/Agences de l'eau et l'OIEau.  
Ce document est libre d'utilisation pour ces partenaires.*

**SYNTHESE DES CONNAISSANCES SUR L'ORIGINE  
ET LA DISPONIBILITE DU CADMIUM DANS LES EAUX CONTINENTALES**

**PIERRE CLEMENT DAMY**

<b>INTRODUCTION</b>	<b>5</b>
<b>ORIGINE DU CADMIUM DANS L'ENVIRONNEMENT</b>	<b>6</b>
DÉFINITION ET CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DU CADMIUM	6
POLLUTIONS DIFFUSES ET POLLUTIONS PONCTUELLES	6
ORIGINE NATURELLE	7
ORIGINE ANTHROPIQUE	7
<i>Activités industrielles</i>	7
<i>Ruissellement urbain</i>	8
<i>Activités agricoles</i>	8
<b>DEVENIR DU CADMIUM DANS L'ENVIRONNEMENT</b>	<b>10</b>
COMPORTEMENT DU CADMIUM DANS L'AIR	10
COMPORTEMENT DU CADMIUM DANS LE SOL	10
<i>Le pH</i>	10
<i>Les types de sol</i>	11
<i>Les micro-organismes</i>	11
COMPORTEMENT DU CADMIUM DANS L'EAU	11
<b>ETAT DES CONNAISSANCES ET DES RÉGLEMENTATIONS SUR LES ACTIVITÉS ANTHROPIQUES POUVANT ENGENDRER UN APPORT EN CADMIUM</b>	<b>13</b>
CONNAISSANCES SUR LES APPORTS DE CADMIUM VERS L'ENVIRONNEMENT EN EUROPE	13
<i>Apport vers l'atmosphère</i>	14
<i>Apport vers le sol</i>	14
<i>Apport vers l'eau</i>	14
APPORT DES ACTIVITÉS INDUSTRIELLES	14
<i>Etat des connaissances</i>	14
<i>Réglementation</i>	15
APPORT DU RUISSellement URBAIN	16
APPORT DES ACTIVITÉS AGRICOLES	16
<i>Etat des connaissances</i>	16
<i>Réglementation</i>	18
EXEMPLES DE CONTAMINATIONS	18
<i>Contamination du Lot (origine industrielle)</i>	18
<i>Pollution du Rhin (activités agricoles, ruissellement urbain et décharges)</i>	19
<i>Pollution de la Seine (ruissellement urbain et activités agricoles)</i>	19
LE CADMIUM DANS LE FUTUR	19

<b>PROBLÉMATIQUE DU BASSIN VERSANT DE LA CHARENTE</b>	<b>20</b>
CONTEXTE	20
LE BASSIN VERSANT DE LA CHARENTE	20
LES CARACTÉRISTIQUES GÉOLOGIQUES ET PEDOLOGIQUES DU BASSIN VERSANT DE LA CHARENTE	21
LES EAUX DE RUISSELLEMENT	21
LES ACTIVITÉS AGRICOLES	21
L'ACTIVITÉ INDUSTRIELLE	22
<b>CONCLUSION</b>	<b>23</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>24</b>
<b>ANNEXES</b>	<b>27</b>

## INDEX DES TABLEAUX

Tableau 1: Teneurs moyennes ( $\mu\text{g.g}^{-1}$ ) en Cadmium des différentes roches de la croûte terrestre (N'Guessan, 2008)	7
Tableau 2: Flux de cadmium (kg/an) des différents secteurs industriels français vers les milieux aquatiques (Brignon et Malherbe, 2005)	15
Tableau 3: Valeurs limites françaises de rejets industriels pour le cadmium (Brignon et Malherbe, 2005)	16
Tableau 4: Gamme des teneurs en éléments traces (mg/kg) dans les sols pour une tonne métrique de différents fertilisants et les gammes naturelles dans les sols. (N'Guessan, 2008)	18
Tableau 5: Données toxicologiques et normes pour le cadmium. (Levet, 2008)	27
Tableau 6: Emissions des principales sources de cadmium en Europe, en 2000, vers l'atmosphère, le sol et l'eau (Zielonka et al., 2009)	28
Tableau 7: Les concentrations en Cadmium (ng/l) dans les phases dissoutes (Gonzalez et al., 2009)	29
Tableau 8: Les concentrations en Cadmium ( $\mu\text{g/l}$ ) dans les phases particulaires (Gonzalez et al., 2009)	29
Tableau 9: Tableau des principales activités pouvant baisser leurs émissions de cadmium dans l'environnement (Zielonka et al., 2009)	31
Tableau 10: Possibilités des principales activités émettant du cadmium dans l'environnement à baisser leurs émissions. (Zielonka et al., 2009)	32
Tableau 11: Suite du tableau 10 sur les possibilités des principales activités émettant du cadmium dans l'environnement à baisser leurs émissions. (Zielonka et al., 2009)	33

## INDEX DES FIGURES

Figure 1: Utilisation du cadmium dans l'industrie mondiale en 2003 (International Cadmium Association's website, 2009)	8
Figure 2: Schéma du cycle biogéochimique du cadmium et des principaux processus d'échange dissous-particulaire. (Gonzalez et al., 2009)	12
Figure 3: Apports de cadmium dans l'environnement en Europe durant l'année 2000 (tonnes/an) (Zielonka et al., 2009)	13
Figure 4: Evolution des teneurs en cadmium (tonnes/année) dans l'atmosphère en fonction des différentes sources en Europe entre 1955 et 2005 (Pacyna et al., 2009)	15
Figure 5: Part des différentes sources de contamination dans l'estimation des quantités totales d'ETM entrant sur les sols agricoles (SOGREAH, 2007)	17
Figure 6: Répartition des flux de cadmium entre la Gironde et et la baie de Marennes Oléron (Agence de l'eau Adour-Garonne, 2010)	20
Figure 7: Estimation des quantités de Cadmium entrant sur les sols agricoles de France Métropolitaine par an et en fonction des différentes sources de contamination (SOGREAH, 2007)	30
Figure 8: Présentation du bassin versant de la Charente (EPTB, 2003)	34
Figure 9: Carte géologique du bassin versant de la Charente (géologie sur la partie en Poitou-Charentes uniquement) (Bichot et al., 2008)	35
Figure 10: Cartographie des départements concernés par l'étude de l'ADEME sur les anomalies des teneurs en cadmium dans les sols de France (Baize et al., 2005)	36
Figure 11: Valeurs du pH du sol dans le secteur du bassin versant de la Charente (Groupement d'intérêt scientifique Sol, 2010)	37

# INTRODUCTION

Le cadmium est un élément métallique présent de façon naturelle dans la croûte terrestre. Il est considéré avec trois autres métaux toxiques (l'arsenic, le plomb et le mercure) comme étant très préoccupant face à la santé environnementale.

De par ses caractéristiques physiques intéressantes, il est utilisé pour de nombreux usages industriels. La fabrication, l'utilisation ou l'élimination des produits contenant cet élément engendre par conséquent **une pollution de l'environnement**. Certaines activités agricoles sont également des apports diffus indirects de contamination du sol par le cadmium.

Toutefois, depuis plusieurs années, son usage a été restreint ou interdit dans de nombreuses applications entraînant ainsi une diminution des contaminations ponctuelles ou diffuses du sol, de l'air ou de l'eau.

**Le bassin versant de la Charente** fait preuve d'exception car des teneurs à la hausse en cadmium ont été observées dans l'estuaire du fleuve. L'agence de l'eau Adour-Garonne s'y est donc intéressée afin de répondre aux exigences de la directive cadre européenne 2000/60/CE qui a pour objectif de maintenir et d'améliorer la qualité des eaux d'ici 2015.

Cette synthèse technique aura donc pour but de compiler **les connaissances sur l'origine et la disponibilité du cadmium dans les eaux continentales**. Cet état des lieux sera ensuite appliqué au cas du bassin versant de la Charente afin d'essayer de mieux comprendre le phénomène.

# ORIGINE DU CADMIUM DANS L'ENVIRONNEMENT

## DEFINITION ET CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DU CADMIUM

Dans l'environnement le cadmium est très rare et n'existe pas à l'état natif. Dans la croûte terrestre, on le retrouve principalement dans les minerais de zinc. Il est également présent dans les minerais de plomb et de cuivre, ainsi que dans les phosphates naturels. Les principaux composés du cadmium sont l'oxyde de cadmium, le chlorure de cadmium et le sulfure de cadmium (Brignon et Malherbe, 2005).

L'absorption du cadmium par l'homme se fait essentiellement par la nourriture. Cet élément est bioaccumulable dans l'organisme et est un des rares éléments chimiques à être dénué d'utilité biologique. Il présente également une **très forte toxicité** sous ses formes sulfures et oxyde de cadmium (Levet, 2008). Cet élément se concentre principalement dans le foie, le cortex des reins, le pancréas et la thyroïde avec un temps de demi vie de vingt ans environ (Zielonka et al., 2009).

Dans les écosystèmes aquatiques, le cadmium peut être accumulé en quantité très importante par certains mollusque bivalves (moules, huîtres) qui doivent filtrer l'eau pour collecter leur nourriture (International Cadmium Association's website, 2009).

En 1967, selon la Commission européenne, le cadmium est une « substance classée comme dangereuse par la directive 67/548/CEE<sup>1</sup> ou par ses modifications ultérieures ». Ce texte classe le cadmium comme un **métal lourd**, tout comme le chrome, l'antimoine, l'arsenic, le cuivre, le plomb, le mercure, le nickel, le sélénium, le tellure, le thallium et l'étain.

En 1998, la directive « Eau potable » 98/60/CE<sup>2</sup>, considère le cadmium comme un **élément trace toxique**, tout comme l'arsenic, le chrome, le mercure, le nickel, le plomb, l'antimoine et le sélénium (Blum et al., 2002).

La décision 2455/2001/CE<sup>3</sup> du Parlement européen et du Conseil modifiant la directive 2000/60/CE identifie trois métaux : le cadmium, le plomb et le mercure, comme des **substances dangereuses prioritaires**. Ces substances ainsi sont soumises à un objectif de rejet zéro dans les eaux de surface et les eaux souterraines (Gouzy et Ducos, 2008).

Le tableau 5, situé en annexe, présente les données toxicologiques et les différentes normes relatives au cadmium.

## POLLUTIONS DIFFUSES ET POLLUTIONS PONCTUELLES

Une **pollution ponctuelle** est une pollution provenant d'un site unique, et peut être par exemple le point de rejet d'un effluent ou une zone contaminée. **Les pollutions diffuses**, sont quant à elles, des pollutions dues non pas à des rejets ponctuels et identifiables, mais à des rejets issus de toute la surface d'un territoire et transmis à l'environnement de façon indirecte (Dictionnaire Environnement, 2010).

Les émissions de cadmium dans l'environnement proviennent ainsi soit de **sources ponctuelles** (ex : accidents industriels), soit de **sources diffuses** (ex : engrais phosphatés).

Les pollutions ponctuelles ont rigoureusement diminué au cours des vingt dernières années en raison des réglementations plus strictes appliquées d'un point de vue industriel et

<sup>1</sup> Directive 67/548/CEE du 27 juin 1967.

<sup>2</sup> Directive 98/60/CE 24 juillet 1998.

<sup>3</sup> Décision n°2455/2001/CE du parlement européen et du conseil du 20 novembre 2001.

également grâce à l'amélioration des technologies de contrôle des émissions ([International Cadmium Association's website, 2009](#)).

Les contaminations diffuses sont également de moins en moins importantes. Il a, ainsi, été mis en place des programmes de collecte et de recyclage de produits contenant du cadmium. Seules les émissions de cadmium où celui-ci est présent comme impureté, ne semblent pas diminuer de façon significative. Il semblerait que ce soit le seul domaine où des efforts de réduction pourraient être réalisés ([International Cadmium Association's website, 2009](#)).

Cette synthèse technique s'intéressera essentiellement aux pollutions diffuses dans l'environnement qu'elles soient d'origine naturelle ou anthropique.

## ORIGINE NATURELLE

Le cadmium est présent de façon naturelle dans la croûte terrestre. Au cours des temps géologiques, cet élément a suivi un cycle qui a conduit à une distribution hétérogène de sa concentration à la surface du globe ([Brignon et Malherbe, 2005](#)).

La moyenne des concentrations en cadmium sur la terre est estimée entre 0,1 et 0,5 ppm. Toutefois certaines roches peuvent accumuler des concentrations très importantes comme **les phosphates marins et les phosphorites** qui possèdent des teneurs pouvant aller jusqu'à 500ppm ([International Cadmium Association's website, 2009](#)).

Le tableau 1 présente les teneurs moyennes en cadmium dans les différentes roches de la croûte terrestre.

Eléments (mg/kg)	Roches magmatiques			Roches sédimentaires		
	Roches basiques	Roches intermédiaires	Roches acides	Roches sédimentaires argileuses et sableuses	Grès	Carbonates
Cd	0,13-0,22	0,13	0,09-0,20	0,22-0,30	0,05	0,035

Tableau 1: Teneurs moyennes ( $\mu\text{g.g}^{-1}$ ) en Cadmium des différentes roches de la croûte terrestre ([N'Guessan, 2008](#))

**L'altération et l'érosion** de ces roches va libérer une quantité importante de cadmium qui seront transportées par les eaux continentales. L'OMS a ainsi estimé que 15 000 tonnes par an de cadmium étaient transportées par les rivières vers les océans. **L'activité volcanique** est une source conséquente de libération du cadmium dans l'atmosphère. Elle a été estimée par l'OMS à 820 tonnes par an environ. **Les feux de forêts** ont également été signalés comme une source naturelle d'émission atmosphérique de cadmium, avec des estimations de 1 à 70 tonnes rejetées dans l'atmosphère chaque année. **Il a ainsi été estimé que les apports naturels de cadmium étaient d'environ 800 à 1000 tonnes par an dans l'environnement** ([International Cadmium Association's website, 2009](#)).

## ORIGINE ANTHROPIQUE

### Activités industrielles

De par ses propriétés intéressantes (bon conducteur de chaleur et d'électricité, caractéristique de dureté, possibilité d'alliages, propriété catalytiques, de malléabilité, etc), **le cadmium est utilisé pour de nombreux usages industriels**. Son utilisation a alors modifié

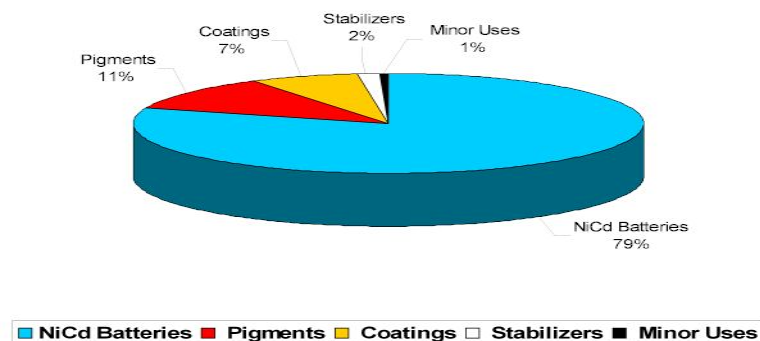


sa répartition et ses formes chimiques sous lesquelles il est présent dans notre environnement (Le Goff et Bonnet, 2004).

Il n'existe pas de minerai de cadmium quantitativement exploitable. Le cadmium est obtenu soit comme **sous-produit de la métallurgie du zinc** (3 kg de cadmium sont obtenus pour 1 tonne de Zinc), soit par le **recyclage des accumulateurs nickel-cadmium**.

La consommation de cadmium est essentiellement due à la production d'oxydes de cadmium, aux piles et accumulateurs, aux pigments, aux stabilisants et aux traitements de surface et aux composants électroniques (Brignon et Malherbe, 2005).

La figure 1 présente la répartition de ces usages dans le monde en 2003.



**Figure 1: Utilisation du cadmium dans l'industrie mondiale en 2003 (International Cadmium Association's website, 2009)**

Le cadmium est également **présent de façon non fonctionnelle** dans certains produits. Ainsi, les métaux non-ferreux, les alliages de plomb, de zinc et de cuivre, le fer, l'acier, les combustibles fossiles, le ciment ainsi que les fertilisants phosphatés possèdent des quantités de cadmium non négligeable (International Cadmium Association's website, 2009).

La fabrication, l'utilisation ou l'élimination de tous ces produits à usages industriels directs ou indirects entraînent des émissions importantes de cadmium dans notre environnement (Brignon et Malherbe, 2005). **Les émissions anthropiques ont ainsi été évaluées à 17 000 tonnes par an (Gonzalez et al., 2009).**

### Ruissellement urbain

Les polluants métalliques, et notamment le cadmium, sont présents en importante quantité en zone urbaine (gouttières, routes, etc). Suite à un épisode pluvieux, ces éléments sont entraînés vers les réseaux d'assainissement, puis vers les cours d'eau. Étant essentiellement sous une forme particulaire, et donc fixé sur des solides, ce polluant se retrouve dans les milieux aquatiques au sein des sédiments et des matières en suspension (Estebe et al., 1995).

### Activités agricoles

Le cadmium est présent de façon plus ou moins importante dans quatre principales activités agricoles qui sont présentées ci-dessous par ordre décroissant selon leurs apports en cadmium sur les sols agricoles français (SOGREAH, 2007).

#### •Les fertilisants minéraux phosphatés

**Les fertilisants phosphatés** peuvent présenter des teneurs en cadmium très importantes. Ils proviennent de l'exploitation de **gisements naturels de phosphate de calcium** qui se trouvent principalement en Afrique du Nord, au Proche Orient et en Russie. Selon leurs origines ces phosphates peuvent présenter des teneurs plus ou moins importantes en cadmium (SOGREAH, 2007).

- Déjection animales

L'alimentation de certains animaux est souvent complétée en phosphore. Ce rajout peut apporter du cadmium qui est naturellement présent sous la forme d'impuretés dans les matières premières (phosphates) (SOGREAH, 2007).

- Épandage de boues, composts et autres produits

Ces produits proviennent de boues résiduaires urbaines, de composts d'origine résiduaire et de déchets d'industries. Ils sont valorisés par épandage pour leurs rôles fertilisants ou d'amendement. Ce type d'épandage reste faible mais les teneurs en Eléments Traces Métalliques (ETM), et notamment en cadmium, sont relativement élevées (SOGREAH, 2007).

- Amendement calcique et magnésien

Les amendements calciques et magnésiens sont destinés principalement à maintenir ou à élever le pH du sol et à en améliorer les propriétés. Les amendements minéraux basiques peuvent contenir des ETM et notamment du Cadmium (SOGREAH, 2007).

- Les pesticides

Il semblerait que les pesticides utilisés dans les activités agricoles en France n'apportent aucun ajout de cadmium dans les sols (SOGREAH, 2007). Toutefois, du cadmium est présent dans les pesticides utilisés comme fongicide dans la production de gazon (Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement, 1999).

# DEVENIR DU CADMIUM DANS L'ENVIRONNEMENT

Les émissions de cadmium réalisées par les activités naturelles et anthropiques citées précédemment sont rejetées dans les divers compartiments de l'environnement que sont le **sol, l'air et l'eau**.

Selon l'étude SOCOPSE, réalisée dans le cadre du contrôle des sources des substances prioritaires en Europe, **les apports du cadmium en Europe en 2000 dans les sédiments, l'air et l'eau sont respectivement de 1500, 590 et 500 tonnes par an** (voir figure 3). De plus, d'importants flux sont réalisés entre les différents compartiments, mais ils sont quantitativement très peu connus (Zielonka et al., 2009).

La disponibilité et l'origine du cadmium dans les eaux continentales sont donc en étroite relation avec le comportement de cet élément dans chacun des compartiments de l'environnement.

## COMPORTEMENT DU CADMIUM DANS L'AIR

Les sources de cadmium dans l'atmosphère peuvent être d'origine naturelle ou anthropique et proviennent en grande majorité des **combustibles solides, du fioul lourd, et des incendies de forêt** (International Cadmium Association's website, 2009).

Le rapport INERIS précise que le cadmium et ses composés sont **pas ou très peu volatiles** et qu'il est essentiellement présent sous forme particulaire en tant qu'oxyde de cadmium (les autres formes étant des sels de cadmium) (Brignon et Malherbe, 2005).

La vie du cadmium dans l'atmosphère est liée la durée de vie des particules porteuses qui est de l'ordre d'**une journée à une semaine environ**. Durant ce temps dans l'atmosphère, elles peuvent parcourir des centaines de kilomètres (Roustan, 2005).

## COMPORTEMENT DU CADMIUM DANS LE SOL

Tout comme le cadmium dans l'atmosphère, la présence de cet élément dans le sol peut être soit d'origine naturelle (le fond géochimique), soit d'origines anthropiques telles que les activités agricoles et les retombées atmosphériques (International Cadmium Association's website, 2009).

Selon Robert, dans son article « *Différents types de transfert du sol vers les hydrosystèmes : dissous ou particulaires, latéral ou vertical* », **le sol est l'interface entre la lithosphère, l'atmosphère, la biosphère, les activités humaines et l'hydrosphère**. Le rôle du sol vis à vis des polluants est complexe. Ainsi, le sol peut être une source ou un puits de polluant, un lieu de dégradation ou de simple transfert (Robert, 1996).

**Le cadmium présent dans les sols est beaucoup moins mobile que dans l'air ou dans l'eau**. De nombreux facteurs influencent sa mobilité dans les sols dont les plus importants sont le pH et le type de sol (International Cadmium Association's website, 2009).

### Le pH

Plusieurs études ont identifié que **la mobilité du cadmium dans le sol était en relation avec un sol acide**. L'abaissement du pH favoriserait sa mobilité (Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement, 1999). Ainsi, l'adsorption du cadmium par le sol peut être multipliée par 3 lorsque le pH augmente d'une unité. (Brignon et Malherbe, 2005)

Toutefois, d'autres processus comme le transport éolien, le transport fluvial, le lessivage et l'absorption par les organismes terrestres affectent également le devenir du cadmium dans les sols. (Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement, 1999)

### Les types de sol

Le transfert peut être plus ou moins rapide en fonction de la **perméabilité du sol**. La macroporosité ou les fissures vont engendrer un transfert rapide du polluant vers les nappes. Le transfert latéral va quant à lui s'effectuer dès que l'infiltration de l'eau est insuffisante et se réalisera par le **ruissellement sur le sol**. Ces transferts jouent un rôle primordial dans la pollution des eaux souterraines et superficielles. (Robert, 1996)

Les sols ont un rôle très important dans l'atténuation du cadmium car ils possèdent les **composantes minérales et organiques qui interviennent dans la rétention des métaux**. De nombreuses études ont également démontré que les minéraux argileux et la matière organique contribuent à l'immobilisation du cadmium dans les sols. Toutefois, il s'est également avéré que la présence de concentration élevée de matières organiques dissoutes dans les produits de lixiviation du sol pouvait augmenter la mobilité du cadmium et donc représenter un risque pour la qualité de l'eau des nappes phréatiques. (Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement, 1999)

### Les micro-organismes

Les micro-organismes peuvent également jouer sur la mobilité du cadmium dans les sols. Ainsi, les substances organiques produites par certains micro-organismes peuvent agir comme « chélate » et **immobiliser le cadmium**. (Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement, 1999)

## COMPORTEMENT DU CADMIUM DANS L'EAU

Selon Gonzalez, dans sa publication sur le comportement du cadmium dans les estuaires, « le cadmium est un élément non conservatif que l'on rencontre en milieu aquatique sous diverses formes physiques (dissoute, colloïdale et particulaire) et sous différentes formes chimiques (minérale ou organique). Un ensemble de variables physico-chimiques du milieu (salinité, pH...) gouvernent les transformations du cadmium dans l'environnement ». (Gonzalez et al., 2009)

Le cadmium se présente donc sous différentes formes selon le type de milieu aquatique :

▪ **En zone côtière**, le cadmium se trouve sous forme dissoute car il est associé aux ions chlorure (Gonzalez et al., 2009). En effet, le cadmium présent dans les matières en suspension se retrouve soluble au delà d'une salinité de 5 à 7 ‰. Il est alors biodisponible pour les espèces bivalves des zones côtières et estuariennes (Agence de l'eau Adour-Garonne, 2010<sup>4</sup>).

▪ **Dans la colonne d'eau (zone oxique)**, c'est le processus « d'adsorption et de désorption » sur les différents types de particules qui va contrôler les teneurs dans le milieu des formes dissoutes et particulaires. **L'adsorption**, ou le phénomène par lequel la molécule de cadmium va se fixer sur une surface solide (argile, matière organique, oxydes et hydroxydes,...) est le mécanisme prédominant. Il est contrôlé par différents facteurs comme le pH, la salinité et la concentration dans l'eau d'éléments compétiteurs. Le mécanisme de **désorption** (le phénomène par lequel la molécule de cadmium se détache du substrat) serait contrôlé principalement par la salinité du milieu (Gonzalez et al., 2009).

**Les remises en suspension** du cadmium dans le milieu sont dues au **curage des sédiments** dans les rivières ou **aux crues** lors d'épisodes pluvieux. Plus ces épisodes

<sup>4</sup> Ce document n'a pas encore été diffusé par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne.

seront importants, plus ils seront capables de mobiliser des sédiments très anciens, contaminés et stockés depuis de nombreuses années. (Agence de l'eau Adour-Garonne, 2010). Par exemple, dans la rivière du Lot, une tonne de cadmium a été stockée dans les sédiments fluviaux en 2004, alors que 9 tonnes ont été transférées vers l'aval en 2003. La majorité de ce transfert a eu lieu lors la crue de décembre 2003. (Blanc et al., 2005)

▪ Dans les bouchons vaseux des estuaires ou les colonnes sédimentaires (zones anoxiques), « le cadmium est immobilisé sous forme de sulfures particulaires ». Toutefois, les remises en suspension en milieu oxygène peut entraîner une dissolution du cadmium.

La figure suivante présente de façon synthétique l'évolution du cadmium selon les différents milieux et les principaux processus d'échange dissous-particulaire.

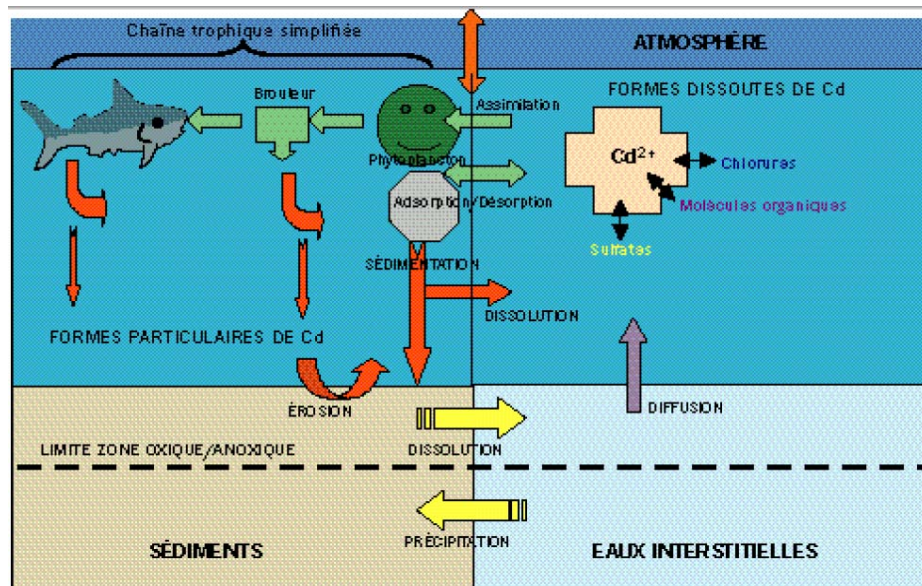


Figure 2: Schéma du cycle biogéochimique du cadmium et des principaux processus d'échange dissous-particulaire. (Gonzalez et al., 2009)

Les tableaux 7 et 8, situés en annexe, présentent les concentrations en cadmium dans les différentes phases dissoutes et particulaires de différents sites à travers le monde.

# ETAT DES CONNAISSANCES ET DES REGLEMENTATIONS SUR LES ACTIVITES ANTHROPIQUES POUVANT ENGENDRER UN APPORT EN CADMIUM

## CONNAISSANCES SUR LES APPORTS DE CADMIUM VERS L'ENVIRONNEMENT EN EUROPE

Les apports anthropiques du cadmium dans l'environnement sont dus à l'industrie et à l'agriculture. De nombreux échanges interviennent donc entre les différents compartiments de l'environnement. La figure suivante ainsi que le tableau 6 (en annexe) indiquent la quantité des différents apports anthropiques et naturels de cadmium vers l'atmosphère, l'eau et les sédiments, en Europe durant l'année 2000.

Cet état des lieux a été réalisé dans le cadre du projet SOCOPSE (Source Control of Priority Substances) qui travaille sur le thème de la réduction des rejets dans l'eau des substances prioritaires de la Directive Cadre sur l'Eau (Gouzy et Ducos, 2008).

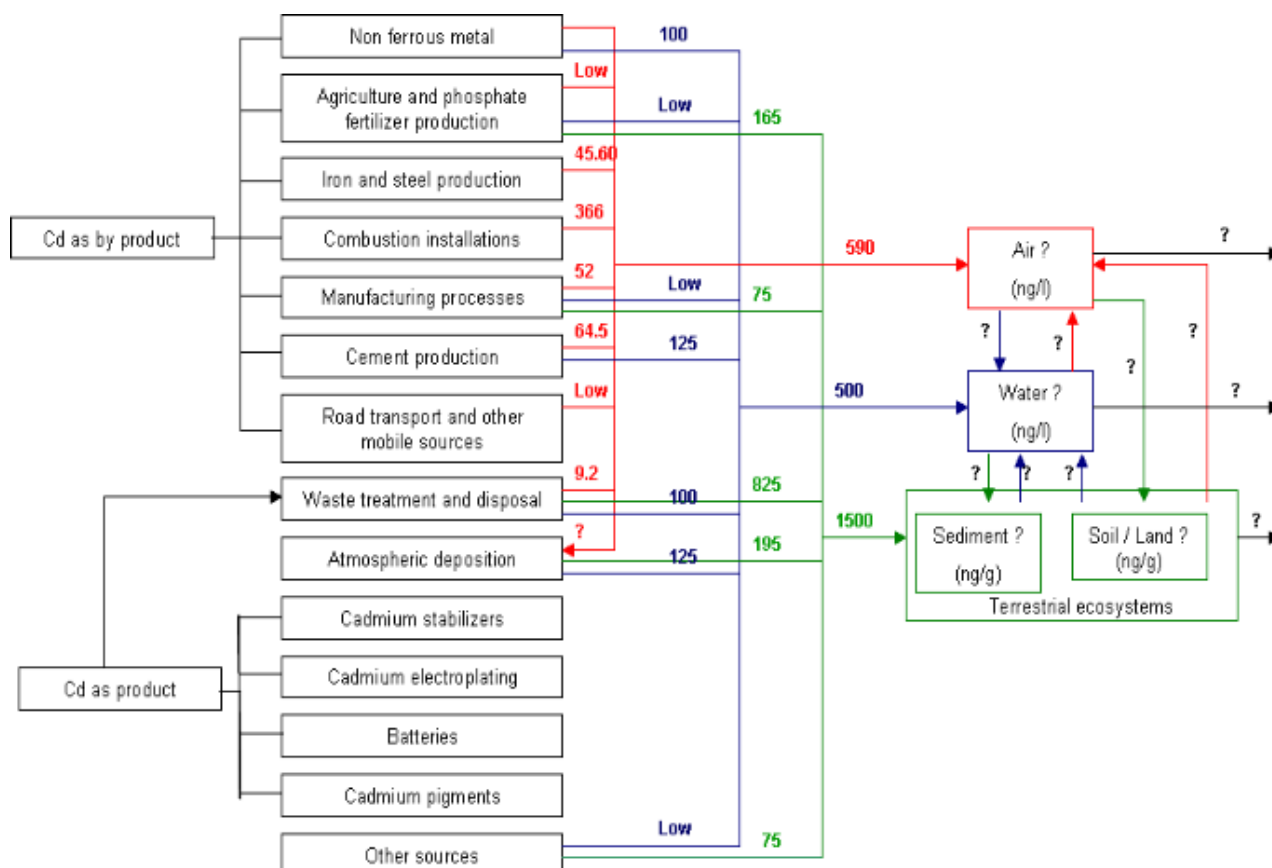


Figure 3: Apports de cadmium dans l'environnement en Europe durant l'année 2000 (tonnes/an) (Zielonka et al., 2009)

### **Apport vers l'atmosphère**

**La combustion d'énergie fossile** est la principale source de cadmium dans l'atmosphère (44.3%). Suivent ensuite les productions de métaux non ferreux (zinc et plomb) à 19.3%, la production de fer et d'acier à 13.7 % et l'incinération de déchets municipaux à 3.4% (Zielonka et al., 2009).

### **Apport vers le sol**

Deux activités contribuent le plus fortement à l'apport de cadmium sur les sols en Europe : **les résidus produits par les centrales électriques et l'incinération de déchets** (30%), et **l'enfouissement des déchets urbains** (25%). Les dépôts atmosphériques (13%), l'enfouissement des déchets liés à l'agriculture (11%) et les fertilisants (10%) ont quant à eux des apports plus faibles en cadmium vers les sols (Zielonka et al., 2009).

### **Apport vers l'eau**

Les principaux apports de cadmium vers les milieux aquatiques sont les **dispositifs de traitement de déchets ménagers** (20%), **la production de métaux non-ferreux** (20%), **les procédés de fabrication de métaux, produits chimiques et produits pétroliers** (25%), et **les dépôts atmosphériques vers les eaux continentales européennes** (25%) (Zielonka et al., 2009).

## **APPORT DES ACTIVITES INDUSTRIELLES**

### **Etat des connaissances**

Dans le monde, la quantité de cadmium fabriquée a été divisée par deux depuis 1980 et est actuellement de 20 000 tonnes/an (Brignon et Malherbe, 2005).

Depuis environ 50 ans, les concentrations en cadmium dans l'environnement sont en baisse grâce à l'amélioration des technologies concernant la production, l'utilisation et l'élimination du cadmium (International Cadmium Association's website, 2009).

Les émissions anthropiques ont ainsi diminué d'environ 90% au cours des trente dernières années. Cette évolution a été observée dans les glaces du Groenland où les concentrations sont passées de 0.2 pg/g en 1800, à 2 pg/g en 1960, puis à 0,7 pg/g en 2000 (International Cadmium Association's website, 2009).

La figure 4 présente les teneurs en cadmium dans l'atmosphère en Europe entre 1955 et 2005 en fonction des différentes origines industrielles. La forte baisse observée depuis 1960 est essentiellement due à l'amélioration significative du contrôle de la pollution dans l'industrie des métaux. Toutefois, il existe d'importantes différences de teneurs en cadmium dans l'atmosphère selon les secteurs. Ainsi, les concentrations en zone rurale ont été estimées entre 0.1 et 5 ng/m<sup>3</sup>, entre 2 à 15 ng/m<sup>3</sup> dans les zones urbaines, et entre 15 à 150 ng/m<sup>3</sup> dans les zones industrialisées. (International Cadmium Association's website, 2009)

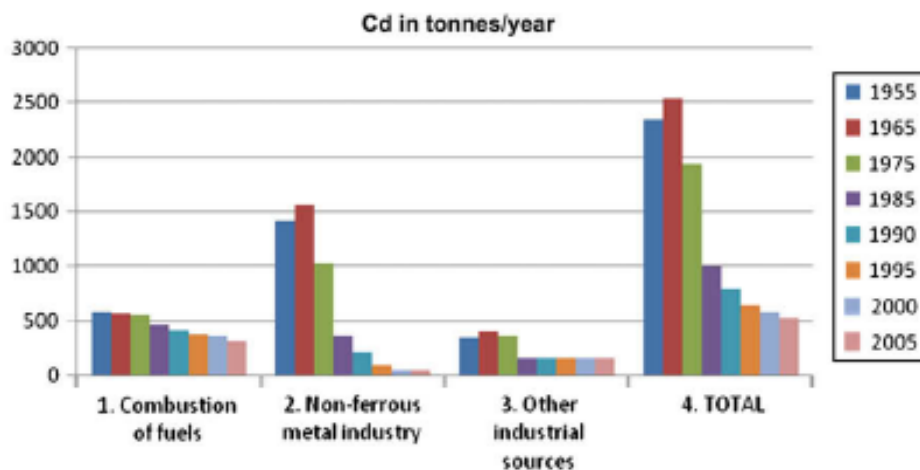


Figure 4: Evolution des teneurs en cadmium (tonnes/année) dans l'atmosphère en fonction des différentes sources en Europe entre 1955 et 2005 (Pacyna et al., 2009)

En France, le bilan des rejets industriels a été évalué par le Ministère de l'équipement et du développement durable (MEED) en 2003. Il a donc été recensé l'ensemble des rejets de cadmium dans les milieux aquatiques supérieurs à 5 kg/an, pour les installations industrielles relevant de la réglementation ICPE uniquement. **Une contribution importante des secteurs de la métallurgie et la sidérurgie a été observée (Brignon et Malherbe, 2005).** La répartition par secteur industriel, pour l'année 2001, est détaillée dans le tableau suivant.

Secteur industriel	Nombre d'établissements	Flux total (kg/an)	Flux moyen par établissement (kg/an)
Sidérurgie et métallurgie	10	3 339	334
Industries extractives	3	266	89
Traitement de déchets	5	210	42
Chimie, parachimie, pétrole	4	52	13
Industries minérales	1	35	35
Bois, papier, carton	2	19	9,5
Divers	1	15	15

Tableau 2: Flux de cadmium (kg/an) des différents secteurs industriels français vers les milieux aquatiques (Brignon et Malherbe, 2005)

La sidérurgie et la métallurgie sont donc de loin les secteurs qui contaminent le plus les milieux aquatiques en France. Suivent ensuite l'industrie extractive et le traitement des déchets qui ont des flux de cadmium vers les milieux aquatiques plus de dix fois inférieurs.

### Réglementation

Des valeurs de limites de rejets pour certains rejets industriels pouvant contenir du cadmium ont été définies par un arrêté le 2 février 1998<sup>5</sup> (Brignon et Malherbe, 2005). Le tableau suivant présente les valeurs limites de concentration définies par domaine d'activité en France.

<sup>5</sup> Arrêté du 2 février 1998 relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation.



Domaine d'activité	Valeur limite de concentration	Valeur limite de flux	Arrêté
Extraction du zinc, raffinage du plomb et du zinc, industrie des métaux non ferreux et du cadmium métallique	0,2 mg/l		2 février 1998
Fabrication de composés de cadmium	0,2 mg/l	0,5 g/kg de Cd traité	2 février 1998
Fabrication de pigments	0,2 mg/l	0,3 g/kg de Cd traité	2 février 1998
Fabrication de stabilisants	0,2 mg/l	0,5 g/kg de Cd traité	2 février 1998
Fabrication de batteries primaires et secondaires	0,2 mg/l	1,5 g/kg de Cd traité	2 février 1998
Verrerie	0,05 mg/l		12 mars 2003

**Tableau 3: Valeurs limites françaises de rejets industriels pour le cadmium (Brignon et Malherbe, 2005)**

## APPORT DU RUISSELLEMENT URBAIN

Selon des études menées sur le bassin versant du Marais à Paris, les flux de cadmium transportés vers les eaux superficielles par les ruissellements urbains sont relativement importants. Ainsi, environ 80 à 90% des masses de cadmium transportées par le ruissellement urbain en temps de pluie proviendraient des **toitures**, alors que les 10 à 20% restants proviendraient du **ruissellement de chaussée** (Dufresne, 2004).

Les ruissellements de toiture proviennent de deux origines distinctes : l'apport par les **retombées atmosphériques** et l'apport par les **corrosions des métaux**. Le cadmium est une impureté du minerai de zinc et peut donc être lixivié à partir des toitures constituées en partie de zinc (Dufresne, 2004).

Sa présence dans le ruissellement de chaussée provient essentiellement du **trafic automobile** (usure des pneus, garniture des freins) et de l'**abrasion des routes** (Dufresne, 2004).

Ces eaux de ruissellement sont ensuite récupérées, soit par un réseau d'**assainissement séparatif** et donc directement dirigées vers le milieu aquatique, soit par un réseau d'**assainissement unitaire** où elles sont envoyées vers une station d'épuration. Selon le rapport d'INERIS, le taux d'élimination du cadmium dans une station d'épuration urbaine après traitement de l'eau est supérieur à 60% (Brignon et Malherbe, 2005).

Toutefois, la teneur en cadmium dans les eaux de ruissellement urbain peut varier très fortement d'une zone urbaine à l'autre en fonction des matériaux utilisés et des flux atmosphériques locaux. (Dufresne, 2004).

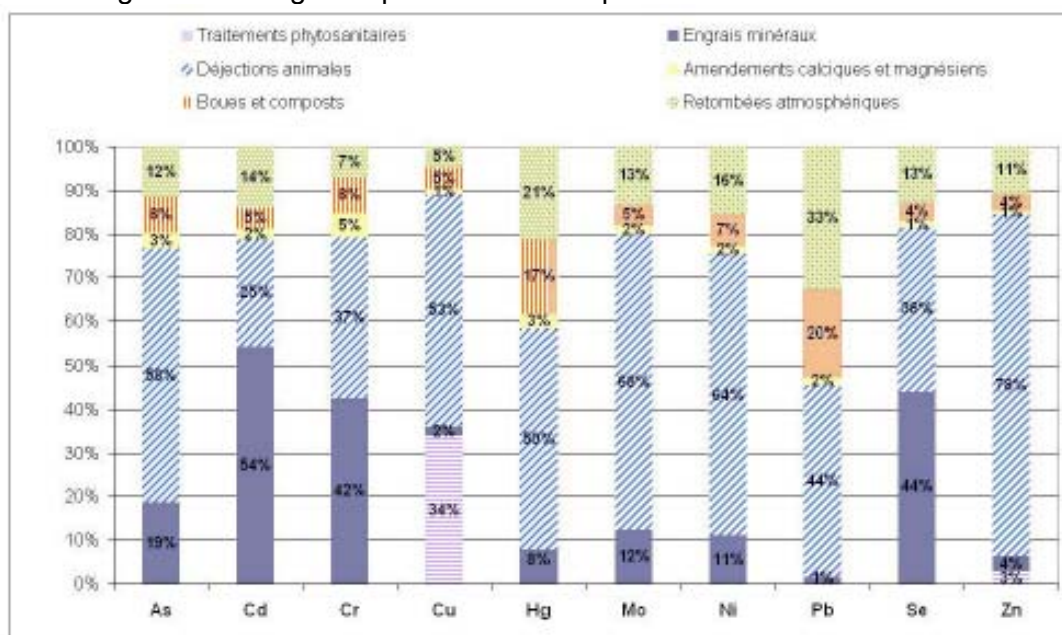
Les concentrations en cadmium des eaux superficielles varient également en période de hautes et basses eaux. Ainsi, selon une étude menée durant 18 mois sur la Seine en aval de Paris, le fleuve présente des concentrations élevées en cadmium en période de basses eaux et des concentrations plus faible lorsque les débits sont élevés (Estebe et al., 1995).

## APPORT DES ACTIVITES AGRICOLES

### Etat des connaissances

En 2007, le bureau d'étude SOGREAH a réalisé pour le compte de l'ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) une étude sur le « **Bilan des flux de contaminants entrant sur les sols agricoles de France métropolitaine** ». Ce projet a eu pour principal objectif de réaliser un bilan qualitatif et quantitatif des sources de contaminants organiques et d'éléments traces dans les sols agricoles (SOGREAH, 2007).

Ce travail a permis d'estimer l'apport de cadmium annuel sur les sols agricoles français à **64 tonnes**. Ce chiffre est faible comparé au chrome, au zinc, et au cuivre dont les apports sont respectivement de 1 001, 4809 et 16180 tonnes. Il a également été estimé la part des différentes sources de contamination dans l'estimation des quantités totales d'ETM entrant sur les sols agricoles. La figure 5 présente cette répartition.



**Figure 5: Part des différentes sources de contamination dans l'estimation des quantités totales d'ETM entrant sur les sols agricoles (SOGREAH, 2007)**

La principale source de cadmium dans les sols français est donc due aux **engrais minéraux** et plus particulièrement aux **engrais phosphatés (54%)**. Les quantités d'engrais minéraux livrés en France métropolitaine s'élèvent à environ 9,6 millions de tonnes chaque année. Les autres sources importantes d'entrée de cadmium sur les sols agricoles sont **les déjections animales (25%)** et **les retombées atmosphériques (14%)**.

La figure 7 (voir en annexe) présente une estimation des quantités de cadmium entrant sur les sols agricoles de France métropolitaine par département, par an et en fonction des différentes sources de contamination.

Le tableau 4 présente les teneurs en cadmium dans les différents types de fertilisants. Il est à noter que certains (ex : superphosphate triple) ont **des concentrations en cadmium pouvant être environ 300 fois supérieures à la teneur naturelle des sols.** (N'Guessan, 2008)

Fertilisants	P.E	As	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Sulfate d'ammonium	N	4.2-29	0.08-4.80	7.7-12.0	1.0-4.4	<1.1	25.0-32.0	2.4-13.6	1-6
Nitrate d'ammonium	N	2.7-119.7	0.08-8.50	5.4-11.5	1.0-4.2	3	7.0-34.2	1.9-27.8	3-7
Nitrate de calcium	N	2.2-10.1	0.05-2.80	8.6-12.8	15.4-19.2	5-15	26.0-27.5	2.4-8.0	2-42
Urée	N	5.6-33.4	0.22-3.20	1.0-1.4	8.0-16	<1.1	7.2-10.2	5.5-48.7	<1.1
Cyanamide de calcium	N	2.2	0.03	22.0	23.0	14	48.8	5.9	4
Superphosphate	P	2.4-28.5	0.10-2.20	8.8-21.0	39.6-134.0	20-135	19.2-38.2	3.1-17.4	55-235
Superphosphate triple	P	321.5	3.25	16.7	190.0	138	44.2	13.9	138
Sulfate de potassium	K	2.4-8	0.06-3.80	5.8-7.0	2.0-2.8	1-2	11.0-16.0	1.4-17.4	2-6
Composés NP	N,P	3.3-126.9	0.06-9.30	10-17.0	31.8-110.6	11-22	27.0-36.2	0.0-9.9	16-122
Composés NPK	N,P,K	3.0-282.4	0.04-7.80	10-15.7	27.0-178	4-23	9.7-43.5	0.0-24.4	19-78
Teneurs naturelles dans les sols		1.0-50.0	0.01-0.70	1.0-40.0	5-1000	2-100	5-500	2.0-200	10-300

Tableau 4: Gamme des teneurs en éléments traces (mg/kg) dans les sols pour une tonne métrique de différents fertilisants et les gammes naturelles dans les sols. (N'Guessan, 2008)

### Réglementation

Des discussions entre les états membres de la Commission européenne afin de **réglementer les concentrations maximum en cadmium dans les engrais** sont actuellement en cours. Ce projet viserait à limiter, dans les cinq ans après l'entrée en vigueur de la directive, à 60 mg de cadmium pour 1 kg d'engrais, pour arriver, progressivement au bout de 15 ans, à une teneur de 20 mg/kg. L'objectif final de cette réglementation étant de stopper l'accumulation de cadmium dans les terres agricoles (Brignon et Malherbe, 2005).

Selon l'UNIFA (Union des Industrie de la Fertilisation), cette proposition sur la baisse des teneurs en cadmium aurait de graves conséquences d'un point de vue économique pour un bénéfice qui ne serait pas prouvé. En effet, cette réglementation imposerait de décadmier les phosphates d'origine sédimentaire issus principalement d'Afrique du Nord et du Proche Orient, qui sont les premières sources d'approvisionnement pour l'industrie française des engrais (UNIFA, 2005).

## EXEMPLES DE CONTAMINATIONS

### Contamination du Lot (origine industrielle)

A la fin des années 1970, le Réseau National d'Observation de la qualité marine (RNO) de l'IFREMER a révélé des teneurs en cadmium très élevées dans les moules et huîtres de l'estuaire de la Gironde. Ces mollusques se sont avérés être à l'époque, les plus contaminés du littoral européen. Dans les années 80, l'université de Bordeaux démontra que cette contamination provenait du **site métallurgique de l'Union Minière à Viviez**, près de Decazeville, dans le bassin versant du Riou-Mort, affluent rive gauche du Lot (Agence de l'eau Adour Garonne, 2010).

Cette industrie produisait essentiellement du zinc à partir de minerais importés. Son extraction et sa purification conduisaient indirectement à la production de **10 000 tonnes de cadmium et à la formation de boues chargées en ETM stockées à côté de l'usine**. Le lessivage de ses crassiers par les eaux de pluies a entraîné la contamination de la nappe phréatique du Riou Mort. Cette pollution a ensuite atteint le Lot pour progressivement polluer la Garonne et la Gironde, devenant ainsi responsable des taux de cadmium élevés dans les huîtres de l'estuaire de la Gironde (Agence de l'eau Adour Garonne, 2010).

### **Pollution du Rhin (activités agricoles, ruissellement urbain et décharges)**

Les eaux du Rhin présentent de fortes teneurs en cadmium. En France, les apports diffus en cadmium dans le fleuve sont de 713 kg/an. Selon les travaux de la commission internationale pour la protection du Rhin, les sources principales de pollutions diffuses seraient les **eaux de drainage** (42,6 %) et les **réseaux d'eaux usées** (35,9%). Les contaminations par les eaux de drainage seraient dues aux **fertilisants phosphatés** utilisés dans les sols agricoles du bassin versant et de la présence **d'anciennes décharges** avec des déchets contaminés (Brignon et Malherbe, 2005).

### **Pollution de la Seine (ruissellement urbain et activités agricoles)**

Le bassin Seine Normandie occupe une superficie de 97 000 km<sup>2</sup> et regroupe 17,25 millions d'habitants. 55% de cette population est concentrée sur 2 % du territoire : l'agglomération parisienne. L'agriculture, ainsi que l'industrie y sont très importantes et par conséquent ces activités entraînent des pollutions importantes des cours d'eaux en cadmium. (Dufresne, 2004)

Selon Gonzalez, la Seine fait partie des estuaires les plus contaminés du monde. Aujourd'hui, **la majorité des apports de cadmium proviennent de l'agglomération parisienne** (Gonzalez et al., 2009).

Ainsi, le flux de cadmium annuel dans la Seine est de 2590 kg. **Le ruissellement urbain** par temps de pluie et l'érosion et le **drainage agricoles** sont les principaux polluants. Leurs apports sont respectivement de 55% et 26%. Les rejets de stations d'épuration et les rejets industriels ont des apports bien plus faibles et sont d'environ 7% pour les deux (Dufresne L., 2004).

## **LE CADMIUM DANS LE FUTUR**

**L'utilisation du cadmium baisse de façon continue depuis plusieurs années** et son emploi a été interdit ou restreint dans plusieurs applications industrielles importantes (équipements électriques et électroniques, stabilisation et coloration de produits métalliques) par la réglementation européenne. Néanmoins, son usage pour les accumulateurs reste très important, et il semblerait qu'il perdure dans les années à venir (Gouzy et Ducos, 2008).

Les pollutions diffuses demeurent le plus important apport de cadmium dans les milieux aquatiques, et leurs importances par rapports aux pollutions ponctuelles devraient augmenter dans le futur. **Selon le rapport d'INERIS, les rejets diffus de cadmium, tel que les sources diffuses de combustion (résidentielles, feux de déchets...), les dépôts atmosphériques et l'emploi d'engrais phosphatés dans l'agriculture, seront très difficiles à réduire à court terme.** (Brignon et Malherbe, 2005). Pour ces derniers, le fait que la Commission européenne fixe leurs teneurs en cadmium diminuerait de façon importante la contamination diffuse des sols, et par conséquent la pollution des eaux continentales.

Le tableau 9, situé en annexe, présente les mesures à réaliser pour que les principales activités émettrices de cadmium diminuent leurs rejets dans l'environnement. Les tableaux 10 et 11, en annexe, présentent quant à eux l'estimation de la faisabilité, de la performance, du coût et du niveau de développement des mesures citées dans le tableau 9.

# PROBLEMATIQUE DU BASSIN VERSANT DE LA CHARENTE

## CONTEXTE

Il a été observé dans la baie de Marennes-Oléron, une hausse des teneurs en cadmium, malgré les efforts industriels réalisés dans le bassin versant de la Charente, et les efforts menés sur le Lot. Selon un rapport réalisé en 2010 par l'Agence de l'eau Adour-Garonne, la baie de Marennes-Oléron, a reçu 400 kg de cadmium en 2007. La principale source de cadmium provient de la Charente qui apporte 68% du cadmium total (270 kg). Les 130 kg restants proviennent de l'estuaire de la Gironde et donc ont pour principale origine le site métallurgique de l'Union Minière à Viviez. La figure 6 présente les répartitions des flux de cadmium entre la Gironde, la Seudre, la Charente et la baie de Marenne d'Oléron. (Agence de l'eau Adour Garonne, 2010)

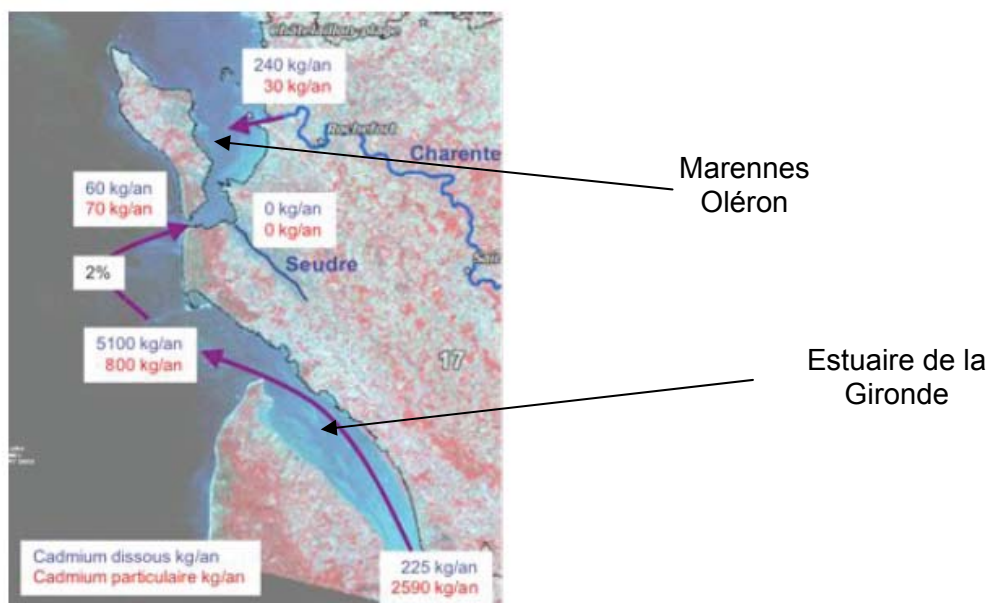


Figure 6: Répartition des flux de cadmium entre la Gironde et et la baie de Marennes Oléron (Agence de l'eau Adour-Garonne, 2010)

En 1988, des teneurs en cadmium de l'ordre de 0.4  $\mu\text{g/g}$  ont été analysées dans les sédiments de la baie de Marennes Oléron et de l'estuaire de la Charente. L'étude des carottes a démontré une augmentation des teneurs en cadmium au cours du temps. Cela a été expliqué par l'impact des activités industrielles. (Gonzalez et al., 2009)

Ce chapitre tentera de synthétiser les différents apports possibles pouvant être responsables de ces hausses des teneurs en cadmium dans la baie de Marennes Oléron.

## LE BASSIN VERSANT DE LA CHARENTE

Le bassin versant de la Charente a une superficie de 10 549 km<sup>2</sup> et s'étale principalement sur les départements de la Charente et de la Charente Maritime (voir figure 8 en annexe). Le fleuve Charente prend sa source en Haute-Vienne (Chéronnac) et se jette dans l'océan Atlantique au niveau de la baie de Marennes Oléron.

Les activités réalisées sur ce bassin versant sont principalement rurales. 84 % de communes du bassin ont une population inférieure à 1 000 habitants et seulement quatre villes de la vallée de la Charente comptent plus de 10 000 habitants (Bouba-Olga et al., 2004).

Les périodes d'étiages sur la Charente font naturellement objet de problématiques quantitatives. De plus lors de ces périodes, le fleuve subit de fortes pressions de prélèvements anthropiques (agriculture, AEP, industrie) qui accentuent le phénomène et détériorent la qualité de l'eau (EPTB, 2003).

## **LES CARACTERISTIQUES GEOLOGIQUES ET PEDOLOGIQUES DU BASSIN VERSANT DE LA CHARENTE**

Selon une étude réalisée par Baize en 1999 sur les « anomalies naturelles en cadmium dans les sols de France », la géologie du bassin versant de la Charente (voir figure 12 en annexe), constituée de **calcaire Jurassique et Crétacé, a des teneurs naturelle en cadmium pouvant être à certains endroits très supérieures à 2 mg/kg**. Il semblerait que les fortes teneurs de ces calcaires en cadmium soient dues à certains faciès de calcaire, tels que les calcaires bioclastiques, crayeux, récifaux et oolithiques (Baize et al., 1999). Toujours selon cette étude, le département de la Charente-Maritime, composant une partie importante du bassin versant de la Charente, possède des sols avec des teneurs naturelles en cadmium moyennes comprises entre 0.5 et 1 mg/kg. Ces teneurs sont relativement importantes en comparaison aux autres secteurs étudiés (voir figure 12 en annexe).

Une grande majorité de la surface ce bassin versant est constitué d'un **sol très basique** (voir figure 11) avec un pH souvent supérieur à 8 (Groupement d'intérêt scientifique Sol, 2010). Ce type de sol à la particularité de diminuer de façon importante la mobilité du cadmium dans les sols (Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement, 1999).

## **LES EAUX DE RUISSELLEMENT**

Les villes du bassin versant de la Charente ont subi ces dernières années une forte augmentation de la population et donc un développement de l'urbanisation. Ainsi, entre 1990 et 1999, la population du Poitou-Charentes vivant en aire urbaine a augmenté de 13.7%. Ce phénomène est particulièrement marqué pour Angoulême, Saintes et Cognac, qui sont trois villes situées en bord de Charente (Bouba-Olga et al., 2004).

De plus durant la période estivale, beaucoup de communes situées sur le littoral charentais voient leurs nombre d'habitants multiplié par six pendant la période estivale (Bouba-Olga et al., 2004).

Ainsi, **la saturation fréquente des stations d'épuration, les anomalies rencontrées au niveau des systèmes d'assainissement des eaux usées, des réseaux des eaux pluviales localisés en zones sensibles ou encore le ruissellement des eaux pluviales contaminées sur les surfaces imperméabilisées** (Bouba-Olga et al., 2004) peuvent être des facteurs de contamination en cadmium des eaux superficielles importantes.

## **LES ACTIVITES AGRICOLES**

D'après le rapport SOGREAH pour le compte de l'ADEME sur le « **bilan des flux de contaminants entrant sur les sols agricoles de France** » les apports annuels en cadmium sur les sols agricoles français dans **les départements de la Charente et de la Charente Maritime sont environ de 1000 kg/an**. Cet apport est supérieur à la moyenne française

mais est bien inférieur à ceux du département de la Marne qui possède des apports deux fois supérieurs environ.

Toujours selon cette étude, les apports en cadmium sur les sols agricoles sont dus environ à **75% aux engrais minéraux** (et donc aux engrais phosphatés), à 12,5% aux retombées atmosphériques et à 12.5 % aux déjections animales.

## **L'ACTIVITE INDUSTRIELLE**

Seule une activité industrielle a été recensée comme pouvant être source de contamination en cadmium des eaux continentales du bassin versant de la Charente : **L'entreprise SECMA à Tonnay Charentes**. Toutefois ce travail n'étant pas exhaustif, une étude complémentaire semble nécessaire afin d'inventorier de façon définitive la totalité des industries pouvant engendrer un apport diffus de cadmium dans l'environnement.

Cette usine est située à l'aval du bassin versant de la Charente, à l'est de Rochefort et produit actuellement **120 000 tonnes d'engrais superphosphatés** avec un recyclage intégral des effluents de procédés sur les chaînes de production.

Les activités antérieures de ce site (métallurgie du zinc, chimie des engrais et métallurgie du plomb) ont engendré une pollution des sols et des aquifères en métaux lourds et notamment en cadmium. ([Agence de l'eau Adour Garonne, 2010](#))

Selon la banque de donnée BASOL sur les sites et sols pollués, un diagnostic a été réalisé en 2000 et démontrait que des teneurs anormales en cadmium étaient présentes dans le sol. Toutefois, l'impact de cette source sur les eaux souterraines et superficielles demeurerait relativement faible. En 2001, un arrêté préfectoral a imposé la réalisation de travaux afin d'imperméabiliser certaines zones de l'usine en cas de pollution ponctuelle, ainsi qu'un suivi régulier qualitatif des eaux souterraines et superficielles ([DREAL, 2009](#)).

## CONCLUSION

Les connaissances sur l'origine et la disponibilité du cadmium dans les eaux continentales ont été synthétisées dans ce document, et ont ensuite été appliquées au bassin versant de la Charente. Ce travail concernant ce secteur géographique n'a pu être réalisé que de façon superficielle, et seule une énumération des possibles causes de pollutions diffuses susceptibles d'augmenter les teneurs en cadmium de ses eaux continentales a été effectuée. En effet, n'ayant pas pu récupérer les chroniques et l'emplacement de ces mesures, il n'a pas été possible d'approfondir les recherches. Plusieurs points importants restent à développer afin de mieux comprendre ce phénomène et de pouvoir ainsi lutter contre cette pollution.

Une étude détaillée de l'évolution des pratiques agricoles, et plus particulièrement des engrais utilisés, dans le bassin versant de la Charente semble nécessaire. Un suivi particulier des teneurs en cadmium mesurées sur les piézomètres du bassin versant devraient également être réalisés. Ces deux études permettraient une comparaison avec l'évolution des teneurs en cadmium dans la baie de Marennes Oléron, pour ainsi savoir si les activités agricoles sur le secteur sont responsables du phénomène observé.

Il serait également important de s'intéresser plus précisément au devenir des eaux de ruissellement des principales villes situées sur la Charente, à la présence d'ancienne décharge sur le secteur ou encore aux activités industrielles pouvant être source de contamination.

Afin de diminuer les teneurs en cadmium dans la baie de Marennes Oléron des efforts sont également à réaliser au niveau du Lot et de la Garonne. En effet, comme mentionné précédemment, 32% du cadmium de la zone d'étude provient de ces deux cours d'eau. Même si une extraction et le traitement de leurs sédiments contaminés sont techniquement irréalisables, en raison de coûts bien trop élevés, des travaux permettant de contrôler et de réduire la contamination sont réalisables. En premier lieu, il semble nécessaire de diminuer la teneur en cadmium du sol au niveau de la source principale de contamination (bassin de Decazeville) jusqu'à la teneur naturel du fond géochimique du secteur. Une amélioration de la gestion des aménagements fluviaux et des travaux sur ce cours d'eau permettrait également de limiter les apports vers l'estuaire de la Gironde. ([Agence de l'eau Adour Garonne, 2010](#))



## BIBLIOGRAPHIE

**Agence de l'eau Adour-Garonne, 2010.** *Le défi Cadmium*. Toulouse, Editions AEAG, 14 p. <sup>6</sup>

**Association Française des Etablissements Publics Territoriaux (EPTB), 2003.** *Le bassin versant de la Charente*. Paris, Association Française des Etablissements Publics Territoriaux. Disponible sur Internet : <http://www.eptb.asso.fr/documentation-1/etude-monographique/Charente.pdf>, [consulté le 25/10/2010].

**Baize D., Deslais W., Gaiffe M., 1999.** Anomalies naturelles en cadmium dans les sols de France. *Étude et Gestion des Sols*, 6, 2, pp. 85-104.

**Bichot F., Lavie J., Pinault JL., Thinon-Larminach M., 2008.** *Analyse des chroniques piézométriques et hydrologiques avec le logiciel TEMPO pour la gestion des prélèvements Phase 2 : Bassin versant de la Charente*. BRGM/RP-55485-FR, Poitiers, pp. 44-45.

**Blanc G., Schafer J., Robert S., Audry S., Bosy C., Lavaux G., Lissalde J.P., 2005.** Comportement du cadmium dans le système Lot-Garonne-Gironde. *AdourGaronne*, 92, pp 18-20.

**Blum A., Barbier J., Chery L., Petelet-Girard E., 2001.** *Contribution à la caractérisation des états de référence géochimique des eaux souterraines. Outils et méthodologie*. Rapport BRGM/RP-51093-Fr, Orléans, pp 57-68.

**Bouba-Olga O., Chauchefoin P., Mathé J., 2004.** Innovation et territoire : une analyse des conflits autour de la ressource en eau. Le cas du bassin versant de la Charente. *Les territoires de l'innovation, espaces de conflits*, Bordeaux, 18-19/11/2004, pp 2-5.

**Brignon J.M. et Malherbe L., 2005.** *Cadmium et ses dérivés*. INERIS – Données technico-économiques sur les substances chimiques en France, Verneuil en Halatte, 25 p.

**Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement, 1999.** Recommandations canadiennes pour la qualité des sols : Environnement et santé humaine - cadmium (1999). *Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement*, 1999, Winnipeg, pp 2-6.

**Directive 67/548/CEE du conseil du 27 juin 1967.** Disponible sur Internet : <http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=P/87/25&format=HTML&aged=0&language=FR&guiLanguage=en>, [consulté le 26/11/2010].

**Décision n°2455/2001/CE du parlement européen et du conseil du 20 novembre 2001.** Disponible sur Internet : <http://texteau.ecologie.gouv.fr/textes/DE-20112001.html>, [consulté le 26/11/2010].

**Dictionnaire Environnement, 2010.** *Dictionnaire Environnement*. Béziers, RECYCONSULT. Disponible sur Internet : <http://www.dictionnaire-environnement.com>, [consulté le 14/11/2010].

**DREAL, [mis à jour le 23/06/2009].** *Base de données BASOL*. Disponible sur Internet : [http://basol.ecologie.gouv.fr/fiche.php?page=1&index\\_sp=17.0012](http://basol.ecologie.gouv.fr/fiche.php?page=1&index_sp=17.0012), [consulté le 23/10/2010].

<sup>6</sup> Ce document n'est pas encore finalisé par l'Agence de l'Eau Adour-Garonnes. Cette version a été transmise le 25/10/2010. Les auteurs de ce document n'ont pas été communiqués.

**Dufresne L., 2004.** *Cadmium, mercure et plomb dans les eaux du bassin Seine Normandie : historique, flux et perspectives.* Synthèse technique du Mastère en Ingénierie et Gestion de l'Environnement de l'Institut Supérieur d'Ingénierie et de Gestion de l'Environnement de MINES ParisTech (ISIGE), Paris, 11 p.

**Dufresne L., 2004.** *La lutte contre les substances toxiques dans les eaux du bassin Seine-Normandie : stratégie, résultats et perspectives.* Mémoire du Mastère en Ingénierie et Gestion de l'Environnement de l'Institut Supérieur d'Ingénierie et de Gestion de l'Environnement de MINES ParisTech (ISIGE), Paris, pp 35 - 52.

**Estèbe A., Bussy A.L., Mouchel J.M., Thévenot D.R., 1996.** Cycle des métaux en milieu urbain: Transport des métaux particuliers. Chapitre 8. In : Le Coz C., Tassin B., Thévenot D. (Ed.), *Transfert des polluants dans les hydrosystèmes.* Paris, Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées, pp. 85-95.

**Gonzalez J.L., Chiffolleau J.F., Miramand P., Thouvenin B., 1999.** *Le cadmium : comportement d'un contaminant métallique en estuaire.* Toulon, IFREMER, 32 p.

Gouzy A., Ducos G., 2008. La connaissance des éléments traces métalliques : un défi pour la gestion de l'environnement. *Air Pur*, n°75, pp. 1-2.

**Groupe d'intérêt scientifique Sol, [mis à jours le 12/09/2010].** *Groupe d'intérêt scientifique Sol.* Paris, INRA. Disponible sur Internet : [www.gissol.fr/programme/bdat/bdat.php](http://www.gissol.fr/programme/bdat/bdat.php), [consulté le 29/10/2010].

International Cadmium Association's website, 2009. *Cadmium.* Disponible sur Internet : [www.cadmium.org](http://www.cadmium.org), [consulté le 06/10/2010].

**Le Goff F., Bonnomet V., 2004.** *Devenir et comportement des métaux dans l'eau: biodisponibilité et modèles BLM.* Rapport Technique-INERIS. Paris, INERIS. Paris. 85 p.

**Levet D., 2008.** *Guide pratique des substances toxiques dans les eaux douces et littorales du bassin Seine-Normandie.* Paris, Editions AESN, pp. 30-35.

**N'Guessan Y.M., 2008.** *Dynamique des éléments traces dans les eaux de surface des bassins versants agricoles de Gascogne.* Thèse pour le grade de Docteur de l'Université de Toulouse en Agrosystèmes, Ecosystèmes et Environnement, délivrée par l'Institut Polytechnique de Toulouse (INPT), Toulouse, pp 10-15.

**Pacyna J.M., Pacyna E.G, Aas W., 2009.** Changes of emissions and atmospheric deposition of mercury, lead, and cadmium. *Atmospheric environment* , n°43, pp. 117-127.

**Robert M., 1996.** Différents types de transfert du sol vers les hydrosystèmes : dissous ou particulaire, latéral ou vertical. Chapitre 1. In : Le Coz C., Tassin B., Thévenot D. (Ed.), *Transfert des polluants dans les hydrosystèmes.* Paris, Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées, pp. 13-14.

**Roustan Y., 2005.** *Modélisation de la dispersion atmosphérique du mercure, du plomb et du cadmium à l'échelle européenne.* Thèse pour le grade de docteur de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées Spécialité : Sciences et techniques de l'environnement, Paris, pp 9-17.

**SOGREAH, 2007,** *Bilan des flux de contaminants entrant sur les sols agricoles de France métropolitaine. Bilan qualitatif de la contamination par les éléments tracés métalliques et les*

*composés tracés organiques et application quantitative pour les éléments tracés métalliques- Rapport final.* ADEME. Angers. 330 p.

**UNIFA, 2005.** *Consultation de réglementation cadmium dans les engrais*, UNIFA. Disponible sur Internet : [http://ec.europa.eu/enterprise/newsroom/cf/getdocument.cfm?doc\\_id=2995](http://ec.europa.eu/enterprise/newsroom/cf/getdocument.cfm?doc_id=2995), [consulté le 03/10/2010].

**Zielonka U., Krupanek J., Suschka J., Worsztynowicz A., Dzialoszynska-Wawrzekiewicz M., 2009.** *An Inventory and assessment of options for reducing emissions: Cadmium.* SOCOPSE Source Control of Priority Substances in Europe. Stockholm, SOCOPSE. pp 4 -18.

# ANNEXES

Caractéristique	Concentration
<b>Toxicité</b>	
DL50 orale métal	rat 2,3 g/kg pc souris 890 mg/kg pc
sel solubles	30 mg/kg pc
sulfure Cd	5000 mg/kg pc
Toxicité sublétales	
DJA (OMS)	
DHA (JEFCA)	7 µg/kg pc / sem.
<b>Ecotoxicité</b>	
CE50 poissons	0,9 µg/L
NOEC Truite 50-60 j	3,8 µg/L
PNEC eau douce	0,05 à 2 µg/L selon dureté
PNEC eau marine	0,2 µg/L
PNEC sédiment	2300 µg/kg ps
<b>Normes et seuils</b>	
Bruit de fond (BF sédiments)	200-350 µg/kg ps
NQEp (eaux surface)	BF eau +0,08 à 0,25 µg/L suivant dureté (*)
NQEp eaux de transition	BF eau +0,2 µg/L (*)
NQEp eaux côtières	BF eau +0,2 µg/L (*)
Limite qualité eau potable	5 µg/L
Baignade et loisirs	néant
Chair coquillages filtreurs	1 mg Cd/kg p.f.
Chair poissons et crustacés	0,5 mg Cd/kg p.f.
Norme sols	2 mg/kg ps
Norme boues	10 mg/kg ps
Qualité sédiments	N1 1,2 mg/kg ps N2 2,4 mg/kg ps S1 2 mg/kg ps
Rejets industriels	0,2 mg/L

Tableau 5: Données toxicologiques et normes pour le cadmium. (Levet, 2008)

<b>Compartment</b>	<b>Sources</b>	<b>Importance</b> [% of total Cd emissions to the atmosphere in Europe, 2000]
<b>Air</b>	Combustion of fossil fuels	44.3
	Cement production	Low emissions
	Primary (smelters) non-ferrous metal production pyrometallurgical zinc production, pyrometallurgical copper production, pyrometallurgical lead production	19.3
	Secondary non-ferrous metal production	Low emissions
	Iron and steel production, including coke production pig iron production, steel production (various technologies), coke production	13.7
	Major uses of cadmium in production and consumption	Low emissions
	Waste disposal: incineration of municipal wastes, incineration of hazardous wastes	3.4
	Road transport and Other mobile sources and machinery	Very low
	Phosphate fertilizer production	Low
<b>Compartment</b>	<b>Sources</b>	<b>Importance</b> [% of total Cd emissions to the land in Europe, 2000]
<b>Land</b>	Land-filling of various food and agriculture wastes	11
	Land-filling of urban refuse	25
	Municipal sewage sludge agricultural application	Low
	Disposal of wastes from various manufacturing processes except food	5
	Disposal of fly ash and bottom ash from power plants and waste incineration	30
	Wastage of commercial products on land	5
	Atmospheric deposition to terrestrial ecosystems	13
	Fertiliser use	10
<b>Compartment</b>	<b>Sources</b>	<b>Importance</b> [% of total Cd emissions to the water in Europe, 2000]
<b>Water</b>	<i>Direct emissions</i>	
	Domestic Waste disposal – waste treatment plants central WWTP non-central WWPT	20
	Combustion of fossil fuels, incl. cooling tower waters	Low contribution
	Base metal mining and dressing	Low
	Primary non-ferrous metal production – hydrometallurgical technology	20
	Iron and steel production	Low
	Manufacturing processes metals, chemicals, petroleum products	25
	Major uses of cadmium	Low
	Road transport and other mobile sources and machinery	Very low
	Agriculture related sources	very low
	Atmospheric deposition to European seas and their catchments	25
Sediment re-suspension	Probably low	

Tableau 6: Emissions des principales sources de cadmium en Europe, en 2000, vers l'atmosphère, le sol et l'eau (Zielonka et al., 2009)

Eaux du large	Atlantique	20-35	Nriagu (1980)	
	Pacifique	80-110	"	
Eaux de surface	Arctique	7-33	Cossa & Lassus (1989)	
	Atlantique	0,2-16	"	
	Pacifique	3-67	"	
Eaux côtières et estuaires	Baie de Marennes-Oléron	13-23	Gonzalez <i>et al.</i> (1991b)	
	Gironde	10-393	Elbaz-Poulichet <i>et al.</i> (1987), Boutier <i>et al.</i> (1989)	
	Loire	11-61	Boutier <i>et al.</i> (1993)	
	Rhône	48 (moyenne)	Elbaz-Poulichet <i>et al.</i> (1987)	
	La Seine:	à Poses	5-73	Cossa <i>et al.</i> (1994)
		l'estuaire <sup>(1)</sup>	5-202	J.-F. Chiffolleau (communication personnelle)
		Escaut	450 (maximum)	Valenta <i>et al.</i> (1986)
	Hudson	618 (maximum)	Klinkhammer & Bender (1981)	
Eaux interstitielles	Saint-Laurent	6-582	Gobeil <i>et al.</i> (1987)	
	Fjord	< 10	Westerlund <i>et al.</i> (1986)	
	Pacifique équatorial	112-267	Klinkhammer <i>et al.</i> (1982)	
	Marge californienne	12-280	McCorle & Klinkhammer (1991)	
	Baie de Marennes-Oléron	4-170	Gonzalez (1992)	
	Vasière Ouest-Gironde	60-400	"	

(1) Ensemble des campagnes réalisées dans le cadre du programme Seine-Aval.

**Tableau 7: Les concentrations en Cadmium (ng/l) dans les phases dissoutes (Gonzalez et al., 2009)**

Sédiments	Teneur moyenne (sédiments marins)	0,2	Chester & Aston (1976)
	Baie de Marennes-Oléron	0,19-0,41	Gonzalez <i>et al.</i> (1991b)
	Seine <sup>(1)</sup>	0,5-10	
Matières en suspension	Gironde	0,24-0,46	Boutier <i>et al.</i> (1989)
	Loire	0,4-1,53	"
	Seine <sup>(2)</sup>	0,3-7,2	J.-F. Chiffolleau (communication personnelle)
	Baie de Marennes-Oléron	0,32-1,15	Gonzalez <i>et al.</i> (1991b)
	Rhin	32 (moyenne)	Van der Weijden & Middelburg (1989)
	Saint-Laurent	2,2	Cossa & Poulet (1978)
	Matériel d'origine planctonique	20	Martin & Broenkow (1975)

(1) Cellule antipollution de la Seine; (2) Ensemble des campagnes réalisées dans le cadre du programme Seine-Aval.

**Tableau 8: Les concentrations en Cadmium (µg/l) dans les phases particulières (Gonzalez et al., 2009)**

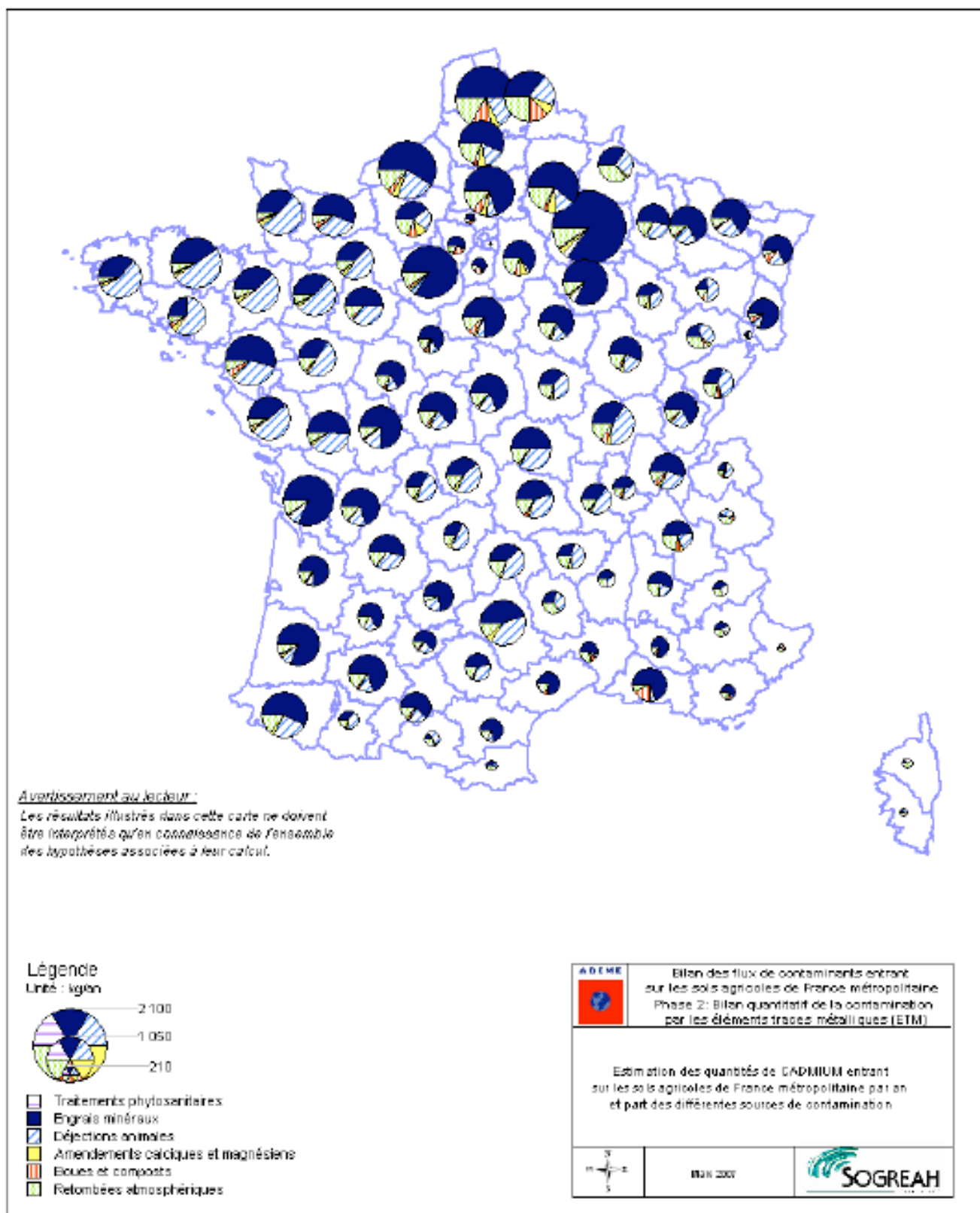


Figure 7: Estimation des quantités de Cadmium entrant sur les sols agricoles de France Métropolitaine par an et en fonction des différentes sources de contamination (SOGREAH, 2007)

		<b>Sources</b>					
		Iron & steel production	Non-ferrous metals	Phosphates fertiliser	Chemical industry	Uses	Air deposition
		<i>Source control</i>					
<b>Measures</b>	Recycling and reuse	X	X	X	X	X	
	Pre-treatment of waste water from technological process	X	X	X	X		
	Run off management	X	X	X	X	X	
	Low Cd phosphate rock			X			
	Cd removal from phosphate			X			
	Cd substitution electroplating					XP	X
	Battery and cells substitution					XP	
	Curbing emissions to the air	X	X				X
		<i>End-of-pipe</i>					
<b>Water Basic</b>	Optimisation of basic wastewater treatment <sup>35</sup>	X	X	X	X	X	
	Ion exchange	X	X	X	X		
	Sorption Active carbon				X	X	
<b>Water additional</b>	Membrane filtration		X	X	X		
	Nanofiltration				X	X	
	Electrochemical techniques				X		

Note: X = available measure, P- potential

Tableau 9: Tableau des principales activités pouvant baisser leurs émissions de cadmium dans l'environnement (Zielonka et al., 2009)



Measure / source	Assessment				Remarks evaluation
	Technical feasibility	Performances	Costs	State of the art	
<b>Source control</b>					
Recycling and reuse (ferrous and non-ferrous industries)	<i>Total score: +</i> <i>Pol.: point source</i> <i>Cmp.: high</i> <i>Imp.: low</i> <i>Lim.: specific processes</i>	<i>Total score: ++</i> <i>Eff.: high</i> <i>En.: low</i> <i>CE: low</i> <i>W: low</i>	<i>Total score: ++?</i> <i>IC: medium</i> <i>OC: medium</i>	<i>Total score: ++</i> <i>S: BAT</i> <i>App: large</i>	low
Pre-treatment of wastewater from technological process	<i>Total score: ++</i> <i>Pol.: point source</i> <i>Cmp.: high</i> <i>Imp.: medium</i> <i>Lim.: low</i>	<i>Total score: ++</i> <i>Eff.: high</i> <i>En.: medium</i> <i>CE: medium</i> <i>W: medium</i>	<i>Total score: +?</i> <i>IC: high</i> <i>OC: medium</i>	<i>Total score: ++</i> <i>S: BAT</i> <i>App: large</i>	- moderate on global scale. In some cases high on local level
Run-off management	<i>Total score: +</i> <i>Pol.: diffuse</i> <i>Cmp.: medium</i> <i>Imp.: low</i> <i>Lim.: no</i>	<i>Total score: ++</i> <i>Eff.: medium</i> <i>En.: no</i> <i>CE: no</i> <i>W: no</i>	<i>Total score: +</i> <i>IC: high</i> <i>OC: low</i>	<i>Total score: ++</i> <i>S: BAT</i> <i>App: large</i>	- moderate on local level
Low Cd phosphate rock	<i>Total score: +</i> <i>Pol.: point source and diffuse</i> <i>Cmp.: no</i> <i>Imp.: no</i> <i>Lim.: high limited Cd phosphate rock</i>	<i>Total score: +</i> <i>Eff.: high</i> <i>En.: no</i> <i>CE: + transport issue</i> <i>W: no</i>	<i>Total score: +</i> <i>IC: no</i> <i>OC: depends on market limitation</i>	<i>Total score: -</i> <i>S: Emerging</i> <i>App: low</i>	- low on global scale moderate on local/regional scale
Cadmium removal from phosphate	<i>Total score: -</i> <i>Pol.: point source and diffuse</i> <i>Cmp.: high</i> <i>Imp.: high</i> <i>Lim.: technical limitations</i>	<i>Total score: -</i> <i>Eff.: high</i> <i>En.: high</i> <i>CE: air pollution</i> <i>W: medium</i>	<i>Total score: -</i> <i>IC: high</i> <i>OC: medium</i>	<i>Total score: -</i> <i>S: Emerging</i> <i>App: a few</i>	- low moderate on local/regional scale
Cadmium substitution electroplating	<i>Total score: +</i> <i>Pol.: point source</i> <i>Cmp.: medium</i> <i>Imp.: high</i> <i>Lim.: depends on product</i>	<i>Total score: +</i> <i>Eff.: high</i> <i>En.: ?</i> <i>CE: other pollutant</i> <i>W: no</i>	<i>Total score: +</i> <i>IC: high</i> <i>OC: medium</i>	<i>Total score: -</i> <i>S: Emerging</i> <i>App: a few?</i>	- low, locally high
Battery and cells substitution	<i>Total score: ++</i> <i>Pol.: point source</i> <i>Cmp.: no</i> <i>Imp.: no</i> <i>Lim.: restrictions</i>	<i>Total score: +</i> <i>Eff.: medium</i> <i>En.: no</i> <i>CE: other pollutant</i> <i>W: low</i>	<i>Total score: +</i> <i>IC: medium</i> <i>OC: medium</i>	<i>Total score: ++</i> <i>S: Required in common goods</i> <i>App: large</i>	- low high only for large municipal landfill sites

Tableau 10: Possibilités des principales activités émettant du cadmium dans l'environnement à baisser leurs émissions. (Zielonka et al., 2009)

<i>End of pipe</i>					
Optimisation of basic wastewater treatment <sup>2</sup>	<i>Total score:</i> ++ <i>Pol.:</i> point source <i>Cmp.:</i> low <i>Imp.:</i> low <i>Lim.:</i> no	<i>Total score:</i> + <i>Eff.:</i> > 95% <i>En.:</i> medium <i>CE:</i> need chemicals use <i>W:</i> medium	<i>Total score:</i> + <i>IC:</i> high <i>OC:</i> low	<i>Total score:</i> ++ <i>S:</i> BAT <i>App:</i> large	- moderate on regional/local scales
Ion exchange	<i>Total score:</i> ++ <i>Pol.:</i> point source <i>Cmp.:</i> low <i>Imp.:</i> low <i>Lim.:</i> depends on effluence quality	<i>Total score:</i> + <i>Eff.:</i> > 99% <i>En.:</i> medium <i>CE:</i> low <i>W:</i> medium	<i>Total score:</i> ++ <i>IC:</i> medium <i>OC:</i> low	<i>Total score:</i> ++ <i>S:</i> BAT <i>App:</i> ?	- moderate/low high in site/plant specific circumstances
Membrane filtration	<i>Total score:</i> ++ <i>Pol.:</i> point source <i>Cmp.:</i> low <i>Imp.:</i> low <i>Lim.:</i> depends on effluence quality	<i>Total score:</i> + <i>Eff.:</i> > 99% <i>En.:</i> medium <i>CE:</i> low <i>W:</i> low	<i>Total score:</i> + <i>IC:</i> medium <i>OC:</i> low	<i>Total score:</i> ++ <i>S:</i> BAT <i>App:</i> ?	- low/moderate high in local contexts site-specific situation high
Electrochemical techniques	<i>Total score:</i> ++ <i>Pol.:</i> point source <i>Cmp.:</i> no <i>Imp.:</i> no <i>Lim.:</i> depends on effluence quality	<i>Total score:</i> + <i>Eff.:</i> > 99% <i>En.:</i> medium <i>CE:</i> low <i>W:</i> low	<i>Total score:</i> + <i>IC:</i> medium <i>OC:</i> low	<i>Total score:</i> ++ <i>S:</i> BAT <i>App:</i> ?	- low - moderate in specific applications on local scale

Note: *Pol.* = Type of pollution; *Lim.* = Limits and restrictions; *Cmp.* = Complexity of implementation; *Imp.* = Impact on the process, on the factory; *Eff.* = Efficiency of emission reduction; *Oth.* = Removal of other pollutants; *En.* = Consumption of energy; *CE* = Cross-effects; *W* = Production of waste; *IC* = Investment costs; *OC* = Operational costs; *St* = Status of the technique (BAT, existing, emerging); *App.* = Number of applications.

Tableau 11: Suite du tableau 10 sur les possibilités des principales activités émettant du cadmium dans l'environnement à baisser leurs émissions. (Zielonka et al., 2009)



Figure 8: Présentation du bassin versant de la Charente (EPTB, 2003)

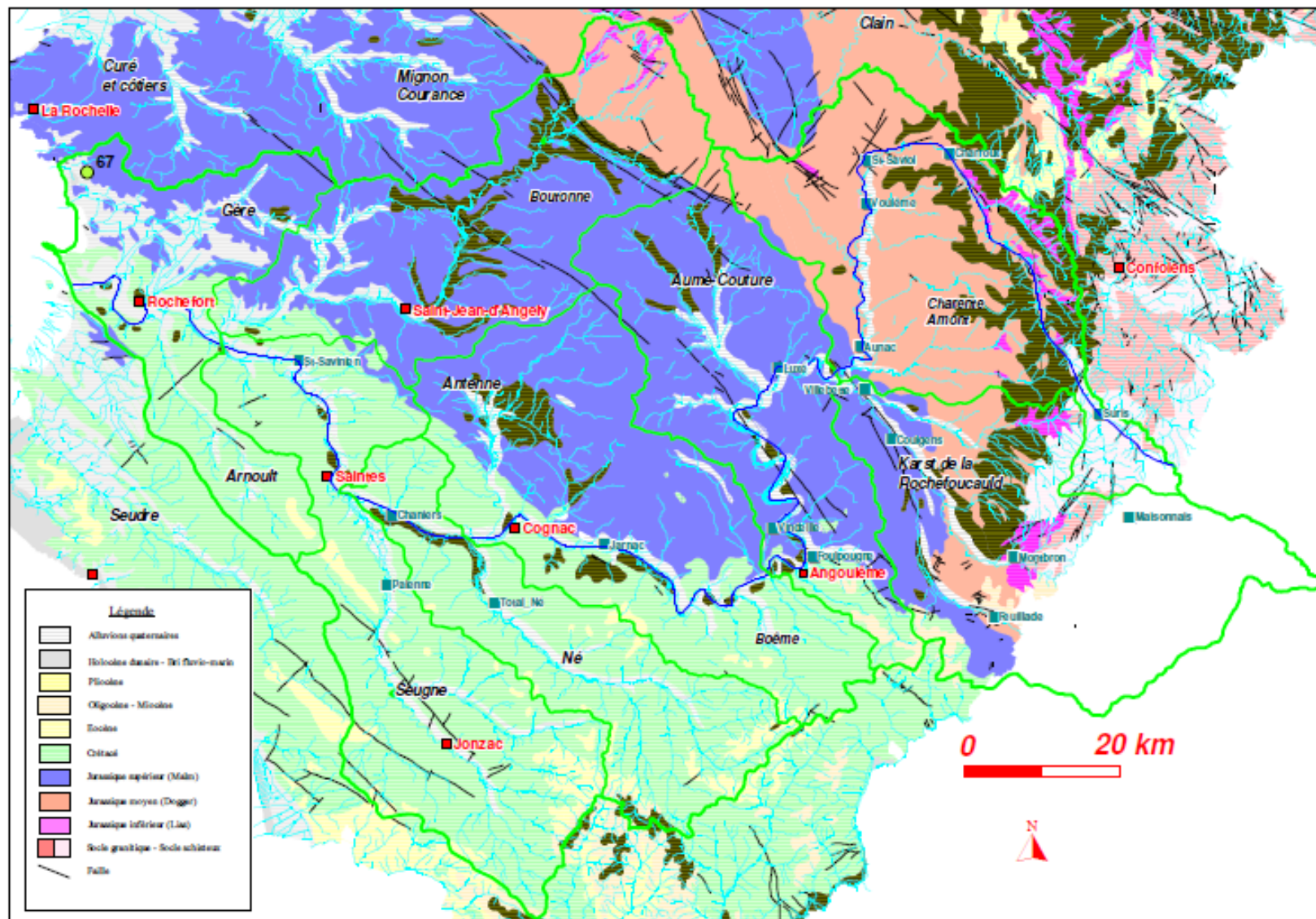


Figure 9: Carte géologique du bassin versant de la Charente (géologie sur la partie en Poitou-Charentes uniquement) (Bichot et al., 2008)

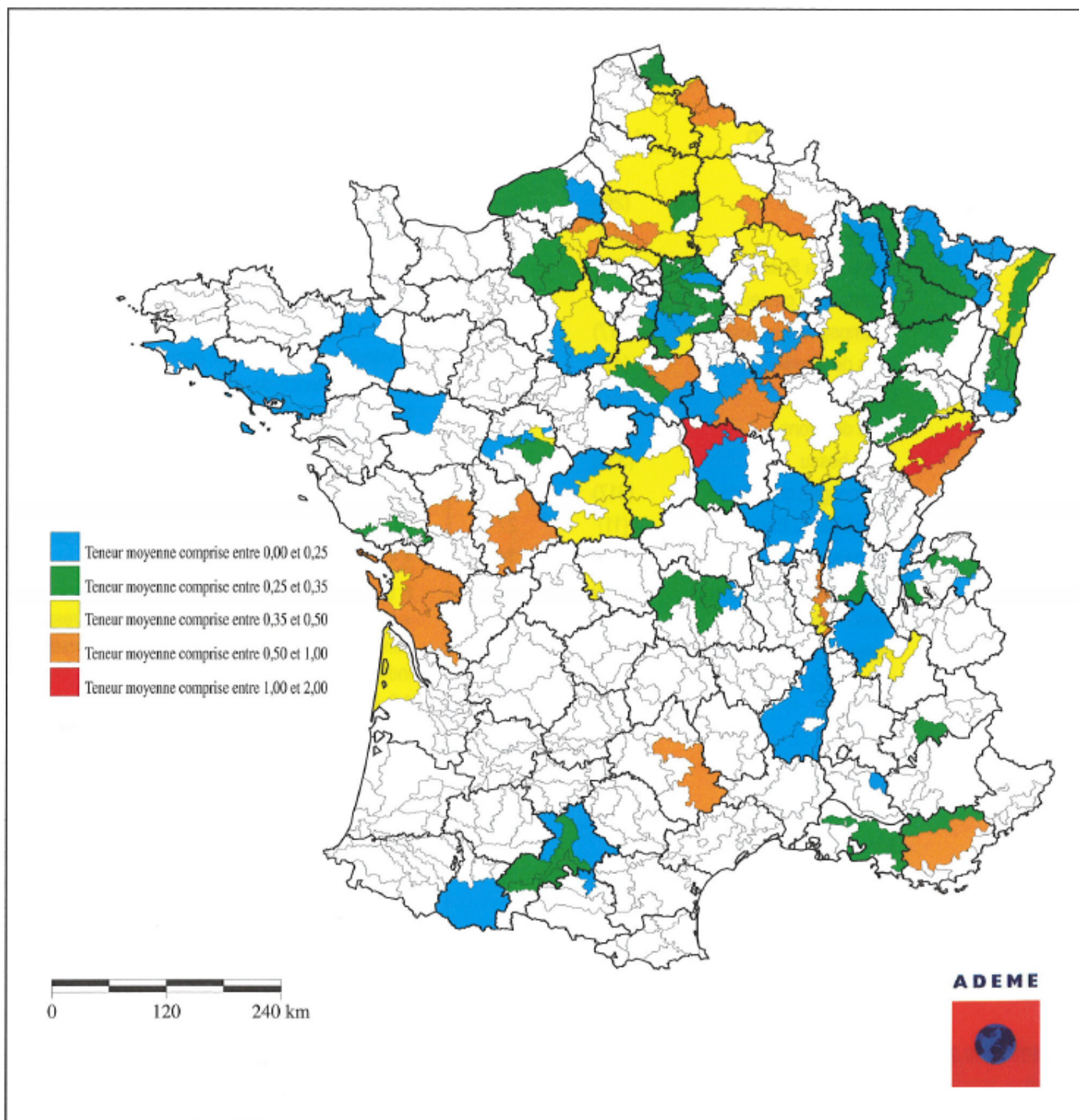


Figure 10: Cartographie des départements concernés par l'étude de l'ADEME sur les anomalies des teneurs en cadmium dans les sols de France (Baize et al., 2005)

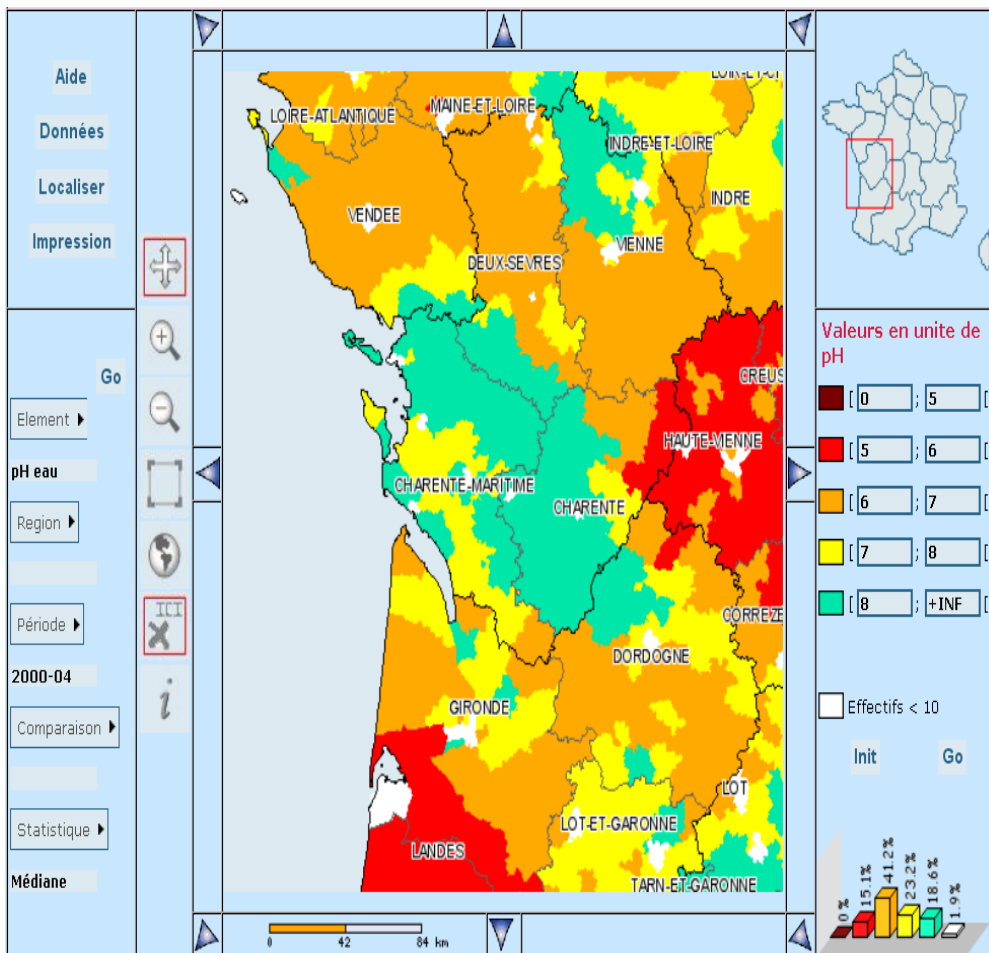


Figure 11: Valeurs du pH du sol dans le secteur du bassin versant de la Charente (Groupement d'intérêt scientifique Sol, 2010)



**ENGREF**  
**Centre de Montpellier**  
**648 rue Jean-François Breton – BP 7355**  
**34086 MONTPELLIER CEDEX 4**  
**Tél. : (33) 4 67 04 71 00**  
**Fax : (33) 4 67 04 71 01**  
[www.agroparistech.fr](http://www.agroparistech.fr)

 <p><b>ONEMA</b> Office national de l'eau et des milieux aquatiques</p> <p><sup>4</sup> <b>Onema</b> <b>Hall C – Le Nadar</b> <b>5 square Félix Nadar</b> <b>94300 Vincennes</b> <b>01 45 14 36 00</b> <a href="http://www.onema.fr">www.onema.fr</a></p>	 <p><b>LES AGENCES DE L'EAU</b> ETABLISSEMENTS PUBLICS DU MINISTERE EN CHARGE DU DEVELOPPEMENT DURABLE</p> <p><a href="http://www.lesagencesdeleau.fr">www.lesagencesdeleau.fr</a></p>	 <p><i>Office International de l'Eau</i> <b>Office International de l'Eau</b> <b>CNIDE</b> <b>15 rue Edouard Chamberland</b> <b>87065 LIMOGES</b> <b>05 55 11 47 80</b> <a href="http://www.oieau.fr">www.oieau.fr</a></p>
--	---	---