

Cycle de vie du plomb dans l'anthroposphère Seine

Cécile Goiffon¹, Laurence Lestel¹, Jean-Marie Mouchel².

¹CDHTE-CNAM, Paris,

²CEREVE, ENPC-Champs sur Marne,

1.	Introduction	1
2.	Résultats des études spécifiques.....	1
2.1.	Sources de données	1
2.2.	Produits manufacturés : appareils à tube cathodique (ATC).....	2
2.2.1	Le tube cathodique :	2
2.2.2	Cycle de vie des ATC.....	3
2.2.3	La fin de vie des ATC	5
2.2.4	Circulation du plomb dans les ATC	10
2.3.	Déchets	10
2.3.1	Composition et quantités des ordures ménagères.....	10
2.3.2	Quantité de plomb dans les déchets.....	11
2.3.3	Filières de traitement	12
2.3.4	Circulation du plomb dans les OM incinérées.....	17
3.	Modèle.....	17
4.	Conclusion et perspectives	19
5.	Bibliographie :	19

1. Introduction

Pour optimiser le fonctionnement du modèle de circulation du plomb dans l'anthroposystème Seine, il était nécessaire de compléter les données déjà acquises les années précédentes (Bouzidi 2003) par des études singulières.

Tout d'abord seront rapportés les résultats des études spécifiques qui ont été menées pour mieux cerner les flux de plomb contemporains, notamment des objets manufacturés. Nous détaillerons le cycle des appareils à tubes cathodiques (ordinateurs, téléviseurs et Minitel) depuis les années 1970 puis nous décrirons la mise en place de la filière de valorisation de ces appareils en fin de vie, en distinguant les appareils provenant des ménages et ceux provenant des circuits professionnels. Une autre étude a porté sur les ordures ménagères (OM), pour lesquelles ont été recherchées les données concernant la quantité de déchets produite, leur composition, leur teneur en plomb et leur traitement (incinération, traitement biologique, mise en centre d'enfouissement technique CET).

Ensuite seront présentés les résultats de la modélisation de l'accumulation séculaire du plomb en France après intégration de ces nouvelles données. Nous montrerons à titre d'exemples quelques schémas d'évolution des stocks de plomb et des fuites de plomb vers l'environnement, notamment ceux liés aux aspects cumulatifs de la circulation du plomb.

2. Résultats des études spécifiques

2.1. Sources de données

Pour les données contemporaines, la source d'information la plus riche se situe dans le fond documentaire de l'ADEME. Outre les renseignements mis en ligne sur son site Internet, nous avons utilisé de nombreux documents concernant les déchets : les quantités produites, la composition, la teneur en plomb, les types de traitements (incinération, traitement biologique, mise en centre d'enfouissement technique) ; ainsi que ceux concernant les appareils à tube cathodique (modes de collecte, filières de traitement, de valorisation). Ces documents sont des rapports de colloque, des

études des modes de collecte des déchets, des analyses de filières de traitement, de valorisation, des synthèses de données existantes, etc.

Des données sur les importations et les exportations de produits spécifiques contenant du plomb sont disponibles au Service Statistique des Douanes. Des *Annuaire statistiques du commerce extérieur de la France* sont consultables de 1913 à nos jours (ceux de la Première Guerre Mondiale sont manquants).

Diverses statistiques (taux d'équipement des ménages en téléviseurs et ordinateurs, populations françaises, par région, etc.) sont rapportées dans les *Annuaire Statistiques du Ministère de l'Economie et des Finances (Annuaire statistiques de la France de l'INSEE)*.

2.2. Produits manufacturés : appareils à tube cathodique (ATC)

Les ATC sont les téléviseurs, les moniteurs d'ordinateurs et les Minitels. Il existe trois grandes générations de tubes cathodiques (Guy, 1997) :

- Le verre noir&blanc, baryum-plomb dont la teneur en PbO est de 0 à 2%.
- La dalle couleur, baryum-strontium dont la teneur en PbO est de 0 à 2,2%.
- Le cône couleur, plomb dont la teneur en PbO est de 10,5 à 24%.

Les tubes cathodiques contenant le plus de plomb sont ceux des téléviseurs couleurs, qui sont apparus au sein des ménages au début des années 70. Il existe par ailleurs des ordinateurs noirs&blancs et couleurs. Seuls ces derniers nous intéressent. En 1997, ils représentaient 24% des ordinateurs arrivés dans un centre de démantèlement (Guy 1997). Nous ne connaissons pas ce pourcentage pour les années plus récentes.

Le Tableau 1 présente les poids, quantité d'oxyde de plomb (PbO), durées de vie des micro-ordinateurs et téléviseurs utilisés dans notre étude.

Tableau 1 : Données utilisées dans cette étude sur les ATC.

	Poids d'un poste (kg)	Pourcentage massique du tube dans un poste	Pourcentage massique de PbO dans un tube cathodique couleur	Durée de vie (ans)
Ordinateurs	20	40%	Environ 8% → 0,64 kg	5
Téléviseurs	28	50%	Environ 8% → 1,12 kg	12

On a donc 8% en poids de plomb dans un tube cathodique, soit 4% de plomb dans un poste d'où 1,12kg de plomb pour un téléviseur de 28kg.

2.2.1 Le tube cathodique :

Le tube cathodique est constitué à 83% de verre (Figure 1).

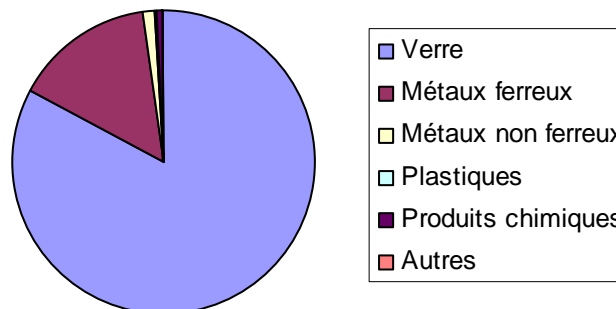


Figure 1 : Composition d'un tube cathodique de 66 cm de diagonale (Rochet et al., 1998)

Il se présente comme une enceinte en verre avec une face plate à l'avant terminée par un cône à l'arrière. L'enceinte se compose de trois éléments : la dalle plate à l'avant, le cône à l'arrière et le col à l'arrière du cône dans lequel prend place le canon électronique (Figure 2). La majeure partie du plomb d'un tube cathodique se situe dans le cône couleur. En 1997, la composition d'un cône est définie par les verriers de la CEE à 22,5+/-1,1% d'oxyde de plomb (Mocek, 1997).

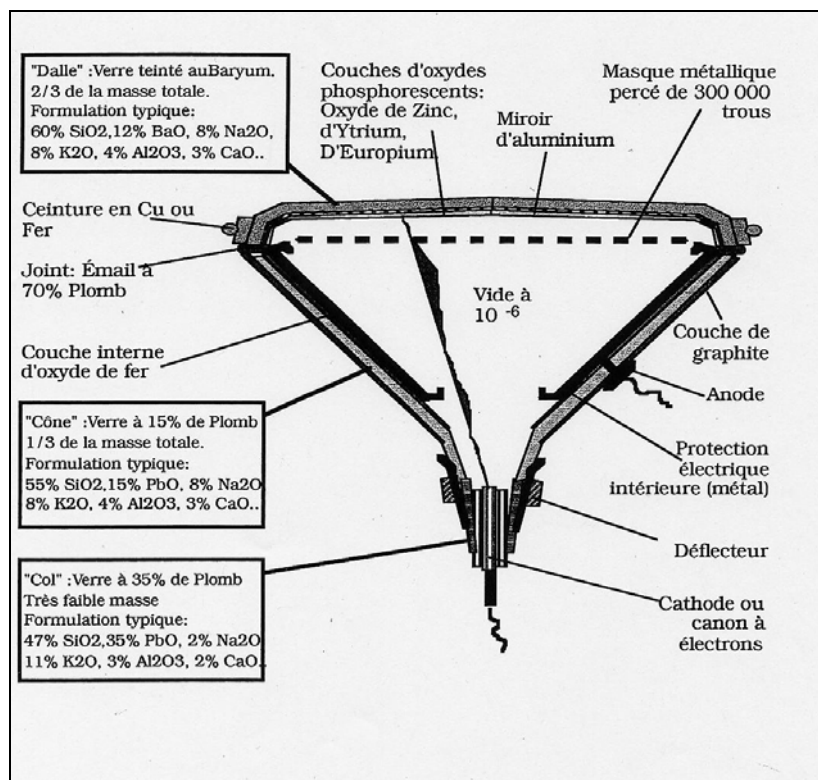


Figure 2 : Schéma d'un tube cathodique couleur (Guy, 1997)

Tableau 2 : Pourcentages massiques d'oxyde de plomb dans les tubes cathodiques couleurs (Guy, 1997)

	Verre du tube	Pourcentage massique de PbO
Dalle couleur	2/3	0 – 2,2
Cône couleur	1/3	10,5 – 24
Col couleur	ε	35

2.2.2 Cycle de vie des ATC

Le cycle de vie des ATC a été étudié depuis leur sortie de l'usine jusqu'à leur devenir environnemental (Figure 3). Les imports/exports des téléviseurs couleurs, des moniteurs d'ordinateurs et des tubes cathodiques ont été renseignés par les *Annuaire statistiques du commerce extérieur de la France* de 1988 à nos jours. 1988 étant la première année pour laquelle ces produits entrent dans les statistiques. En ce qui concerne les fabrications de postes et de tubes, nous ne possédons pas encore les données correspondantes. Afin de déterminer le stock des tubes en usage, des statistiques d'équipement des ménages en téléviseur couleur et ordinateurs ont été utilisées. Ces chiffres sont inférieurs à la réalité ; en effet, certains ménages possèdent plusieurs postes de télévision et certaines résidences secondaires sont équipées de téléviseurs. Il a été envisagé d'employer les données du Service de Redevance. Néanmoins ces chiffres sont sujets à caution de part le nombre de téléviseurs en fonctionnement non déclarés. Dans les faits, le nombre de téléviseurs couleurs correspondant au nombre de comptes payant la redevance est inférieur à celui calculé grâce au taux d'équipement des ménages

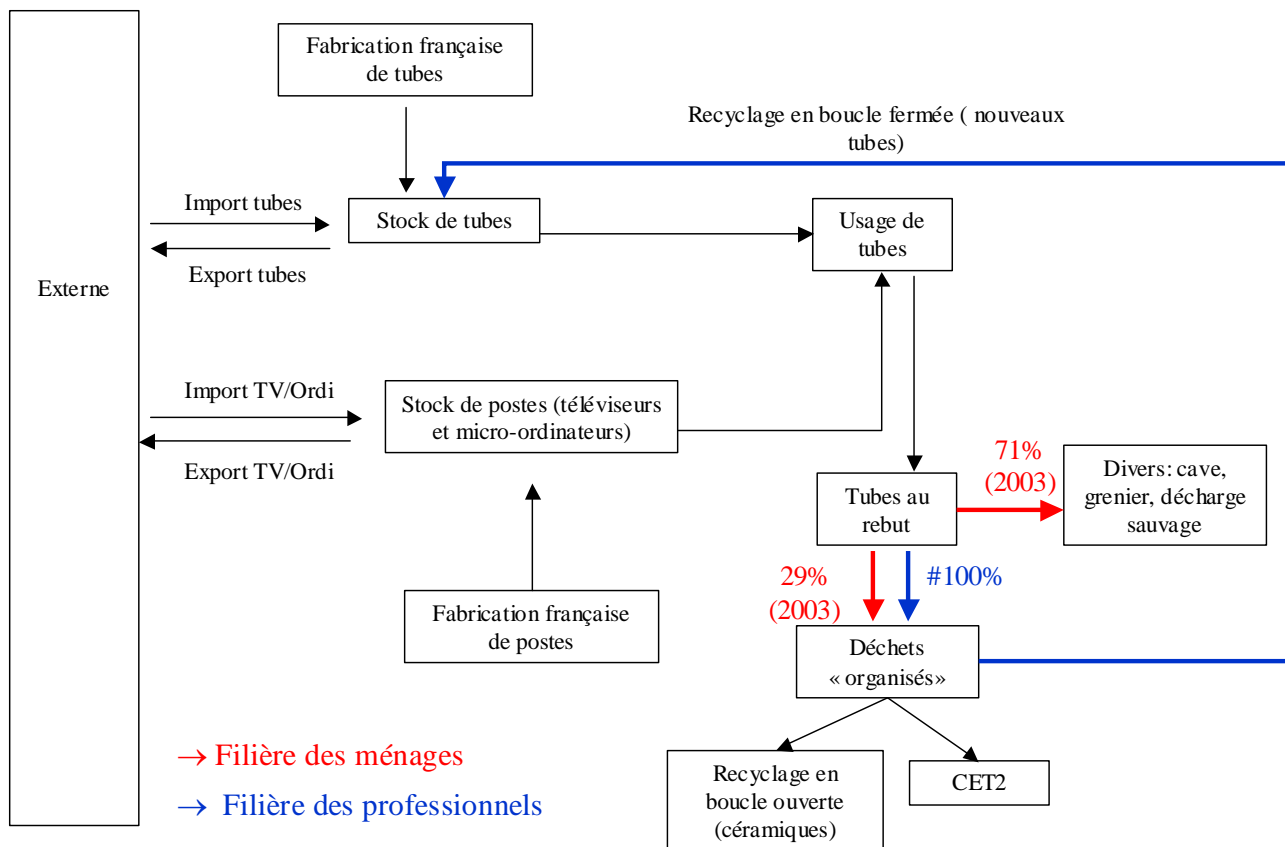


Figure 3 : Cycle de vie des ATC

La Figure 4 représente la courbe des usages d'ATC. Celle-ci augmente au cours du temps. On peut s'attendre prochainement à une diminution de ce stock de part l'utilisation croissante d'écrans plats. Les plateaux correspondent à des valeurs manquantes actuellement. Des valeurs moyennes ont été mises à leur place.

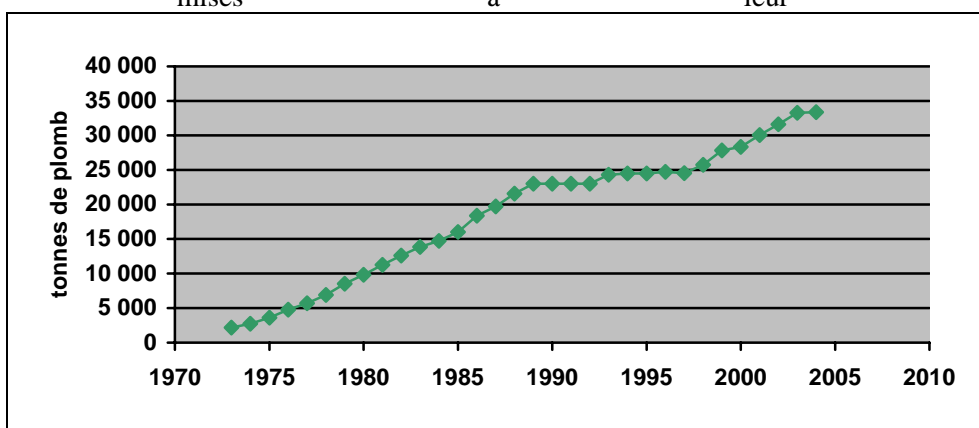


Figure 4 : Courbe de la quantité de plomb en usage dans les ATC en fonction du temps.

Pour constituer le stock de déchets, on a calculé la mise au rebut comme étant le rapport entre la quantité de postes en usage et la quantité de postes recensés effectivement parmi les déchets. Les ATC arrivant en fin de vie appartiennent à la catégories des Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques (DEEE). Les DEEE comprennent l'ensemble des appareils électroménagers (réfrigérateur, lave-linge, etc.), les produits de l'électronique (téléviseurs, etc.) et les produits d'information et de communication (ordinateurs, fax, etc.).

Suivant les résultats de Initiative Recyclage, étude de l'ADEME réalisant un bilan de deux ans de collecte des DEEE sur Nantes Métropole, les téléviseurs et les moniteurs représentent 15% du flux des DEEE. En 2003, les ménages et les professionnels français ont mis au rebut, principalement en décharge ou avec les ferrailles, quelques 1,7 Mt de produits électriques et électroniques (ADEME, 2004). En 2003, 868 milliers de tonnes de postes sont en usage soit une mise au rebut de 29%. Cette valeur semble un peu élevée, mais il s'agit d'une étude réalisée sur deux ans pendant laquelle les usagers d'appareils d'équipement électriques et électroniques ont été sensibilisés aux moyens de collecte des DEEE et apportaient donc sûrement plus volontairement leurs postes de télévision en déchetterie. Entre 1994 et 1998, la mise au rebut est comprise entre 2 et 9%. Le reste des appareils des ménages est stockés chez les particuliers ou déposés en décharge sauvage. Les filières des déchets des professionnels sont plus efficaces car bien organisées.

La courbe de mise au rebut des ATC augmente au cours du temps mais de façon plus lente que celle des usages d'ATC (Figure 5). De même que pour la Figure 4, les plateaux correspondent à des valeurs manquantes actuellement. La courbe de la Figure 5 est la même que la courbe de la Figure 4 affectée du coefficient de mise au rebut.

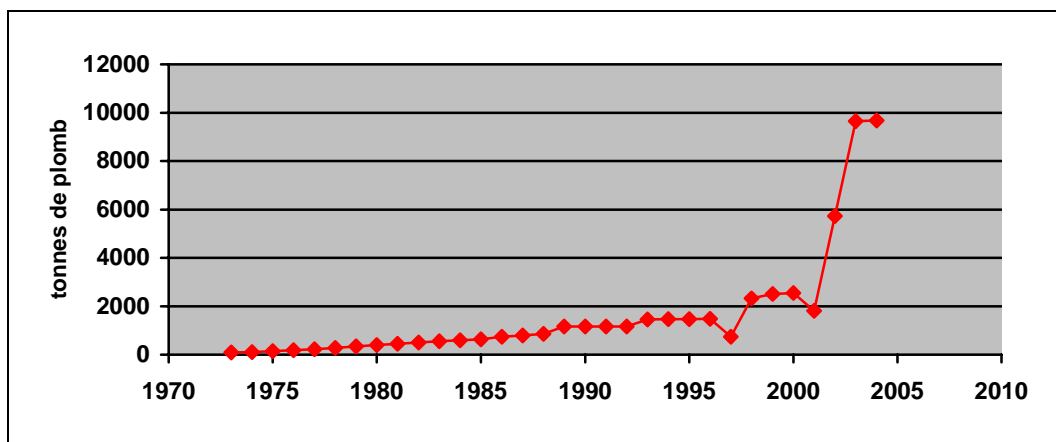


Figure 5 : Courbe de quantité de plomb mise au rebut en fonction du temps

2.2.3 La fin de vie des ATC

Ces appareils en fin de vie font partie des Déchets d'Équipement Électriques et Électroniques (DEEE). La transposition de la directive concernant les DEEE (Directive 2002/96/CE) doit intervenir en 2004 dans tous les États membres. Elle établit un taux de collecte des DEEE des ménages qui devra atteindre 4 kg/an/hab. et fixe des objectifs de valorisation. En ce qui concerne les appareils à tube cathodique un taux de valorisation de 70 % est fixé ; la Directive 2002/96/CE impose donc ainsi un retrait des tubes cathodiques des appareils les contenant. Il est donc nécessaire en vue de respecter cette directive de mettre en place des filières de valorisation des ATC des ménages, essentiellement.

La principale difficulté de ces produits est l'estimation de leur gisement. Ceci est dû entre autres à la durée de vie variable des appareils et des phénomènes de stockage très importants. La notion de « durée de possession » est très difficile à quantifier. C'est la période pendant laquelle le particulier conserve un produit sans l'utiliser, qu'il soit ou non en état de fonctionner (ce n'est pas un déchet puisque son détenteur ne le destine pas à l'abandon). Certains avancent qu'il pourrait y avoir plusieurs millions de postes de télévision en noir&blanc dans les « greniers ». De plus, la micro-informatique professionnelle termine souvent sa première vie en état de marche et peut donc connaître une seconde vie : certains appareils sont récupérés par des particuliers et retrouvent ainsi la filière des ATC des ménages et d'autres partent à l'étranger et n'entreront donc jamais dans la filière française de collecte et traitement des déchets. (Rochet et al., 1998).

À la différence des téléviseurs réputés être détenus pour l'essentiel par des ménages, la détention de micro-ordinateurs se ventile entre les professionnels (majoritairement) et les ménages. Cette distinction intervient de manière significative dans la conception et le rendement de systèmes de collecte ciblés sur les déchets ménagers (ADEME, 2001)

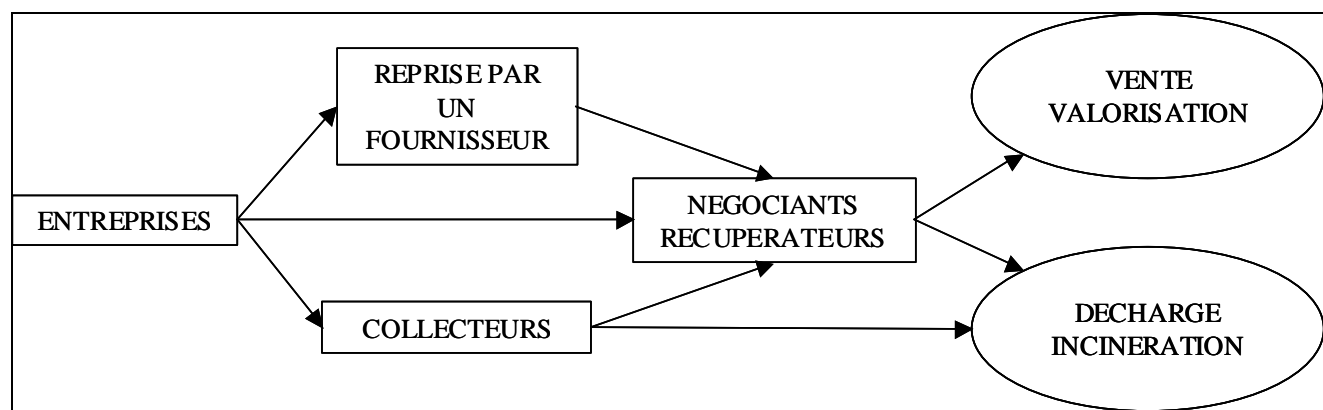
Les Minitel, quant à eux, étant la propriété d'un industriel unique sont, en théorie, ni conservés, ni éliminés par les ménages (certains appareils peuvent se retrouver par erreur dans le flux des déchets des ménages). France Télécom procède depuis la mise en service en France en 1982 des premiers Minitel, à leur recyclage grâce à une filière qui peut recycler tous leurs terminaux (WIKIPEDIA, 2005). France Télécom a annoncé récemment par le biais des factures téléphoniques qu'elle cédait à ses clients leurs Minitel de première génération à compter du 15 novembre 2004. Elle continuera néanmoins de reprendre dans ses agences les appareils au-delà de cette date (site Internet France Télécom, 2004). L'entreprise est accusée par les écologistes de se décharger d'un problème de gestion de déchets. Le Minitel a beau être technologiquement dépassé, il n'en reste pas moins un moyen répandu de consultation électronique des données avec près de 4 millions d'unités installées dont 2,4 millions de Minitel de première génération (TERRABILIS, 2004).

En 2001, les ATC provenant des ménages, repris à ces derniers par des collectivités locales ou par des distributeurs, sont à de très rares exceptions près entièrement éliminés en Centre d'Enfouissement Technique de classe II (CET2), sans opportunité de valorisation. Les micro-ordinateurs sont valorisés quand ils sont repris par leurs émetteurs sur le marché. Aujourd'hui dans les faits, les téléviseurs et les micro-ordinateurs en fin de vie sont considérés comme des déchets ultimes¹. Or il existe des sites de technologies de valorisation permettant de viser un taux de valorisation de 60 à 70% de l'appareil. Ces technologies, qui supposent une valorisation de la fraction verre des appareils, imposent dans tous les cas une séparation au minimum du tube cathodique et du reste (ADEME, 2001).

Devenir des ATC

En France, la majorité des ATC en fin de vie aboutit en CET2 ou est incinérée. Les circuits de récupération sont en effet peu structurés, incomplets et ne permettent en général que la valorisation de pièces ou de matériaux ayant une valeur marchande suffisamment intéressante.

Dans les cas des Produits Electriques et Electroniques en fin de Vie (PEEFV), dont font partie les ATC, issus des industriels, des taux de récupération relativement élevés peuvent être observés. En effet, pour des entreprises détenant des lots de PEEFV importants, plusieurs types de circuits sont mis en place : reprise par des fournisseurs, appel d'offres pour liquider des stocks ou encore fourniture de bennes par des récupérateurs. Quand les PEEFV sont repris par les fournisseurs, il existe trois grandes filières de traitement : la réutilisation (remise à niveau du matériel, reconfiguration ou reconditionnement avant réintroduction sur le marché), la réutilisation ou réemploi des pièces valides réinjectées dans la production ou commercialisées et la valorisation matière ou énergétique (Figure 6). Certains professionnels peuvent faire appel à des prestataires de service : sociétés de débarras, de déménagement, spécialisées dans le traitement des produits informatiques en fin de vie, ou bien faire des dons à des écoles ou au personnel. Le circuit d'élimination du produit dépend de son dernier détenteur (Guy-Schmid et al., 1998).



¹ Déchet ultime : déchet résultant ou non du traitement d'un déchet et qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux (loi n° 75-633 du 15 juillet 1975 modifiée par la loi n° 92-646 du 13 juillet 1992, relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux).

Figure 6 : Circuits d'élimination des PEEFV professionnels (Lanfranchi et al., 1995)

L'étude de Guy-Schmid (1998) a étudié les modes de collecte et les circuits d'élimination d'ATC en fin de vie et notamment les micro-ordinateurs des professionnels. La Figure 7 présente les modes d'élimination des micro-ordinateurs et la Figure 8 montre leur devenir. La fréquence de renouvellement du parc informatique varie entre 4 et 5,8 ans. 50% des micro-ordinateurs professionnels sont revendus d'occasion ou repris par les fournisseurs, 38% ont un devenir inconnu et 24% sont réutilisés en France.

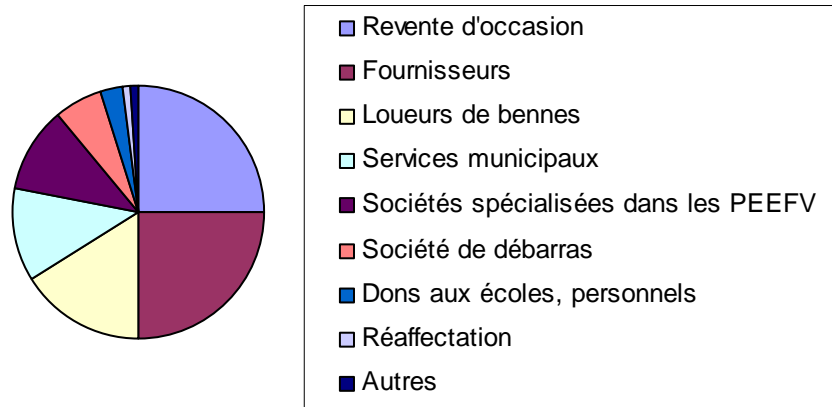


Figure 7 : Mode d'élimination des micro-ordinateurs des professionnels (Guy-Schmid et al., 1998)

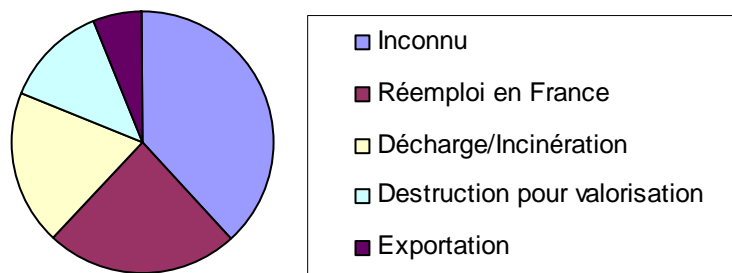


Figure 8 : Devenir des micro-ordinateurs des professionnels en sortie de parc informatique (Guy-Schmid et al., 1998)

Les PEEFV issus du grand public suivent le plus souvent le circuit des déchets ménagers encombrants (Figure 9). Les taux de récupération sont très faibles et les flux totalement mélangés. La collecte des PEEFV se fait au sein des collectivités par apport volontaire (benne, déchetteries fixes et/ou mobiles), porte-à-porte (à date fixe ou sur demande). Il existe des circuits parallèles (associations caritatives, récupérateurs, poubelles, etc.), des circuits de reprise par le distributeur ou des circuits d'élimination. Le choix des circuits est fait par les collectivités ou des prestataires des métiers du déchet.

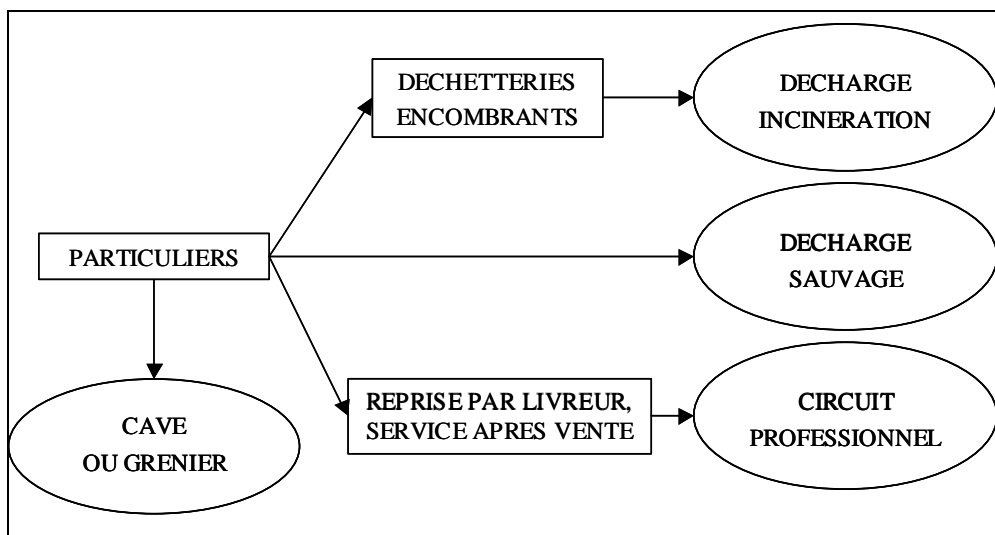


Figure 9 : Circuits d'élimination des PEEFV des ménages (Lanfranchi et al., 1995)

Il a été signalé un caractère aléatoire des quantités d'appareils collectés au cours de l'année. Il semble en effet difficile de définir des périodes cycliques régulières ; les apports en déchetteries ou le nombre d'appareils collectés en porte-à-porte semblent liés à des facteurs d'ordre socio-économique. Les quantités collectées semblent augmenter en période de promotion des grands magasins, en périodes de fête et à l'occasion d'événements d'actualité importants surtout sportifs (Guy-Schmid et al., 1998).

Les techniques de valorisation du tube cathodique

Il existe des techniques de valorisation du tube cathodique, mais il est nécessaire pour cela que les ATC entrent dans la filière de valorisation (Figure 10).

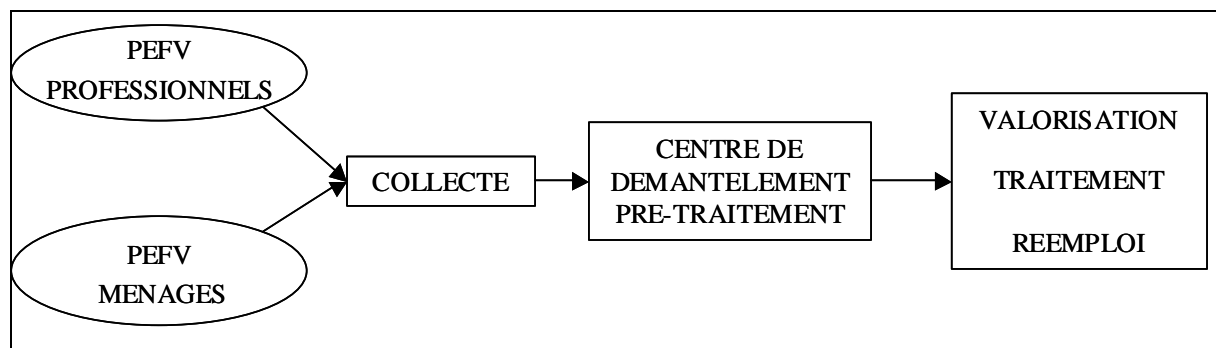


Figure 10 : Circuit schématique de la valorisation des PEEFV (Lanfranchi et al., 1995)

Lors de l'arrivée des ATC en centre de démantèlement, les tubes cathodiques sont extraits du poste. Cette extraction du tube cathodique est en général suivie du démontage des parties métalliques (le cuivre notamment) composant le déviateur et le canon (colloque ADEME 2004). Le traitement d'un tube consiste tout d'abord à le dépolluer par séparation des luminophores, puis à valoriser au mieux les différents verres qui le constituent (ADEME/ASCOMADE, 2003). Les études réalisées pour déterminer la meilleure façon de valoriser les tubes cathodiques se basent sur un même point : la séparation de la dalle et du cône.

Deux technologies de séparation de la dalle et du cône sont utilisées en France :

- les deux types de verre sont séparés par choc thermique ou découpe mécanique, ce qui permet l'aspiration des poudres lumineuses et la valorisation des deux types de verre. Plusieurs opérateurs utilisent cette technique, capable de traiter de l'ordre de 60 tubes cathodiques par heure au maximum.

- le tube est broyé en entier puis les différents verres sont séparés, les poudres étant récupérées par lavage.

Actuellement, certains sites en France valorisent les tubes cathodiques suivant ces deux méthodes. En 2001, ils étaient quatre (ADEME/TERRA, 2001) et en 2004, on en recense huit (ADEME/TERRA 2004).

Tableau 3 : Sites français de valorisation des tubes cathodiques (ADEME/TERRA 2001 et 2004)

ADEME/TERRA, 2001	ADEME/TERRA 2004
	APF Industrie Montpellier à Montpellier (Languedoc Roussillon, 34)
ECOSYNTHESE à Riom (Auvergne, 63)	DEMOTRONIC à Duppingueim (Alsace, 67) ECOSYNTHESE à Riom (Auvergne, 63)
PATE S.A. à Crouy (Picardie, 02)	MBM à Voivres les Le Mans (Pays de la Loire, 72) PATE FARRAIRE à Villeparisis (Ile-de-France, 77) PATE S.A. à Crouy (Picardie, 02)
TRIADE à Aubervilliers (Ile-de-France, 93)	REGAIN VALME ENVIRONNEMENT à Fourchambault (Bourgogne, 58)
VARRAY-PARISI S.A. à Castelnau le Lez (Languedoc-Roussillon, 34)	TRIADE ELECTRONIC à Gonesse (Ile-de-France, 95) : même filiale mais ne traite pas les tubes cathodiques VARRAY-PARISI S.A. à Castelnau le Lez (Languedoc-Roussillon, 34)

L'entreprise PATE S.A. à Crouy (Picardie, 02), exploite la technologie du « tube broyé en entier » ; elle dispose d'une capacité de plusieurs dizaines de milliers de tonnes et peut, à ce titre, absorber l'essentiel du gisement français (colloque ADEME, 2004).

Jusqu'en 2000, les tubes traités provenaient essentiellement des moniteurs de matériels informatiques d'origine professionnelle. L'application de la Directive 2002/96/CE, imposant un taux de valorisation de 70 % aux ATC, devrait conduire à décupler les capacités de traitement actuelles et inclure les appareils des ménages (ADEME/TERRA, 2001).

Le devenir du verre des tubes cathodiques

Les verres au plomb provenant des tubes cathodiques peuvent servir à fabriquer de nouveaux tubes cathodiques (recyclage en boucle fermée) ou bien il est possible de réutiliser ce verre dans d'autres applications (recyclage en boucle ouverte).

Le recyclage en boucle fermé est très spécifique. En effet, pour recycler en boucle fermée le verre de cône, il faut le séparer du verre de dalle après avoir enlevé les pièces métalliques et les poudres déposées sur la face interne de la dalle (Rochet et al., 1998). Mocek (1997) a étudié la filière de recyclage en boucle fermée des tubes. Pour cela le calcin en fin de vie, c'est à dire la matière secondaire produite à partir de la verrerie des tubes cathodiques prélevés sur des télévisions mis en décharge, a été analysé. Il en résulte que le recyclage du calcin est exclu d'un four produisant des dalles en raison des contraintes pesant sur les caractéristiques de ce produit. On peut par contre l'envisager dans un four produisant des cônes.

Les filières de valorisation en boucle ouverte, ne sont pas encore mises en pratique, elles sont prometteuses mais nécessitent encore des essais complémentaires et/ou des essais à l'échelle semi-industrielle (Guy, 1997). En voici quelques-unes :

- Emaux céramiques : il s'agit de mettre à profit l'état vitreux du verre du tube cathodique pour le substituer à la fritte céramique au sein des émaux pour le carrelage de grès émaillé. Cette technique fonctionne bien, mais elle en est encore aux essais pilotes.
- Ciments : d'après les conclusions de l'étude de Guy (1997), le verre des tubes cathodiques ne peut pas être utilisé comme substitut de ciment mais comme filler entrant dans la composition des bétons, un peu comme les particules fines de calcaire ou de silice. Néanmoins, il reste à l'étude la possibilité de relargage du plomb à long terme.

- Couches drainantes pour CET : le verre des tubes pourrait jouer le rôle de couche drainante pour les Centres d'Enfouissement Technique. Mais l'incidence de cet emploi sur les lixiviats est encore à l'étude.
- Techniques routières : les verres de tubes cathodiques pourraient tout à fait être utilisés au sein de ces techniques.

L'étude ADEME (2001) rend compte d'une visite de deux établissements aux Pays Bas et indique un recyclage du verre des tubes cathodiques de 80% vers l'industrie de la céramique et 20% vers les fabricants de tubes. Leur objectif serait d'atteindre 30% de verre en boucle fermée. L'incorporation du verre recyclé dans la fabrication de verre « cône » est un débouché fragile et valable jusqu'à un certain niveau de tonnage annuel à l'échelle européenne. Les fabricants de tubes ne peuvent absorber qu'à la marge des qualités de verre médiocres (mélange dalle+cône). Au-delà, il faut séparer les deux types de verre et trouver d'autres débouchés, actuellement à l'étude (ADEME, 2001).

2.2.4 Circulation du plomb dans les ATC

La Figure 11 présente le schéma général du cycle de vie des ATC des ménages en 2000, les tonnages indiqués étant ceux des tonnes de plomb circulant par le biais des ATC. Il reprend pour l'année 2000 les informations présentées ci-dessus.

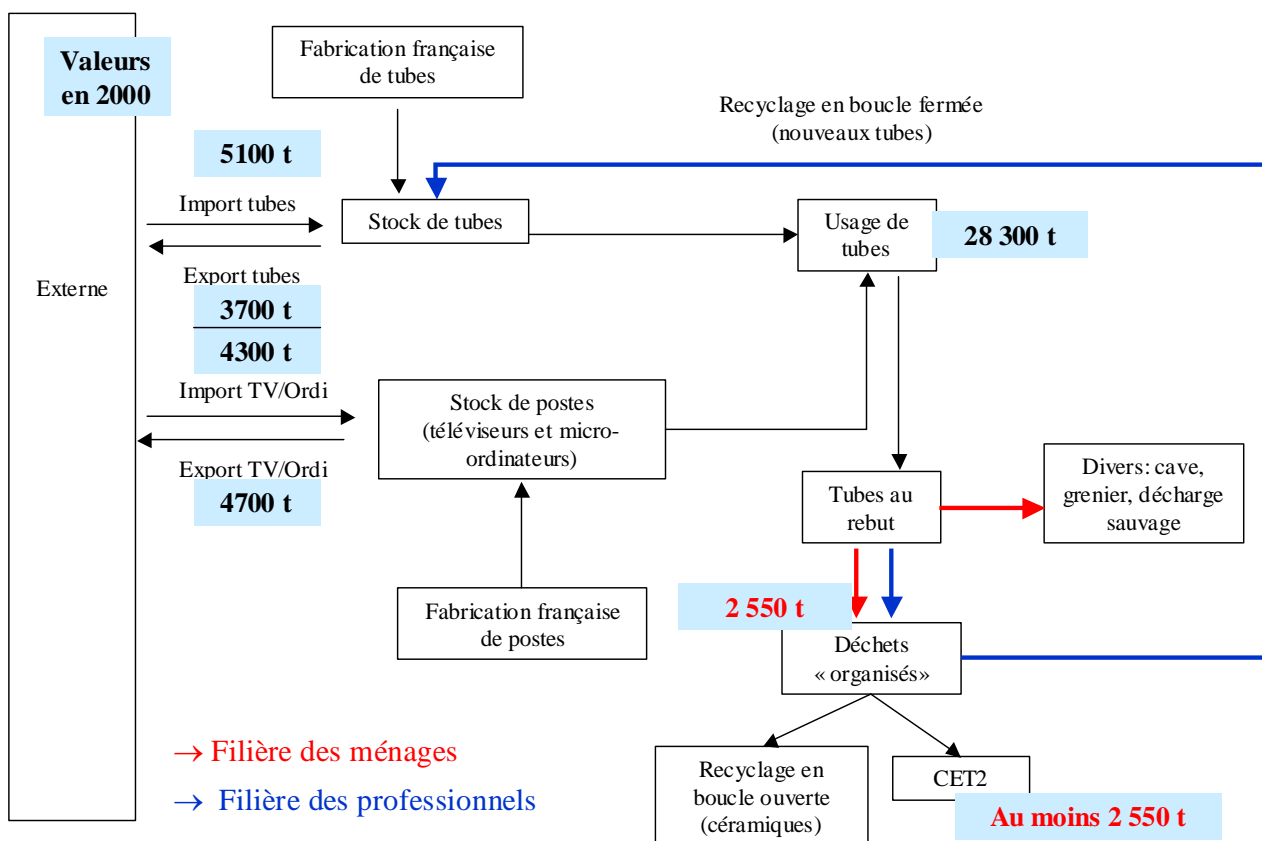


Figure 11 : Schéma général du cycle de vie des ATC des ménages en 2000 (valeurs en tonnes de plomb).

2.3. Déchets

2.3.1 Composition et quantités des ordures ménagères

Les Ordures Ménagères (OM) comprennent :

- les déchets d'activités domestiques des ménages. En 2000, 22 Millions de tonnes (Mt) ont été recensées, soit plus de 350 kg/hab. (environ 1kg/j/hab.).
- les déchets non ménagers collectés dans les mêmes conditions que les OM : en 2000, 4,9 Mt. Ceux-ci proviennent des artisans, commerçants, bureaux, etc.

On observe donc une production totale d'OM en France en 2000 de 26 Mt (Figure 12). Ce chiffre est en augmentation partout dans le monde.

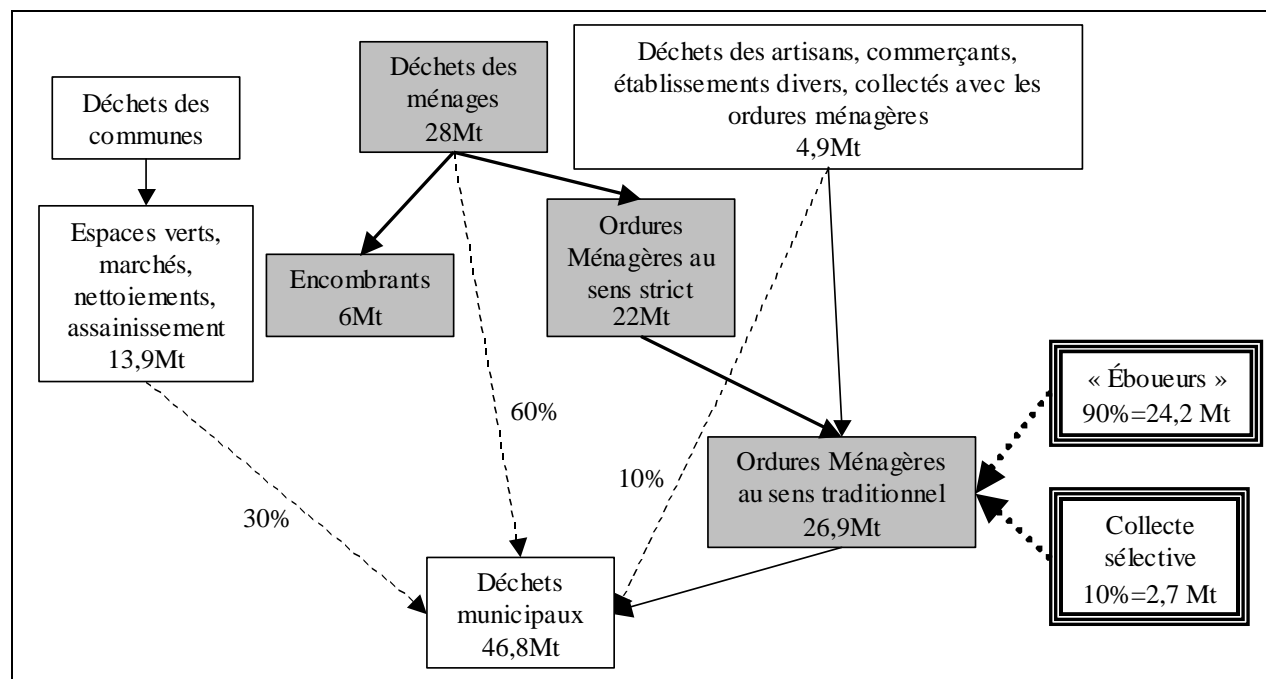


Figure 12 : Quantité et composition des déchets municipaux (Cercle National du Recyclage, 2002)

Sur les 26,9Mt d'OM produites en France en 1998, 22 Mt proviennent des seuls ménages. 60% des déchets municipaux proviennent des ménages (OM+Encombrants). 2,7 Mt sont issues de collectes sélectives.

Les OM au sens traditionnel regroupent les OM au sens strict (provenant des ménages) et les déchets des artisans et petits commerçants collectés avec les OM.

Le Tableau 4 indique la composition des OM au sens strict (les 22 Mt) en 1988 et 1993.

Tableau 4 : Composition des OM en 1988 et en 1993 en pourcentage de masse humide (Rousseaux, 1988 et ADEME, 1998)

	1988	1993
Déchets putrescibles	24	30
Papier-carton	32	25
Verre	10	13
Plastiques	7	11
Métaux	4	4
Autres ²	23	18

Les OM en 1988 sont majoritairement composées de papier-carton alors qu'en 1993, ce sont les déchets putrescibles qui prennent la tête. La composition des OM en 1988 et 1993 est sensiblement la même.

2.3.2 Quantité de plomb dans les déchets

Les seules valeurs de teneur de plomb dans les OM disponibles dans la littérature sont extraites de deux études l'une réalisée en 1988 (Rousseaux, 1988) et l'autre en 1993 (ADEME, 1998) (Tableau 5). Ces deux études sont les seules rendant compte de la composition en métaux lourds, donc

² En 1988, Autres=Textiles, fines <20mm, composites (bois, cuirs, caoutchoucs), divers.

En 1993, Autres= Textiles, combustibles et incombustibles divers, matériaux complexes, déchets dangereux des ménages.

en plomb, dans les OM. La campagne réalisée en 1993 et publiée en 1998, a été lancée afin d'apporter aux collectivités locales et aux éco-industriels, des données nationales sur la composition de leurs OM. Elle constitue un véritable point zéro de la connaissance dans ce domaine. L'étude de Rousseaux en 1988 correspond à une synthèse des données et analyses existantes à ce moment là, sur les métaux lourds dans les OM. Ainsi donc l'étude de l'ADEME publiée en 1998 rend compte de la composition en plomb dans les OM à un instant donné (en 1993) et celle de 1988 regroupent les informations sur le sujet et indiquent la valeur la plus probable. Malgré les précautions prises dans les deux cas, ces teneurs de plomb sont contestables ; néanmoins la valeur de 1993 est utilisée dans toutes les études actuelles. En effet, la composition des OM dépend de l'homogénéité du stock de déchets, qui peut varier en fonction du temps et de l'espace.

Une étude américaine estime la quantité de plomb dans les OM à hauteur de 895 mg/kg grâce à des données de 1979 et 1987 (Korzun et al., 1990).

L'ordre de grandeur est respecté pour les trois données.

Tableau 5 : Teneur moyenne de plomb dans les OM en mg/kg de MS (Rousseaux, 1988 ; Korzun et al., 1990 ; ADEME, 1998)

	1979-1987	1988	1993
Teneur moyenne de plomb dans les OM	895	360	795

Les principales origines du plomb dans les OM sont les catégories des Métaux, des Incombustibles et des Verres : (Tableau 6). La présence de plomb dans la catégorie des Métaux est plus que compréhensible. Les incombustibles comprenant les gravats, les pierres, les poteries, les porcelaines, il est en effet possible d'y trouver du plomb. Pour ce qui est de la catégorie des Verres, les verres au plomb des téléviseurs doivent y être pour quelque chose.

Tableau 6 : Pourcentage massique de plomb apporté dans les OM en 1998. (Site Internet ADEME)

Teneur moyenne dans les OM	795 mg/kg MS
Métaux	64
Incombustibles	14
Verres	11
Déchets putrescibles	4
Plastiques	3
Papiers	1
Cartons	<1
Complexes	<1
Textiles	<1
Textiles sanitaires	<1
Combustibles	<1
Déchets ménagers spéciaux	<13
Total	100

Les produits amenant du plomb par leur présence parmi les déchets sont (ADEME, 1996) :

- Capsules de surbouchage jusqu'en 1993.
- Accumulateurs.
- Papier-carton (pâtes à papier elle-même, colorants, encres) : apport négligeable depuis 1996.
- Plastiques, caoutchouc etc.

Il faut rajouter à cette liste tous les objets contenant des soudures au plomb (électronique, emballages métalliques tels que les boîtes de conserves, objets manufacturés, ...)

2.3.3 Filières de traitement

Une fois les déchets collectés, différentes destinations les attendent. En 1998 :

3 Aucune batterie de démarrage retrouvée dans cet échantillon en 1993

- 85% des OM (au sens traditionnel) ont été mises en décharges ou incinérées.
- 11 Mt de déchets ménagers ont été envoyées en incinération dont 8,7 Mt avec récupération d'énergie
- Le traitement biologique des OM (au sens traditionnel) concerne environ 7% de la production.

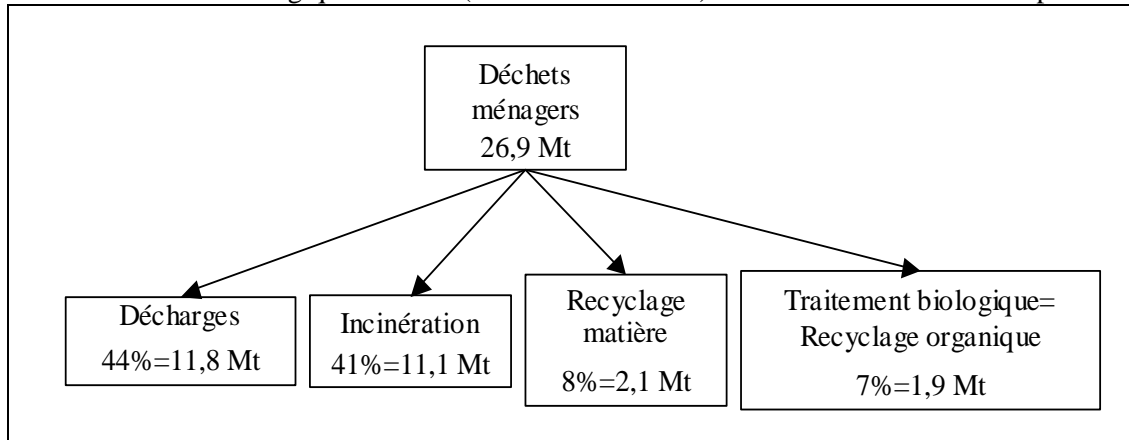


Figure 13 : Quantités et devenir des déchets ménagers en 1998 (Cercle National du Recyclage, 2002)

En 1998, 41% des OM ont été incinérées. 15% ont été recyclés et environ 50% vont en décharge (Figure 13). Les recyclages organiques et matière ne nous intéressent pas pour notre étude car ils ne concernent à priori pas les métaux.

Décharge ou CET

La décharge est un très vaste réacteur biochimique où se retrouvent mélangés des millions de composés chimiques, organiques ou minéraux, interagissant les uns avec les autres sous l'influence d'agents naturels (pluies, micro-organismes). Ces réactions aboutissent à une transformation biologique, physique et chimique des déchets avec libération (et consommation) de liquides et de gaz. Cette transformation se trouve presque achevée en un siècle (Damien, 2002). Le CET est constitué d'un domaine spatial dont la disposition a fait l'objet d'études d'ingénierie particulièrement développées avec une construction soignée. Son exploitation est contrôlée. Leur durée de vie s'étend bien au-delà de leur fin d'exploitation (plusieurs décennies).

Il existe trois classes de CET :

- CET 1 : ce sont des centres de stockage de déchets dangereux. Ils accueillent les déchets industriels spéciaux stabilisés, provenant de l'industrie, des commerces, des services et des déchets toxiques des ménages (ORDIF, 2003). Ils sont installés sur des sites imperméables assurant le confinement performant des déchets et des lixiviats. Les lixiviats sont drainés et dirigés vers une station de traitement (actuellement 14 CET1 en France).
- CET 2 ou CSDU (Centre de Stockage de Déchets Ultimes) : ils reçoivent les déchets ménagers et les déchets industriels banals dont a préalablement été extraite la fraction valorisable, les résidus de filières de traitement et de valorisation des OM (ORDIF, 2003). Ils sont installés sur des sites semi-perméables assurant une migration lente des lixiviats au travers des couches de sols non saturées d'épaisseurs suffisantes.
- CET 3 : ils sont installés sur site perméable, assurant la migration relativement rapide des lixiviats. Ils accueillent les Déchets Inertes (déchets de chantier).

Le potentiel polluant des CET réside dans la production de lixiviats et de biogaz :

- les lixiviats sont issus de la percolation des eaux de pluie au sein de l'amas de déchets ou de l'égouttage de ces derniers.
- le biogaz provient de la dégradation micro-biologique des déchets. Il est récupéré et brûlé en torchère, sauf sur les sites importants qui le revalorisent énergétiquement.

Les lixiviats ont des teneurs en polluants réglementées, ici pour le plomb :

- CET1 : Pb < 0,5 mg/L ;
- CET2 : Pb < 5 mg/L si flux journalier maximal > 5 g/j ;
- CET3 : les lixiviats ne sont pas récupérés et sont volontairement dissipés dans le sol environnant.

Les traitements thermiques

Les traitements thermiques comprenant la thermolyse et l'incinération, constituent une alternative à la mise en décharge pour les OM résiduelles. Les traitements thermiques sont des traitements par l'action de la chaleur. Ils réduisent, dans des conditions contrôlées, le potentiel polluant, la quantité ou le volume des déchets (Site Internet ADEME).

La thermolyse ou pyrolyse est un traitement thermique sans apport d'air ou avec apport d'air limité. Les principaux résidus sont le coke de pyrolyse composé de métaux, d'inertes et de matières carbonées, un gaz combustible qu'on peut brûler dans le cadre de l'installation pour produire de la chaleur par exemple, et des poussières et résidus d'épuration des gaz. En France, une unité de thermolyse est en cours de réalisation pour le traitement des OM.

L'incinération est un traitement basé sur la combustion avec excès d'air. Ses avantages sont :

- d'être un traitement adapté à toutes sortes de déchets contrairement aux autres modes de valorisation.
- de diminuer fortement le volume des déchets de 90% et leur poids de 70%.
- de générer de l'énergie récupérable sous forme de chaleur ou d'électricité.

La principale contrainte réside dans la nécessité de traiter les gaz pour limiter les risques de pollution de l'air. Les techniques de dépollution sont sophistiquées et une modernisation du parc des installations est en cours afin de respecter les exigences de la réglementation.

Outre l'effluent gazeux chargé de gaz toxiques, représentant environ 65% des OM incinérées, ce traitement génère des résidus solides (Figure 14).

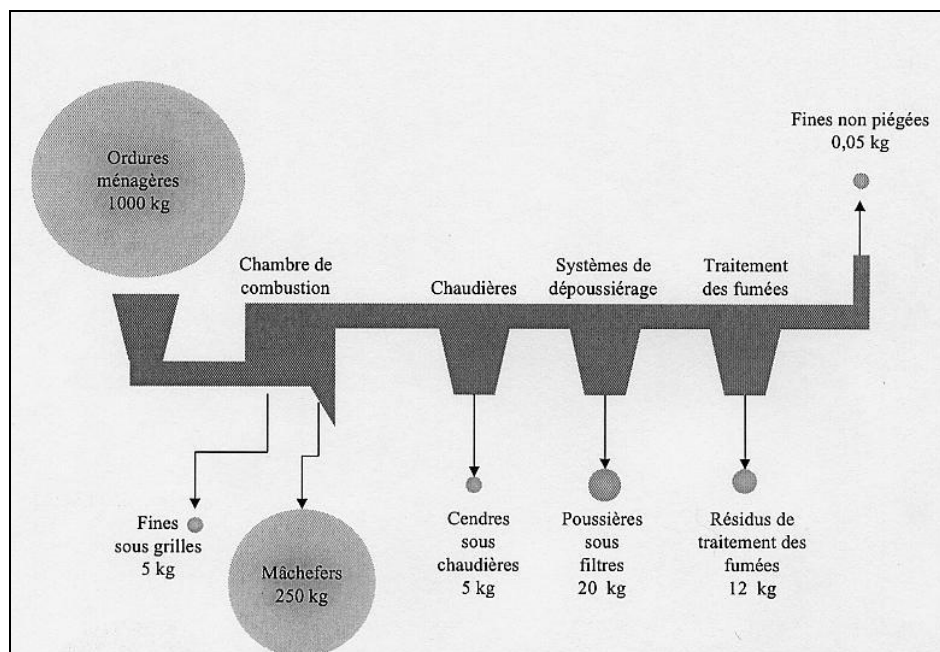


Figure 14 : Bilan global des matières solides dans une usine d'incinération (Bröns-Laot, 2002)

Ces résidus sont :

- les Mâchefers d'Incinération d'OM (MIOM) : scories retirées du foyer où se fait la combustion des OM (25% en poids des OM incinérées).

- les fines sous grilles : particules fines passant au travers des grilles du four. Cette fraction est souvent mélangée aux MIOM (0,5% en poids des OM incinérées).
 - les cendres sous chaudières : résidus collectés dans l'unité de récupération d'énergie. Ces résidus sont mélangés soit aux MIOM, soit aux Résidus d'Épuration d'Incinération des OM (REFIOM) (0,5% en poids des OM incinérées).
 - les poussières sous filtre : plus communément appelées cendres volantes, elles sont également mélangées aux REFIOM (2% en poids des OM incinérées).
 - les REFIOM, eux-mêmes (1,2% en poids des OM incinérées)
 - les particules fines non piégées s'échappant dans l'atmosphère (0,005% en poids des OM incinérées)
- L'incinération des OM produit donc deux principaux types de résidus solides : les MIOM et les REFIOM.

Les REFIOM doivent satisfaire aux critères d'admission en CET1 et pour se faire peuvent subir un traitement de stabilisation.

Les MIOM sont classés en trois catégories par la circulaire du 9 mai 1994 :

- les MIOM V=Valorisables : mâchefers à faible fraction lixiviable (en 1999 : 46% de la production des MIOM).
- les MIOM M=Maturables : mâchefers intermédiaires (en 1999 : 37% de la production des MIOM).
- les MIOM S=Stockables : mâchefers avec forte fraction lixiviable (en 1999 : 17% de la production des MIOM) (Cercle National du Recyclage, 2002).

Le devenir des MIOM dépend en grande partie des résultats obtenus par l'analyse des fractions aqueuses issues de leur lixiviation. La voie privilégiée pour les MIOM V est celle de l'utilisation en technique routière, en particulier au niveau de l'incorporation dans les sous-couches (Navarro, 1994). Les MIOM M doivent être traités avant d'être éventuellement valorisés et les MIOM S sont destinés à être déposés en centre de stockage (Amokrane et al., 1998).

D'après cette même circulaire, la quantité de plomb de ces trois catégories de mâchefers se définit comme suit :

Tableau 7 : Catégories de mâchefers en fonction de leur potentiel polluant, ici le plomb.

	Mâchefers V	Mâchefers M	Mâchefers S
Pb	<10 mg/kg	<50 mg/kg	>50mg/kg

Sur la Figure 15, on peut voir les quantités de plomb que l'on retrouve dans les trois types de résidus principaux : les Particules Atmosphériques, les REFIOM et les Mâchefers.

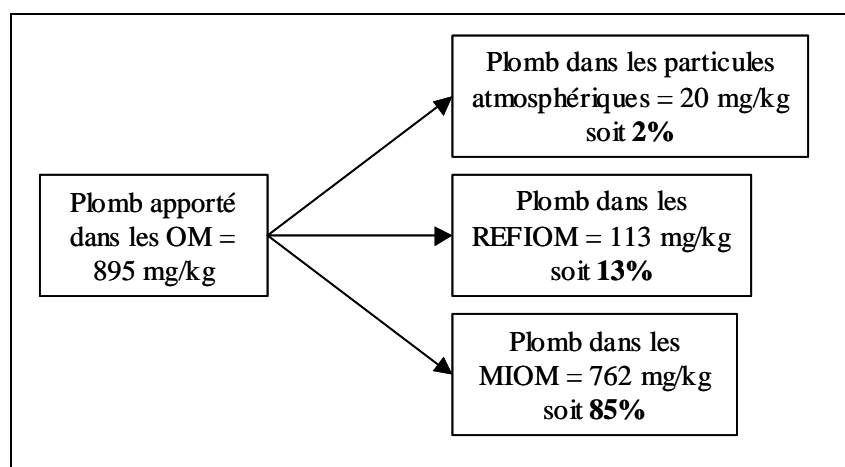


Figure 15 : Exemple de pourcentages massiques de plomb dans les résidus d'incinération d'OM (Korzun et al., 1990)

La majorité du plomb se retrouve dans les mâchefers et les REFIOM. Une minorité est libérée dans l'atmosphère.

Tableau 8 : Pourcentages massiques de plomb dans les principaux résidus du procédé d'incinération d'OM (Miquel, 2000)

	Gaz de cheminée (particules atmosphériques)	REFIOM	Mâchefers
Pourcentage de plomb dans les OM	1-5%	12-37%	58-87%

Les écarts sont dus à la composition des OM incinérées.

Recyclage matière

Il s'agit du recyclage des emballages, des journaux-magazines et des textiles. Le recyclage consiste à réintroduire les matériaux provenant de déchets dans un cycle de production, en remplacement total ou partiel d'une matière première vierge. Il nécessite un tri préalable (site Internet ADEME).

30 % des ordures ménagères provenant des ménages peuvent être recyclées : 22 % avec les emballages, 7 % avec les journaux-magazines, 1 % avec les textiles.

13 % des OM ont été recyclées en 2001 (Figure 16).

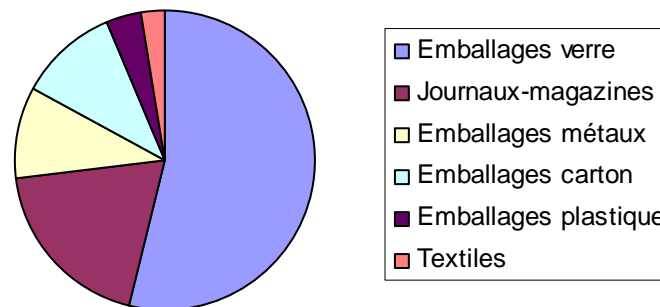


Figure 16 : Proportion des matériaux recyclables en 2001 (Site Internet ADEME)

Traitement biologique (recyclage organique)

Le compostage et la méthanisation sont utilisés pour valoriser les déchets biodégradables.

Le compostage est un traitement aérobie des déchets fermentescibles. Il conduit à la production d'un amendement organique utile pour les sols : le compost. Il peut être mis en œuvre à toutes les échelles. On distingue :

- Le compostage individuel réalisé par les ménages : actuellement, 5 millions de ménages en France réalisent du compost.
- Le compostage de proximité dans des quartiers, des établissements collectifs, à la ferme, etc.
- Le compostage centralisé dans des installations de moyenne ou grande capacité.

Les OM brutes, ou même résiduelles, après collecte sélective des emballages, ne peuvent pas être transformées en un compost de qualité suffisante. Les utilisateurs actuels de compost sont exigeants et la réglementation devient de plus en plus sévère.

La production d'un compost de qualité suppose le respect de quelques règles incontournables: un mélange adapté des matières fermentescibles, un contrôle de l'aération et de l'humidité et l'utilisation de déchets "propres", donc indemnes d'impuretés susceptibles de souiller le compost. Pour cela, un bon tri à la source est indispensable. En 6 à 8 mois, les déchets verts sont transformés en un compost de qualité le plus souvent utilisé en agriculture ou en aménagement.

La méthanisation est un traitement biologique anaérobie des déchets fermentescibles. Il conduit à la production d'un digestat qui peut être utilisé comme amendement organique et d'un gaz, le biogaz, qui peut être valorisé sous forme de chaleur ou d'électricité. La méthanisation des déchets municipaux est très peu développée en France actuellement (Site Internet ADEME).

2.3.4 Circulation du plomb dans les OM incinérées

La Figure 17 présente les tonnes de plomb circulant en 2000 avec les ordures des ménages traitées par les filières présentées précédemment, et se retrouvant dans des résidus de traitement entrant, directement ou non, en contact avec le milieu naturel (particules atmosphériques), soit en 2000, quelques centaines de tonnes de plomb. Ces valeurs de plomb sont du même ordre de grandeur que celles des retombées atmosphériques de plomb sur le Bassin de la Seine de 135 t/an (Azimi et al., 2004) et celles d'émissions atmosphériques de 71,3 t provenant d'usines de traitement de déchets en France en 1995 (Pacyna et al., 2000).

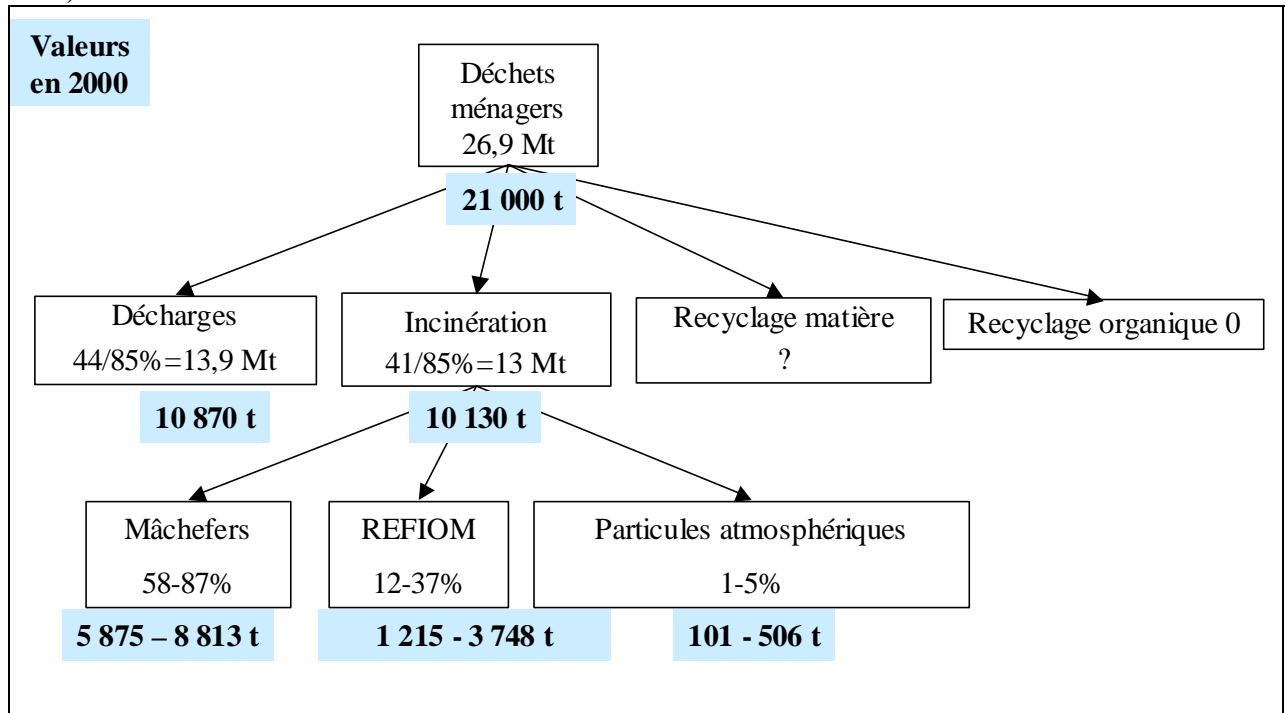


Figure 17 : Schéma général du plomb en tonnes en 2000 dans les OM.

3. Modèle

Des données nouvellement acquises cette année ont été ajoutées au modèle. Outre les cycles des tubes cathodiques et des déchets qui ont été évoqués précédemment, le cycle des accumulateurs a été affiné ainsi que les flux de rejets vers l'eau. Le principal changement par rapport à l'an passé est l'éclatement de la boîte « produits manufacturés » (Figure 18). Différents cycles de produits manufacturés ont été incorporés : les plombs de chasse, l'imprimerie, les demi-produits (feuilles, tables, tubes, tuyaux, fils, etc.).

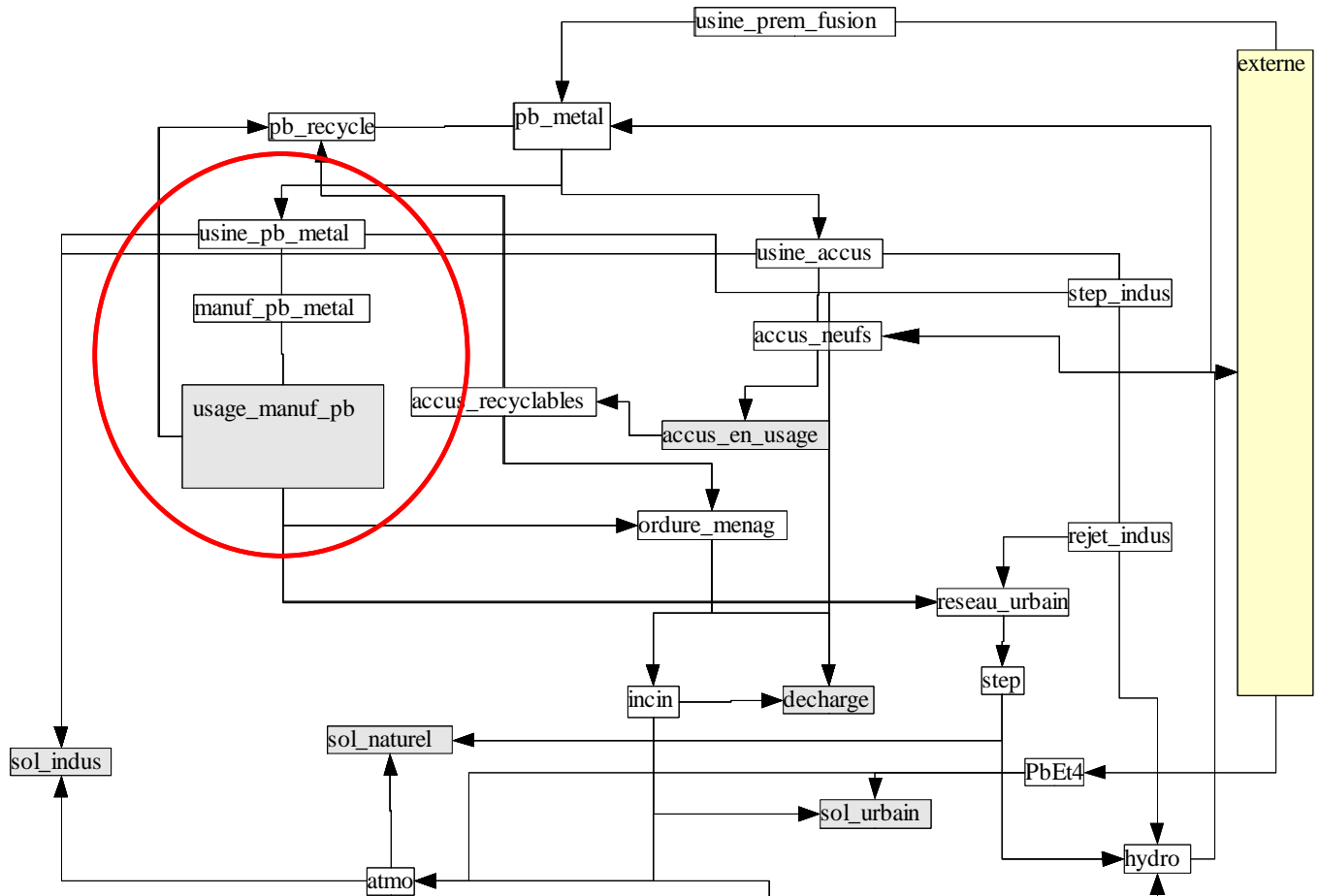


Figure 18 : Modèle du cycle du plomb dans l'antroposphère Seine.

Les trois graphiques suivants présentent quelques résultats obtenus. La Figure 19 montre la production française de plomb entre 1940 et 2000. La production des accumulateurs augmente fortement entre 1960 et 1990. En ce qui concerne les produits manufacturés et l'imprimerie, à partir de 1970, on remarque une chute de la production.

La production de plomb en France est nourrie par le plomb recyclé (Figure 20). On peut voir un fort recyclage des accumulateurs qui suit la forte production de la Figure 19. La valeur de 2000 est un peu trop élevée. Il est importé un peu de plomb à recycler en France. Le recyclage des tubes cathodiques est très faible avant 2000, comme nous avons pu le voir précédemment.

Sur la Figure 21, on peut voir les rejets de plomb. Les rejets atmosphériques ont diminué de façon importante à partir de 1970. En considérant les courbes des rejets vers les sols industriels et les décharges, nous pouvons voir un changement dans le comportement des industriels vers 1960 : avant les déchets restaient sur les sols environnant l'usine. Ils ont été ensuite envoyés en décharge.

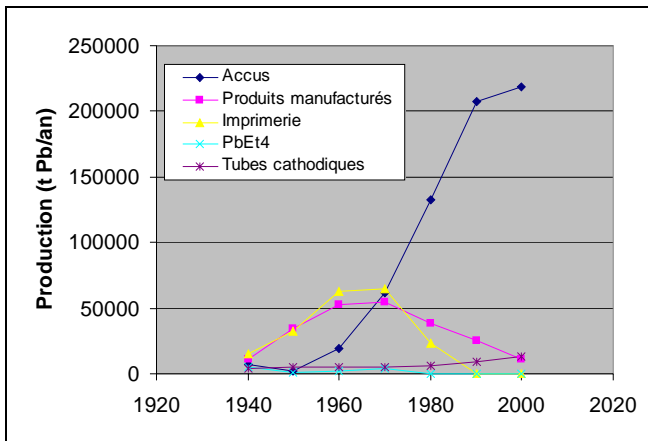


Figure 19 : Production de plomb en t/an.

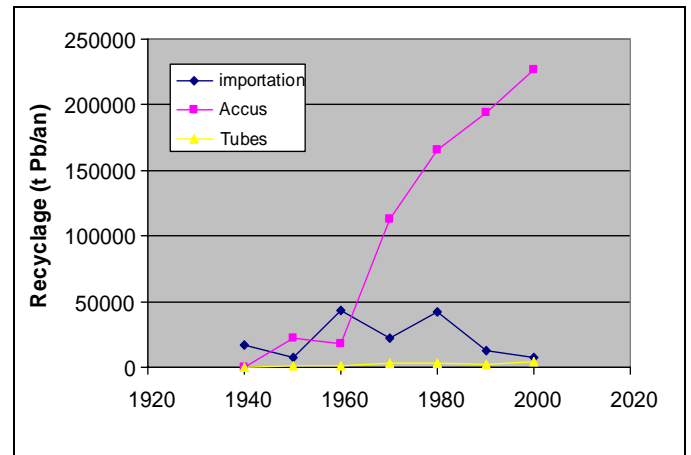


Figure 20 : Recyclage de plomb en t/an.

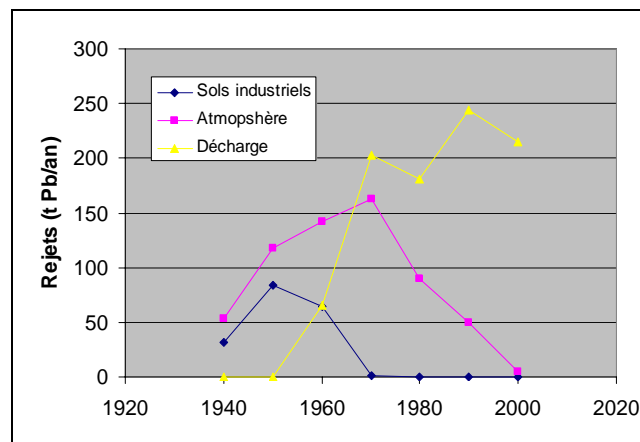


Figure 21 : Rejets de plomb en t/an.

4. Conclusion et perspectives

Il reste des travaux à poursuivre pour rendre un modèle finalisé à la fin 2005. Tout d'abord, la plupart des coefficients de fuites de plomb vers le milieu naturel du modèle proviennent de données de la littérature. Il convient de les critiquer et de les affiner. Nous souhaitons également mieux exploiter les données des chambres professionnelles européennes, les données fournies par les chambres françaises ayant été décevantes. Ensuite, nous devons confronter le modèle avec les données de terrains issues d'une part des observations des retombées atmosphériques (action 4.1.3), et d'autre part de l'analyse des carottes sédimentaires de l'action 4.1.4. Enfin nous réaliserons la spatialisation des usages et rejets (sur la base essentiellement des données de population), en vue d'une intégration dans Sequamet..

L'enjeu de cette modélisation du cycle de plomb est également d'écrire une méthodologie d'analyse de flux de matières applicable à d'autres éléments traces. Nous détaillerons notre démarche concernant l'identification des activités et des éléments de l'environnement, et de leurs interactions, l'identification des effets/impacts environnementaux de ces activités, le choix des données quantitatives/qualitatives, les aspects spatio-temporels, l'identification des descripteurs d'impact, et l'évaluation de l'importance des effets/impacts, etc.... Le métabolisme du mercure sera ainsi présenté dans ce cadre.

5. Bibliographie :

ADEME. www.ademe.fr.

- ADEME (1996) Du produit au déchet : comprendre l'origine de métaux lourds dans les ordures ménagères. *Rapport final juillet 1996*. cote ADEME : Li4499.
- ADEME/ASCOMADE (2003). État des lieux des DEEE: note de synthèse. 14p. (http://franche-comte.ademe.fr/admin/modules/telechargement/download.php?id_fichier=83.)
- ADEME (2004). Colloque des 20 et 21 octobre 2004.
- ADEME/INSAVALOR POLDEN (1998). La composition des ordures ménagères en France. *Rapport final et synthèse*. 59p. cote ADEME : BR5378.
- ADEME/SACEL/VALTRONIQUE (2001). Etude d'orientation pour la mise en oeuvre d'une filière nationale de collecte et de valorisation d'appareils à tube cathodique en fin de vie, issus de la consommation des ménages. Rapport final. cote ADEME: BR6774. 75p.
- ADEME/TERRA. Martin S. (2001). Inventaire national des sites de traitement d'appareils électriques ou électroniques en fin de vie. (<http://entreprises.ademe.fr/Dechets/dechets/docs/INVODEEE.pdf>). 88p.
- ADEME/TERRA. Martin S. (2004) Actualisation de l'inventaire national des sites de traitement des déchets d'équipement électriques et électroniques. (http://www.ademe.fr/htdocs/publications/publipdf/inventaire_deee.pdf). 75p.
- Amokrane A., Blanchard J.-M., Billard H., Chatelet-Snidaro L., Delineau T., Bourdier C. (1998). Le devenir des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères, partie 1 : caractérisation des mâchefers. *Déchets-Sciences et Techniques-N°10*. cote ADEME : Re408.
- Annuaire récapitulatif de la France 1948 et 1988, INSEE.
- Annuaire statistiques du commerce extérieur de la France, Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie et Service Statistique des douanes, 1913 à nos jours.
- Annuaire statistiques de la France, INSEE, 1994 et 2004.
- Azimi S., Rocher V., Beuvin L., Varrault G., Thévenot D., Colin J.L., Rousseau C., Triquet S., Coquery M. (2004). Evaluation des flux de retombées atmosphériques d'éléments inorganiques et de mercure sur le bassin de la Seine et détermination de leurs origines. PIREN Seine. Rapport 2003. Action 4.1.3.
- Bouzidi Y. , Goiffon C., Guéguen Y., Lestel L., Mouchel J.M. (2003). Cycle de vie du plomb dans l'anthroposphère Seine. PIREN Seine. Rapport 2003. Action 4.3.1.
- Brons-Laot G. (2002). Evaluation environnementale de la valorisation d'ordures ménagères en remplissage de carrière. *Thèse de l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon*.
- Cercle National du Recyclage (2002). Mémento du Cercle National du Recyclage. 68p.
- Damien A. (2002). Guide du traitement des déchets.
- Directive 2002/96/CE du Parlement Européen et du Conseil du 27 janvier 2003 relative aux Déchets d'Équipement Électriques et Électroniques (DEEE).
- France Télécom : Communiqué du 8 novembre 2004. (http://www.francetelecom.com/fr/espaces/journalistes/communiques/CP_old/cp041108-2.html)
- Guy C. (1997). Analyse des gisements et des filières de valorisation en boucle ouverte de tubes cathodiques issus des PEFV. *Rapport ADEME/CREED*. cote ADEME : INDU1447/1 2. 208p.
- Guy-Schmid C., Line V. (1998). Etude des modes de collecte et des circuits d'élimination des produits blancs et des produits électriques en fin de vie contenant un tube cathodique. *Rapport ADEME/CREED*. cote ADEME: INDU1447/3 4. 244p.
- Korzun E.A., Heck H.H. (1990). Sources and fates of Lead and Cadmium in Municipal Solid Waste. *J. Air Waste Manage. Assoc.* cote ADEME : RE315.
- Lanfranchi B., Jobin V., Valache M. (1995). Valoriser les produits électroniques en fin de vie. *TSM n°2*.
- Miquel G. (2000). Effet des métaux lourds sur l'environnement et la santé. *Rapport 261 : Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques*.
- Mocek L. (1997). Analyse de la filière de recyclage en boucle fermée des tubes cathodiques des produits électroniques en fin de vie. *Rapport ADEME/THOMSON*. cote ADEME : INDU1449. 83p.

Navarro A., Mehu J., Moszkowicz P., Barna R. (1994). Gestion et traitement des déchets et résidus ultimes de l'incinération. *Revue Générale de Thermique*. cote ADEME : R122.

ORDIF : Observatoire Régional des Déchets d'Ile-de-France. (2003). Dernière mise à jour en août 2003. (www.ordif.com/traitement/cet.htm).

Pacyna J.M., Pacyna E.G. (2000). Atmospheric emissions of anthropogenic lead in Europe: improvements, updates, historical data and projections. GKSS. 36p.

Rochet M., Boulhol O., Marty Y., Ougier L. (1998) Déchets électroniques. Fabrication et fin de vie des produits. *Colloque ADEME, Salon INTERTRONIC*. cote ADEME : INDU1194/4.

Rousseaux P. (1988). Les métaux lourds dans les ordures ménagères : origines, formes chimiques, teneurs. *INSA LYON, ANRED, France-ENVIRONNEMENT (MIN), CCE*. 150 p. cote ADEME LI2760.

TERRABILIS : <http://www.terrabilis.com/actu/breves/breve.asp?ArID=2501>, édition du 12 novembre 2004.

WIKIPEDIA : l'Encyclopédie libre <http://fr.wikipedia.org/wiki/Minitel>; modifié le 7 janvier 2005.