

Université Libre de Bruxelles
Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire
Faculté des sciences
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

**Le Gallium, un métal rare, inépuisable grâce à sa production secondaire –
Impacts et enjeux environnementaux et économiques de sa production
jusqu'à sa récupération**

Mémoire de Fin d'Etudes présenté par
FAMEREE Bénédicte
En vue de l'obtention du grade académique de
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement
« Finalité Gestion de l'Environnement » ENVI 5G-M

Année Académique 2011-2012

Promoteur: Marc Degrez

Résumé

Le gallium est un métal rare. Il est critique pour l'Union Européenne. En effet, le développement et le déploiement de certaines technologies dans l'Union Européenne pourraient être contraints si le gallium venait à manquer. Le gallium, sous-produit de la bauxite et du zinc, est un élément dont la production primaire est complexe, globalement inefficace et dont les impacts sur l'environnement sont non-négligeables. De plus, elle est située principalement en Chine, ce qui veut dire hors de l'Europe. Par ailleurs, la demande en gallium est en augmentation et ses applications sont de plus en plus nombreuses et diversifiées. Le gallium s'y trouve le plus souvent allié à d'autres composants et y est dispersé. Ceci explique qu'actuellement la production secondaire post-consommation du gallium soit inexistante industriellement. La production secondaire à partir de déchets de production est quant à elle très répandue, et efficace pour certains composés du gallium tel que l'arséniure de gallium. Elle contribue d'ailleurs pour une partie importante du gallium consommé aujourd'hui.

Dans ce travail, nous aborderons des solutions potentielles pour réduire le caractère critique du gallium pour l'UE ainsi que les impacts sur l'environnement de sa production et de son utilisation. Une attention particulière sera portée au recyclage du gallium à partir d'objet post-consommation.

Mots-clés :

Gallium - Métal rare – Critique - Union Européenne - Production primaire - Production secondaire – Post-consommation

Remerciements

Tout a commencé il y a deux ans, lorsque mon mari m'a proposé de suivre le master en gestion de l'environnement. J'ai accepté mais j'étais loin de me douter que cela me demanderait autant de temps et d'investissement ni que cela serait aussi intéressant. Maintenant que je suis en train de finaliser mon mémoire, je réalise tout ce que j'ai appris et découvert (je ne connaissais rien au gallium) et à quel point le monde qui nous entoure est passionnant mais reste trop gouverné par l'économie.

De nombreuses personnes m'ont aidé à produire ce travail, à commencer par mon promoteur, M. Marc Degrez, que je remercie pour sa disponibilité et pour le temps qu'il a consacré à la relecture des différents chapitres, ainsi que pour ses remarques et conseils judicieux.

Je remercie ensuite les membres de mon jury, Mme Mattielli, M. Decroly et M. Van den Bossche pour leurs suggestions lors de nos entretiens. M. Van den Bossche m'a en outre fourni plusieurs contacts et documents qui m'ont été utiles. Qu'il en soit remercié.

Ma tâche aurait été bien plus compliquée sans les réponses à l'enquête et les nombreuses informations des professionnels du secteur que j'ai dérangé à maintes reprises avec mes questions. Ils m'ont répondu avec amabilité, et ouverture dans la mesure des possibilités et des connaissances. Ils m'ont tous permis en tout cas de rassembler une mine de renseignements. Il s'agit de Mme Abouou (Revatech), M. Bareel (Comet Traitements), M. Dallenogare (5N Plus), M. Hagelüken (Umicore), M. Lewis (ULg), M. Oosterhof (Umicore) et M. Pardon (IMEC). Je les remercie vivement. Je n'oublierai pas Pierre D'Ans (ULB), qui malgré son emploi du temps chargé, m'a expliqué et m'a donné l'accès à la database Ecoinvent. Merci aussi pour les documents qu'il a trouvés.

Je voudrais encore remercier M. Godefroid et M. Haesebroek qui ont permis et facilité mes contacts au sein d'Umicore.

Un tout grand merci à ma famille pour leurs encouragements, la garde des enfants pour que je puisse travailler, les conseils et relectures mais aussi pour leur patience; celle de mes enfants, Gabrielle, Hippolyte et Cypriane, a été mise à rude épreuve. Ils m'ont demandé un nombre incalculable de fois 'maman tu as fini ton travail ?'.

Finalement, je voudrais remercier du fond du cœur mon mari, Bertrand, sans qui cette aventure n'aurait pas pu débuter ni se prolonger. Je le remercie pour son aide à la maison, son soutien, ses conseils, le temps qu'il a consacré à la mise en page et à la correction de ce mémoire.

Dieu seul sait où tout cela nous mènera mais peu importe, puisque la vie n'est rien sans projet et découverte !

Table des matières

0. Introduction	1
1. Problématique autour du gallium	2
1.1 Description du gallium et définitions de ses appellations	2
1.2 Détermination du caractère critique	4
1.2.1 Les études américaines.....	4
1.2.1 Les études de l'Union Européenne.....	5
1.3 Problématique	7
1.4 Objectifs et questions de recherche	10
1.5 Méthodologie	11
2. Production primaire et raffinage du gallium : le monopole asiatique; l'Europe à la traîne	12
2.1 Introduction	12
2.2 Les sources de gallium	12
2.3 Aperçu des procédés d'extraction du gallium	13
2.3.1 Extraction du gallium comme sous-produit de la bauxite.....	13
2.3.2 Extraction du gallium comme sous-produit du traitement du zinc.....	16
2.4 Evolution mondiale de la production primaire du gallium et des capacités de production	16
2.4.1 La production primaire.....	17
2.4.2 Les capacités de production.....	17
2.4.3 Les grands acteurs de la production primaire	18
2.4.4 Efficacité d'extraction du gallium	19
2.5 Le raffinage ou la purification du gallium	20
2.6 Les impacts environnementaux de la production primaire et du raffinage du gallium	20
3. Applications du gallium et mise en évidence des points critiques	22
3.1 Introduction	22
3.2 Aperçu des Applications	22
3.2.1 Les circuits intégrés.....	23
3.2.2 Applications optoélectroniques	24
3.2.3 Cellules Photovoltaïques	26
3.2.4 Alliages spéciaux et autres applications	27
3.2.5 Applications à potentiel de recyclage nul.....	28
3.2.6 Applications exceptionnelles	28
3.3 Rendement d'utilisation du gallium pour quelques applications	28
3.3.1 Fabrication du substrat.....	29
3.3.2 Inspection des galettes.....	33
3.3.3 Croissance/Déposition de diverses couches.....	33
3.3.4 Découpage en chips et contrôle de qualité	36
3.3.5 Etapes d'assemblage	36
3.3.6 Variante dans le processus	36
3.3.7 Technologie CIGS.....	36
3.4 Mise en évidence des points critiques dans les évaluations environnementales des applications courantes	36
3.4.1 Les LED	37
3.4.2 Le photovoltaïque	39
3.4.3 Les enseignements tirés des études	40
3.5 Analyse des gisements potentiel en gallium	41
3.5.1 A partir des pertes au cours de la production des composants	41
3.5.2 A partir des applications en fin de vie	42

3.6 Aspects économiques	45
3.7 Conclusion des chapitres 2 et 3.....	48
4. Production secondaire : opportunité économique et environnementale pour l'Union Européenne	49
4.1 Introduction.....	49
4.2 Recyclage du gallium à partir de déchets de production	49
4.2.1 La capacité de recyclage	49
4.2.2 Recyclage des déchets de production des semi-conducteurs.....	50
4.2.3 Recyclage des déchets de production des cellules CIGS.....	51
4.2 Recyclage du gallium à partir d'objets post-consommation	52
4.2.1 Absence de recyclage : pourquoi ?	52
4.2.2 Les projets de recyclage du gallium post-consommation.....	54
4.2.3 Le recyclage post-consommation du gallium, une étape essentielle	59
4.3 Conclusion du chapitre 4.....	61
5. Pistes de solutions pour optimiser les productions primaire et secondaire du gallium et diminuer son caractère critique pour l'Union Européenne	63
5.1 Introduction.....	63
5.2 Amélioration de la production primaire.....	63
5.3 Amélioration de la production secondaire.....	64
5.3.1 A partir des déchets de production de composants.....	64
5.3.2 A partir d'objets en fin de vie	65
5.3.3 Leviers communs aux productions primaire et secondaire	66
5.4 Les autres options.....	66
5.4.1 La substitution.....	66
5.4.2 La réutilisation.....	68
5.5 L'option la plus favorable pour L'UE et l'environnement.....	68
5.6 Conclusion du chapitre 5.....	69
6. Conclusions	70
Bibliographie	72
Bibliométrie	83
Annexes.....	92

Table des illustrations

Table des figures

- Figure 1 : Matrice de risque (à gauche) et éléments critiques pour les USA en 2007 (à droite), p.4
- Figure 2 : Importance économique et risques d'approvisionnement pour les 41 matières premières analysées ; Sous-groupes au caractère critique variable identifiés par l'UE, p.6
- Figure 3 : Classement des matières premières selon leur « environmental country risk », p.6
- Figure 4 : Scenarii de demande en gallium basés sur les calculs de Öko-Institut, p.8
- Figure 5 : Mécanisme de crise structurelle liée à une innovation technologique pour les métaux « high-tech », p.9
- Figure 6 : Prospective et crises potentielles pour certains métaux, p.9
- Figure 7 : La chaîne du gallium, p.12
- Figure 8 : Diagramme représentant l'extraction du gallium selon le procédé Rhône-Poulenc, p.15
- Figure 9 : Evolution de la production mondiale de gallium primaire entre 1980 et 2011 (en t), p.16
- Figure 10 : Graphe de la contribution à l'écotoxicité terrestre et au réchauffement global d'1kg de métal primaire – Réalisé à partir de données normalisées de Ecoinvent, p.21
- Figure 11 : La chaîne du gallium, p.22
- Figure 12 : Répartition du gallium consommé entre ses différentes applications en 2007 aux USA, p.23
- Figure 13 : Représentation d'une matrice de LED à base GaN, p.25
- Figure 14 : Vue (non à l'échelle) d'une diode laser à base de GaN et détails de la région active, p.26
- Figure 15 : Schéma de principe de la conversion photoélectrique, p.26
- Figure 16 : Schéma d'une cellule à base de CIGS, p.26
- Figure 17 : Zone de fonctionnement (puissance (W), fréquence (Ghz)) potentielle de différents composés, p.29
- Figure 18 : Méthodes de croissance de monocristaux: (a) Liquid Encapsulated Czochralski (LEC); (b) Horizontal Bridgman (HB); (c) Vertical Gradient Freeze (VGF), p.31
- Figure 19 : Etapes de base de la fabrication d'une LED blanche Golden Dragon Plus, p.34
- Figure 20 : Demande d'énergie primaire pour la fabrication et l'utilisation des lampes considérées dans la LCA réalisée par Osram, p.37
- Figure 21 : Evaluation relative en 2009 et future des impacts du cycle de vie de 6 types de lampes ou luminaires. L'évaluation future considère une augmentation de l'efficacité des lampes considérées, p.38
- Figure 22 : Energie primaire utilisée dans les différentes étapes de production de modules GaAs et GaInP/GaAs d'une capacité de 1 kWp, p.39
- Figure 23 : Exemple d'évolution de l'EPBT pour la technologie CIGS, p.40
- Figure 24 : Estimation de l'apparition de volumes significatifs de produits en fin d'usage pour diverses applications en développement, p.44
- Figure 25 : Marché des LED ultra-brillantes (en milliard de \$) : Strategies Unlimited, Août 2009, p.46
- Figure 26 : Prévision de la consommation brute en gallium en tonne et pourcentage par secteur d'application, p.47
- Figure 27 : Prévision de croissance des applications phares émergentes du gallium, p.47
- Figure 28 : La chaîne du gallium, p.49
- Figure 29 : Evolution des prix (en \$) du gallium et de l'indium (LHS) et l'indice général CRB du prix des commodités (RHS) depuis 2004, p.53
- Figure 30 : Evolution des prix (en \$) du gallium, de l'indium (LHS), de l'indice général CRB du prix des commodités et du pétrole rebasé à 100 depuis 2004, p.53
- Figure 31 : Relation entre la concentration des divers métaux et le prix du métal pour a) les cartes électroniques, b) les ordinateurs et c) les téléphones portables, p.54
- Figure 32 : Impacts environnementaux et énergie primaire requise pour la production et le recyclage d'une installation de panneaux solaires CIGS montés au sol, p.58
- Figure 33 : Part de marché annuelle de la technologie CIGS dans le secteur photovoltaïque, p.59
- Figure 34 : Représentation des pertes de métaux rares au cours du cycle de vie en réalité et dans une situation idéale et de la marge d'amélioration possible, p.63

- Figure 35 : Emploi du gallium aux USA de 1975 à 2003, p.84
 Figure 36 : Nombre de documents relatifs à ‘Gallium recovery from liquor Bayer’ triés par année, p.85
 Figure 37 : Nombre de documents relatifs à ‘Gallium recovery from liquor Bayer’ triés par auteur, pp. 86-87
 Figure 38 : Nombre de documents relatif à ‘Gallium recovery & zinc’ triés par année, p.88
 Figure 39 : Nombre de documents relatif à ‘Gallium recovery & coal’ triés par année, p.89
 Figure 40 : Nombre de documents relatif à ‘gallium recovery from scrap’ par année, p.90

Liste des tableaux

- Tableau 1 : Caractéristiques et propriétés du Gallium, p.2
 Tableau 2 : Résultats d’analyse pour le Ga (à gauche) et résultats d’analyse pour l’Indium (à droite), p.7
 Tableau 3 : Demande globale en 2006 et 2030 en matière première requise pour les technologies émergentes analysées, p.7
 Tableau 4 : Résumé de la priorité et de l’urgence dans le temps des éléments critiques pour les technologies durables futures, p.10
 Tableau 5 : Principales sources possibles de gallium, bornes de concentration, concentration moyenne et réserves en gallium dans la source, p.13
 Tableau 6 : Evolution de 2005 à 2011 de la production primaire, de la quantité de gallium raffiné et des capacités de production et de raffinage du gallium, p.16
 Tableau 7 : Evolution des capacités de production primaire de gallium par pays, p.18
 Tableau 8 : Estimation de la production primaire de gallium par pays pour 2010, p.18
 Tableau 9 : Réserves européennes de gallium sur base des dépôts de bauxite relevés dans l’Union Européenne, p.19
 Tableau 10 : Répartition de la consommation totale globale de gallium entre les applications, p.23
 Tableau 11 : Composés du gallium : applications et pureté requise, p.28
 Tableau 12 : Propriétés des composés, p.29
 Tableau 13 : Description des pertes en gallium lors de la croissance du lingot, p.30
 Tableau 14 : Description des pertes en gallium au cours des étapes de préparation de la galette, p.31
 Tableau 15 : Description des pertes en gallium pour la technologie HVPE, p.33
 Tableau 16 : Description des techniques MOCVD et MBE de croissance par épitaxie, de leurs pertes en gallium et des aspects environnementaux, p.35
 Tableau 17 : Estimation par Roskill de la quantité de gallium utilisé en 2010 pour différents domaines d’utilisation, p.42
 Tableau 18 : Teneur et poids récupérable de gallium et d’indium après démantèlement d’un PC, p.43
 Tableau 19 : Evolution des capacités mondiales de production primaire et de recyclage, p.49
 Tableau 20 : Caractérisation des principales sortes de déchets contenant du gallium d’une galette GaAs, p.50
 Tableau 21 : Description de déchets par rapport au gallium, p.52
 Tableau 22 : Substituabilité et taux de recyclage des éléments critiques pour l’UE, p.67
 Tableau 23 : Synthèse du nombre de documents produits par année pour les mots clés rentrés dans le moteur de recherche, p.83

Liste des acronymes et abréviations

ACV	Analyse du cycle de vie
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe - Institut fédéral des géosciences et des ressources naturelles
BRGM	Bureau de recherches géologiques et minières
CIGS	Alliage Cuivre-Indium-Gallium-(di)Sélénium
CPV	Concentrateurs photovoltaïques
CVD	Chemical Vapor Deposition
DEFRA	Department for Environment, Food and Rural affairs (UK)
ELO	Epitaxial Lift-Off
EPBT	Energy Pay-Back time -Temps de retour énergétique
Ga	Gallium
GaAs	Arséniure de gallium
GaAsP	Phospho-arséniure de gallium (ou arséniure-phosphure de gallium)
Ga(CH ₃) ₃	Triméthylgallium
GaInAs	Arséniure de gallium-indium
GaN	Nitride de gallium
GaP	Phosphore de gallium
GaSb	Antimoniure de gallium
HB	High-brightness
HD DVD	High Definition/Density Digital Versatile Disc
HVPE	Hydride Vapour Phase Epitaxy
HTHP	High Temperature – High Pressure
IARC	International Agency for Research on Cancer
InGaN	Nitride de gallium-indium
LCD	Liquid Cristal Display – Affichage à cristaux liquides
LED - DEL	Light-emitting diode – Diode électroluminescente
LHS	Left Hand Scale
LPE	Liquid Phase Epitaxy
LTE	Long Term Evolution
MBE	Molecular Beam Epitaxy
mCi	Millicurie
MMTA	Minor Metal Trade Association
MOCVD	Metal Organic Chemical Vapour Deposition
MOVPE	Metal Organic Vapour Phase Epitaxy
Mt	Million de tonnes
OLED	Organic Light-emitting diode
OMCVD	OrganoMetallic Chemical Vapour Deposition
OMVPE	OrganoMetallic Vapour Phase Epitaxy
PNUE - UNEP	Programme des Nations Unies pour l'environnement - United Nations Environment Programme
ppb	part per billion - partie par milliard
ppm	part per million - partie par million
PV	Panneaux photovoltaïques
RHS	Right Hand Scale
SET-Plan	Strategic Energy Technology Plan
TIC	Technologies de l'information et de la communication
TEG - TEGa	Triéthylgallium
TMG - TMGa	Triméthylgallium
USGS	United States Geological Survey
VHU	Véhicule hors d'usage
VPE	Vapour Phase Epitaxy

0. Introduction

Peut-être n'avez-vous qu'une vague connaissance du gallium ou même, n'en avez-vous jamais véritablement entendu parler? C'est pourtant un métal très intéressant pour lequel peu d'informations sont disponibles bien qu'il soit sous les feux de la rampe depuis quelques années. Il a en effet été déterminé après diverses études que ce métal était, comme quelques autres, 'critique' pour l'Union Européenne. En d'autres termes, une pénurie dans l'approvisionnement de ce métal pourrait contraindre le développement de certaines technologies en Europe.

L'approvisionnement en gallium pourrait ne pas être suffisant pour plusieurs raisons. Tout d'abord, le gallium est un sous-produit, actuellement exclusivement extrait de la bauxite et du minerai de zinc. Il ne forme pas de minerai exploitable économiquement. La production primaire du gallium est globalement inefficace, nécessite de nombreuses étapes dont les impacts sur l'environnement semblent être non-négligeables. De plus, elle est majoritairement située en Chine.

D'autre part, les besoins en gallium augmentent. On estime d'ailleurs que la demande future va continuer à croître. Les utilisations du gallium sont de plus en plus nombreuses et diversifiées. La plus importante est la téléphonie mobile que nous employons quotidiennement. Certaines applications, comme les LED ou le photovoltaïque, permettent une réduction de l'énergie consommée et sont donc particulièrement cruciales pour l'Union Européenne dans le cadre du SET-Plan. Notons encore que pour les applications dominantes du gallium, il n'y a pas de substitut.

Pour parfaire ce tableau, la production secondaire du gallium, c'est-à-dire son recyclage, bien qu'optimisée à partir des déchets de production des circuits intégrés, les plus grands consommateurs en gallium aujourd'hui, est inexistante industriellement à partir des objets post-consommation (objets contenant du gallium et que l'on n'utilise plus).

Nous montrerons dans ce travail que ni la production primaire mondiale, ni encore moins la production européenne, ne peuvent répondre aux besoins en gallium. Après quoi, nous analyserons les points critiques pour l'environnement et du point de vue de l'efficacité matière de quelques applications tout au long de leur cycle de vie. Grâce à quoi, nous mettrons en évidence que malgré les difficultés qui justifient son absence, le recyclage post-consommation est nécessaire pour l'environnement ainsi que pour diminuer le caractère critique du gallium pour l'UE.

La situation est-elle en train d'évoluer vis-à-vis de la production secondaire? Y-a-t-il de nouveaux projets? Sont-ils viables économiquement? Nous tenterons de répondre et d'aborder les solutions combinant respect de l'environnement et maintien de l'équilibre offre-demande en gallium pour l'Union Européenne.

Le gallium est en tous cas un métal qui nécessite une attention particulière que nous allons lui accorder le temps de ce travail, et sur lequel l'Europe a tout intérêt à se concentrer davantage, car il n'est pas suffisant de le déclarer critique.

1. Problématique autour du gallium

Métal rare (minor metal), critique, stratégique, «vert», indispensable aux technologies de pointe, etc. Voici les appellations les plus courantes attribuées à un groupe d'éléments dont fait partie le gallium, mais que vaut au gallium de telles dénominations ?

1.1 Description du gallium et définitions de ses appellations

Le gallium, dont l'existence avait été prédite par Mendeleev en 1871, n'a été observé qu'en 1875 par le français Paul Emile Lecoq de Boisbaudran (Yu et Liao, 2011). Boisbaudran a d'abord épinglé le métal spectroscopiquement et a ensuite seulement réussi à isoler le métal lui-même : une infime quantité extraite à partir de plusieurs tonnes de zinc (Vulcan, 2009). Le gallium tire son nom de Gallia – la Gaule en latin, l'ancien nom de la France.

Le gallium appartient, comme le bore, l'indium, le thallium et l'aluminium, au groupe 13 (ou IIIA) des éléments. Le gallium est un métal amphotère c'est-à-dire qu'il a un comportement tantôt acide, tantôt basique. Il se dissout dans les solutions alcalines, pour donner des gallates, et dans les acides minéraux, à l'exception de HNO_3 qui le passive (Blazy et Jdid, 2011). Le tableau 1 reprend ses caractéristiques et propriétés.

Tableau 1 : Caractéristiques et propriétés du Gallium

Propriétés Générales	Unité	Valeur
Nombre atomique		31
Groupe, période, bloc		13, 4, p
Poids atomique	g mol^{-1}	69,723
Apparence à l'état solide		couleur gris-bleu
Apparence lorsqu'il est ultra-pur		blanc argenté
Structure cristalline		Orthorhombique
Température de supraconductivité	$^{\circ}\text{C}$	-272,067
Point de fusion	$^{\circ}\text{C}$	29,76
Point d'ébullition	$^{\circ}\text{C}$	2.204
Densité (20 $^{\circ}\text{C}$)	kg cm^{-3}	5.904
Densité liquide	kg cm^{-3}	6.095
Conductivité thermique	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	29
Résistivité électrique	$\text{m } \Omega \text{ cm}$	14
Tension de vapeur à 1.570C	mm Hg	10
Volume molaire	cm^{-3}	11.8
Chaleur spécifique	J gK	0.37
Isotope		64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75 *
Etats d'oxydation		3 (oxyde amphotère)

Sources: Roskill (2011), Blazy et Jdid (2011), Yu et Liao (2011)

Seul le ^{69}Ga et le ^{71}Ga sont stables, mais c'est le ^{69}Ga qui prédomine (60.108%) (Roskill, 2011).

Le gallium est un des quatre éléments (avec le mercure, le césium et le rubidium) qui peut être liquide à une température proche de la température ambiante. En effet, son point de fusion est peu élevé (29,76 $^{\circ}\text{C}$).

En revanche, sa température d'ébullition est très élevée (2.403 $^{\circ}\text{C}$). A l'état liquide, il présente également le phénomène de surfusion. Il reste liquide en-dessous de son point de solidification lorsqu'il est refroidi lentement. Quand le gallium liquide se solidifie, il se dilate de 3,1 %. Donc, son état liquide a une densité plus grande que l'état solide. C'est une caractéristique que possèdent quelques matières comme l'eau et le bismuth. En conséquence, le gallium n'est pas stocké dans des containers en verre ou en métal pour éviter une rupture du container quand il se refroidit. Le gallium diffuse dans le réseau cristallin de la plupart des autres métaux. C'est une autre raison qui justifie que

l'on n'emploie pas de récipient en acier ou en aluminium pour stocker le gallium. Le gallium à l'état solide reste suffisamment mou pour être coupé au couteau (Blazy et Jdid, 2011).

Le gallium s'allie avec de nombreux autres métaux. On ne le rencontre pratiquement jamais à l'état libre dans la nature. Il est toujours en association soit avec le zinc et le germanium, soit avec l'aluminium, ses voisins dans le tableau périodique (Barron et al, 2011).

Le gallium n'est pas considéré par l'Agence de protection de l'environnement américaine comme présentant des risques de cancer via l'inhalation ou l'ingestion. Par contre, il peut être toxique en cas d'inhalation de vapeur ou d'ingestion, particulièrement si les doses dépassent celles habituellement présentes dans notre environnement ou alimentation (127ng de gallium par gramme de riz ou 656ng de gallium par gramme de bœuf) (CAS 7440-55-3 ; Bernstein, 2006). Il peut également être toxique en contact avec la peau et irritant pour les yeux et la peau (CAS 7440-55-3).

Du point de vue géologique, le gallium n'est pas considéré comme un élément rare, son abondance étant estimée à 19ppm (g/tonne) dans les roches de l'écorce terrestre et à 0,03ppb ($\mu\text{g/L}$) dans l'eau de la mer. Il est même le trentième élément le plus abondant sur terre (Yu et Liao, 2011).

Cependant, la notion de rareté est évolutive, c'est-à-dire, qu'elle reflète une situation à un moment donné dans le temps qui n'est pas uniquement liée à l'abondance de l'élément. En effet, alors que l'aluminium est le troisième élément le plus abondant de la croûte terrestre, il a longtemps été considéré comme rare du fait de la difficulté de son extraction à partir de ses composants naturels. Ce n'est qu'à partir du développement d'un procédé permettant sa production en masse qu'il n'a plus été appelé comme tel (Madehow, s.d.).

D'autre part, les termes 'métaux rares', bien que largement utilisés, ont toujours manqué d'une définition claire et véritable. Même la Minor Metal Trade Association (MMTA), généralement considérée comme l'autorité compétente au sujet de ces métaux, n'a pas de définition ad hoc pour cette expression (Bell, 2010). Le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) indique cependant quatre critères de base pour cerner les contours du groupe des métaux rares (Hocquard, 2009) :

1) Le critère quantitatif : il s'agit de petites productions, allant de seulement quelques tonnes jusqu'à 200.000 tonnes, et qui se distinguent des métaux industriels (métaux de base $> 10 \text{ Mt}$ et minerai de fer $>> 1.000 \text{ Mt}$).

2) Le critère technique : il s'agit majoritairement de sous-produits de l'industrie minière ou métallurgique, mais aussi de produits principaux.

3) Le critère économique : il s'agit de produits de valeur élevée à très élevée.

4) Le caractère critique : leur importance ne vient pas du chiffre d'affaire qu'ils représentent, mais de leur importance cruciale pour de nombreuses filières industrielles (hautes technologies, TIC, énergies renouvelables, nucléaire).

Nous verrons ultérieurement dans ce travail que le gallium vérifie ces quatre critères et peut donc être considéré comme un métal rare. En outre, le gallium est aussi un métal 'high tech'. Il est en effet utilisé dans diverses technologies de pointe telles que les technologies de l'information et de la communication ou les nanotechnologies. Une partie de ce travail sera ainsi consacrée à la description d'un large panel d'applications du gallium.

En tant que métal des hautes technologies, il intervient également dans certaines technologies innovantes associées aux énergies renouvelables, ainsi qu'à la réduction de la consommation énergétique (Hocquard, 2008). C'est pour cette raison qu'il peut aussi être nommé « métal vert ».

Par ailleurs, on attribue aux matériaux à usage militaire le terme ‘stratégique’, tandis que le terme ‘critique’ est lui attribué à ceux pour lesquels une restriction de l’offre extérieure peut causer des préjudices à l’économie nationale (ECEI, 2010a). Un matériau critique a donc une connotation plus large qu’un matériau stratégique, et sa définition peut être considérée comme incluant les applications civiles, industrielles et militaires, dont on mesurerait les effets sur l’économie nationale en cas de limitation de son approvisionnement (NRC, 2007). Comme le gallium est aussi utilisé dans les applications militaires, il est donc également un métal stratégique.

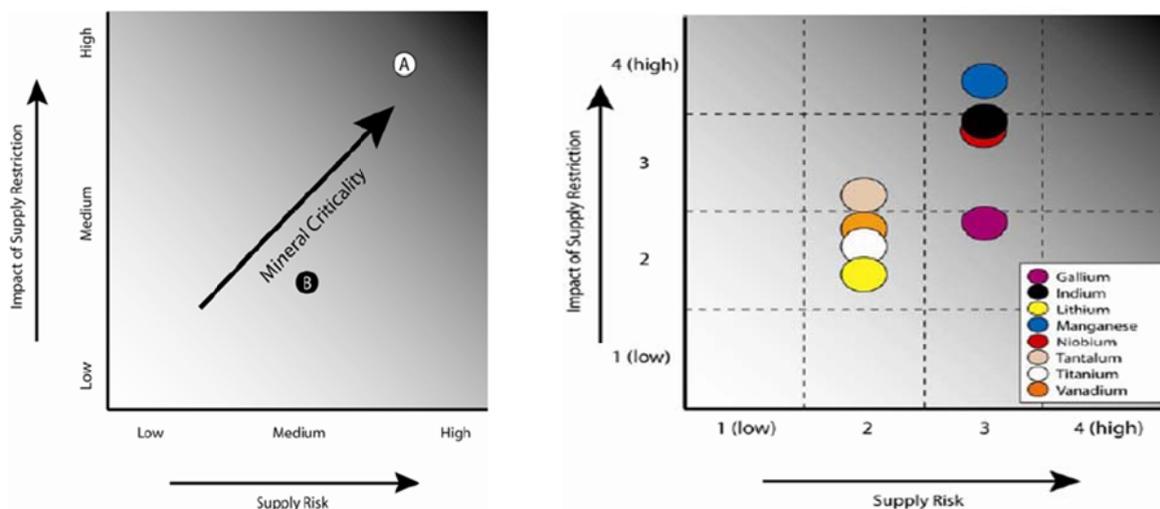
1.2 Détermination du caractère critique

Plusieurs pays ont établi des listes concernant la détermination du caractère critique d’un élément. Dans cette introduction vont être évoquées les approches américaines d’une part et celles de l’Union Européenne d’autre part.

1.2.1 Les études américaines

La méthodologie américaine s’est basée sur une matrice de risque (Figure 1) pour aboutir à une liste de minéraux/métaux critiques (NRC, 2007). L’axe horizontal représente la probabilité d’une limitation, d’une rupture d’approvisionnement du matériau, tandis que l’axe vertical représente les impacts de la limitation de l’approvisionnement si celle-ci devait avoir lieu. Le caractère critique augmente lorsque l’on se déplace du coin inférieur gauche vers le coin supérieur droit. L’élément A est donc plus critique que B.

Figure 1 : Matrice de risque (à gauche) et éléments critiques pour les USA en 2007 (à droite)



Source : NRC (2007)

Une note pour chacun des deux axes a été attribuée à divers minéraux/métaux. La note de l’axe horizontal est notamment établie sur la disponibilité, sur l’approvisionnement primaire et secondaire du matériau, et dépend également du terme (court, moyen ou long). Quant à la note de l’axe vertical, elle tient compte de la possibilité de substitution du matériau ainsi que de l’importance de l’usage celui-ci. Si l’élément A peut être substitué avec plus ou moins de facilité par B, l’impact d’une perturbation dans l’approvisionnement du matériau sera plus faible.

La combinaison des notes a ensuite permis d’obtenir la liste des métaux critiques pour les Etats-Unis. Le gallium fait partie de cette liste d’éléments critiques avec une note de 2,48 pour l’importance globale de son utilisation (axe vertical) et un score élevé de 3 quant au risque d’approvisionnement (axe horizontal) dû aux sources d’approvisionnement, à la possibilité de substitution limitée et aux contraintes de recyclage.

En 2010, une étude du département de l'énergie des USA (DOE, 2010), recourant à la même méthodologie que celle de l'étude expliquée ci-dessus, s'est focalisée sur les technologies des énergies propres. Il ressort de cette étude que le gallium n'est pas critique pour celles-ci ni à court terme (2015) ni à moyen terme (2020). Malgré son importance dans ces technologies (score de 3 sur l'échelle de 4), le risque d'approvisionnement en gallium était considéré comme étant faible du fait d'une consommation globale en gallium annoncée par USGS¹ à la baisse en 2009.

En décembre 2011, une révision de cette étude considère toujours que le gallium n'est pas critique pour les énergies propres ni à court (2015) ni à moyen terme (2025) (DOE, 2011). L'importance du gallium vis-à-vis des technologies des énergies propres est passée à 2 sur 4. Le risque d'approvisionnement a lui augmenté à 2. Cela se justifie par plusieurs éléments. Le gallium est considéré uniquement par rapport au photovoltaïque, dont la part de marché bien qu'en croissance, est toujours inférieure à d'autres technologies de l'énergie. Par ailleurs, le déploiement de la prometteuse technologie photovoltaïque en couche mince CIGS est encore assez faible. En outre, l'étude prend en compte une intensité matière plus faible des cellules pour un rendement à la hausse, mais note toutefois qu'une diminution de la teneur en indium pourrait entraîner une augmentation de celle en gallium. (DOE, 2011).

1.2.1 Les études de l'Union Européenne

Suite à la flambée du prix des matières premières en 2008, la Commission européenne a lancé l'initiative « matières premières » qui définit une stratégie intégrée pour répondre aux différents obstacles liés à l'accès aux matières premières non énergétiques et non agricoles. Cette initiative repose sur trois piliers, qui consistent (i) à garantir des conditions équitables en matière d'accès aux ressources dans les pays tiers ; (ii) à favoriser un approvisionnement durable en matières premières auprès des sources européennes ; (iii) et à dynamiser l'efficacité des ressources et de promouvoir le recyclage (EC, 2011). Cependant, ni définition ni liste de matières premières critiques n'avait été présentée.

Certains états membres avaient pris les devants et avaient réalisé des études à ce sujet, mais celles-ci ne reflétaient que leur situation nationale. En 2010, alors que l'Europe se trouve dans une position particulièrement vulnérable du point de vue des matières premières non énergétiques, elle détermine enfin elle aussi sa liste d'éléments critiques. Sa position inconfortable s'explique d'une part parce que l'Europe est fortement dépendante des importations pour beaucoup de matières premières qui sont de plus en plus affectées par une pression grandissante de la demande. D'autre part, bien que l'Europe dispose encore de matières premières sous-exploitées ou inexploitées, plusieurs contraintes, dont le temps pour débiter une production, compliquent l'accès à ces ressources.

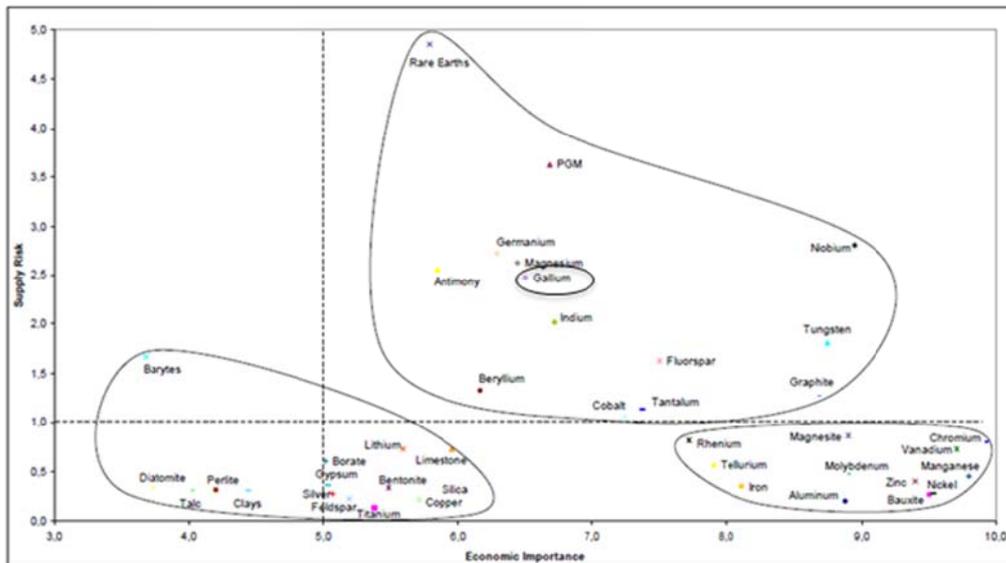
Pour l'Union Européenne, une matière première sera qualifiée de critique si elle fait face à des risques élevés quant à son accès, c'est-à-dire des risques élevés d'approvisionnement, si elle présente des risques environnementaux élevés, et si elle est d'une importance économique élevée (ECEI, 2010a).

Le groupe de travail de l'Union Européenne a choisi une méthodologie quantitative sur base d'indicateurs donnant une vue statique de la situation. Les risques d'approvisionnement couvrent une période de 10 ans et prennent en compte la stabilité politique et économique des pays producteurs, le niveau de concentration de la production, le potentiel de substitution d'un élément et son taux de recyclage. L'importance économique a été évaluée non pas par rapport à la demande future mais sur base des chiffres actuels (ECEI, 2010a). Cependant, une évaluation qualitative a complété l'approche principale. En l'occurrence, une analyse des développements technologiques a été réalisée dans le but de décrire l'évolution potentielle de l'usage des matières premières.

¹ USGS: Institut d'études géologiques des USA – organisme gouvernemental américain qui se consacre aux sciences de la Terre.

La première étape de l'étude européenne a consisté à calculer l'importance économique et les risques d'approvisionnement de 41 matières premières susceptibles d'être critiques pour l'Union. Les résultats de ces calculs sont combinés sur la figure 3 où l'axe X représente la position d'un élément par rapport à son importance pour l'économie européenne et l'axe Y celle relative aux risques d'approvisionnement. Le sous-groupe le plus haut sur la figure reprend les éléments critiques pour l'Union Européenne. Comme c'était le cas pour les USA, le gallium fait partie de cette liste.

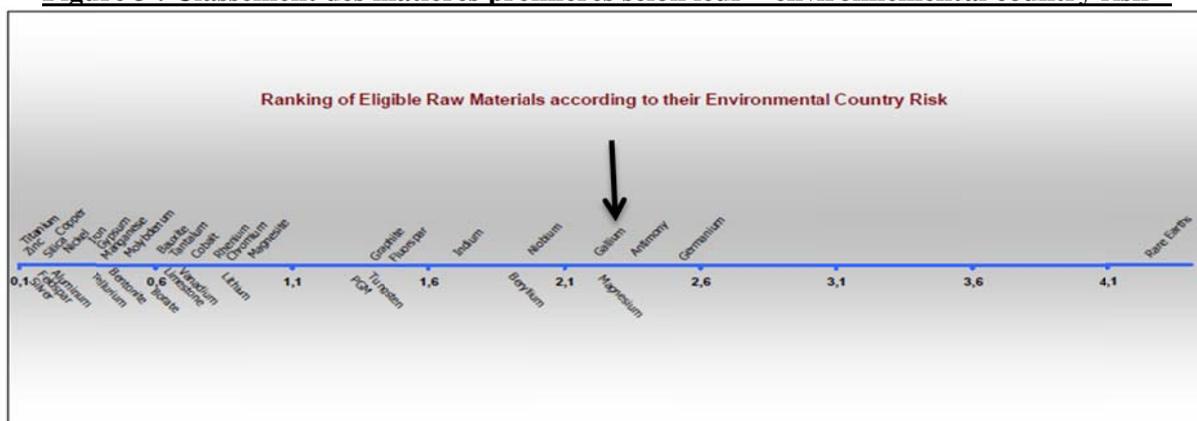
Figure 2 : Importance économique et risques d'approvisionnement pour les 41 matières premières analysées ; Sous-groupes au caractère critique variable identifiés par l'UE.



Source : ECEI (2010a)

La deuxième phase de l'étude a évalué l'« Environmental country risk ». Il s'agit de l'évaluation du risque d'une limitation de l'approvisionnement consécutive aux mesures prises par un pays sous couvert de protéger l'environnement (ECEI, 2010a). Cela a été fait pour éventuellement étoffer la liste déjà établie dans la première étape. Le résultat de cette analyse est représenté sur la figure suivante et indique que la liste des éléments critiques n'a pas été modifiée par cette seconde analyse.

Figure 3 : Classement des matières premières selon leur « environmental country risk »



Source : ECEI (2010a)

Pour le gallium, les résultats de l'étude sont résumés dans le tableau 2 et sont comparés avec les résultats calculés pour l'indium. Alors que les scores du gallium sont supérieurs à ceux de l'indium pour deux des trois axes analysés, et en particulier pour celui relatif au risque d'approvisionnement, il n'y avait pas en juin 2011 de projet de recyclage post-consommation permettant la récupération du gallium tant au niveau européen qu'au niveau mondial (Escalon, 2011). Par contre, on en dénombrait

sept pour l'indium (Escalon, 2011). On peut se demander ce qui justifie une telle différence. Peut-être existait-il certains projets non encore approuvés par une autorité compétente au moment de l'étude ?

Tableau 2 : Résultats d'analyse pour le Ga (à gauche) et résultats d'analyse pour l'Indium (à droite).

Results		Results	
Economic importance	6,5	Economic importance	6,7
Supply Risk	2,5	Supply Risk	2,0
Environmental Country Risk	2,2	Environmental Country Risk	1,7

Source : ECEI (2010b)

En octobre 2011, les résultats d'une étude de l'Institut pour l'Energie et le Transport du Joint Research Centre de la Commission Européenne ont révélé une liste de métaux qui pourraient constituer un obstacle aux technologies de l'énergie bas carbone et à leur déploiement en cas de problème d'approvisionnement. Cette étude a plus particulièrement examiné l'usage de ces métaux dans six initiatives faisant partie du SET-Plan (Strategic Energy Technology Plan) de l'Union Européenne : le nucléaire, le solaire, l'éolien, la bioénergie, la capture et le stockage du carbone et le réseau électrique. L'étude conclut que cinq métaux, dont le gallium pour son emploi dans le photovoltaïque, sont particulièrement à haut risque pour le développement de ces technologies.

Pour rappel, le SET-Plan vise à s'attaquer au changement climatique en réduisant les émissions de gaz à effet de serre, à augmenter la sécurité de l'approvisionnement énergétique et à renforcer la durabilité et la compétitivité de l'économie européenne (JRC, 2011).

1.3 Problématique

Compte-tenu de la définition employée, le fait qu'un matériau soit critique implique de facto une menace pour l'économie européenne, et constitue donc un problème potentiel. De plus, le caractère critique d'un élément est influencé par différents paramètres (ECEI, 2010a).

Tableau 3 : Demande globale en 2006 et 2030 en matière première requise pour les technologies émergentes analysées.

Raw material	Production 2010 (t)	Production 2006 (t)	⁽¹⁾ ETRD 2006 (t)	⁽¹⁾ ETRD 2030 (t)	Indicator ⁽²⁾ 2006	Indicator ⁽³⁾ 2030
Gallium	182	152	28	603	0.18	3.97
Indium	574	581	234	1.911	0.40	3.29
Germanium	100-120	100	28	220	0.28	2.20
Niodymium	-	16.800	4.000	27.900	0.23	1.66
Platinum	-	255	Very small	345	0	1.35
Tantalum	670	1.384	551	1.410	0.40	1.02
Silver	22.200	19.051	5.342	15.823	0.28	0.83
Cobalt	62.000	62.279	12.820	26.860	0.21	0.43
Palladium	-	267	23	77	0.09	0.29
Titanium	6.300	7.211	15.397	58.148	0.08	0.29
Copper	16.200	15.093	1.410	3.696	0.09	0.24
Ruthenium	-	29	0	1	0	0.03
Niobium	63.000	44.531	288	1.410	0.01	0.03
Antimony	187.000	172.223	28	71	0.01	0.01
Chromium	23.000	19.825	11.250	41.900	0.01	0.01

(1) ETRD : demande en matière première pour les technologies émergentes

(2) Indicateur de la part de la production mondiale de 2006 d'une matière première spécifique qui revient aux technologies émergentes.

(3) Indicateur de la part de la production mondiale en avril 2010 d'une matière première spécifique qui reviendrait en 2030 aux technologies émergentes.

Les données mises à jour par BGR en avril 2010. Source : ECEI (2010a)

Une des forces les plus puissantes influençant le fait qu'un matériau est critique est le changement technologique (ECEI, 2010a). Comment les technologies émergentes vont-elles influencer la demande en matériau critique ? En l'augmentant ou en la diminuant ? Suivant l'impact, un matériau pourra perdre son caractère critique alors que celui d'un autre sera peut-être renforcé.

Les technologies émergentes sont en fait des technologies en phase de croissance, ou susceptibles d'applications industrielles (car elles sont souvent encore en développement ou en test), qui stimulent de façon révolutionnaire l'innovation au-delà des frontières des différents secteurs industriels, et qui par là même changent le tissu des structures économiques, de la vie sociale et de l'environnement sur le long terme (ECEI, 2010a). Le tableau de la page précédente reprend les résultats d'une analyse de l'importance de ces nouvelles technologies sur la demande de matériaux critiques.

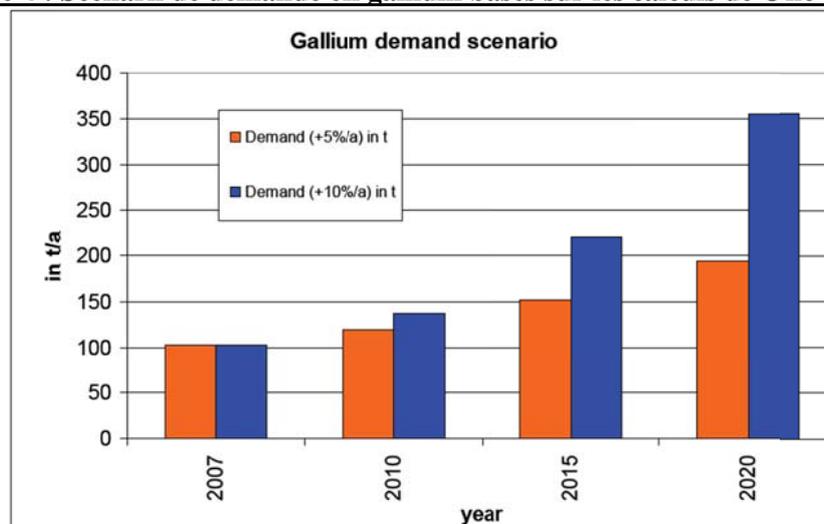
Les technologies analysées pour le gallium sont le «photovoltaïque couches minces», les circuits intégrés et les diodes électroluminescentes émettant de la lumière blanche. La lecture du tableau 2 nous enseigne que la demande en gallium pour les technologies émergentes pourrait être multipliée par 20 entre 2006 et 2030. C'est bien sûr une augmentation importante qui soulève de nombreuses questions, d'autant plus que ces chiffres ne tiennent pas compte du contexte économique mondial (ECEI, 2010a). La reprise économique, quand elle arrivera, pourrait conduire elle aussi à augmenter la demande future en matières premières.

En fait, une prévision précise de la demande globale est difficile du fait de la multitude d'applications du gallium, mais un taux annuel de croissance de la demande compris entre 5 et 10 % semble être réaliste (UNEP, 2009). Des exemples concrets de la complexité de prévision seront présentés dans le chapitre relatif aux applications.

La figure suivante représente la demande en gallium exprimée en tonne pour les deux scénarii précités. D'ici 2020, avec un taux annuel de croissance de la demande de 10 %, celle-ci ferait plus que doubler. Roskill estime même que la demande en gallium en 2010 peut même déjà avoir atteint 280 tonnes (Roskill, 2011).

D'une manière générale, toutes les études reconnaissent le fait qu'il y a beaucoup d'inconnues pour établir les estimations de consommation et de demande du gallium. Il y a notamment celles relatives aux achats ou souhaits d'achat de gallium par les gouvernements pour constituer des stocks de réserve. Il ne semble pas que ce soit le cas en Europe. Par contre, ce fût le cas au Japon en 2009.

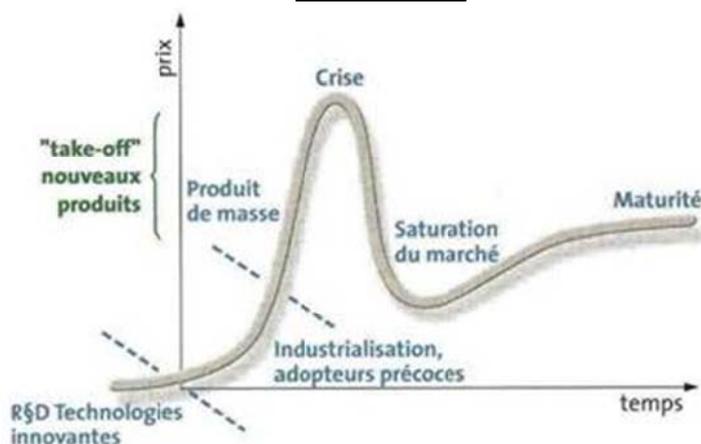
Figure 4 : Scenarii de demande en gallium basés sur les calculs de Öko-Institut



Source : UNEP (2009)

Qu'en est-il de l'offre ? Si l'offre venait à ne pas rencontrer la demande, une crise serait alors à craindre. Les métaux des hautes technologies se caractérisent par des demandes soudaines et très fortes, induites par un nouveau produit de masse issu d'une nouvelle technologie (Hocquard, 2008). Du point de vue de l'offre, ils se caractérisent par des productions faibles et souvent seulement en tant que sous-produits (Hocquard, 2008). La production est donc inélastique et de ce fait s'adapte plus difficilement à la demande (Hocquard, 2008). Il peut donc en résulter un rapide déséquilibre entre l'offre et la demande qui se traduirait par une crise des cours (Hocquard, 2005). Le mécanisme qui aboutit à la crise est représenté à la figure 5.

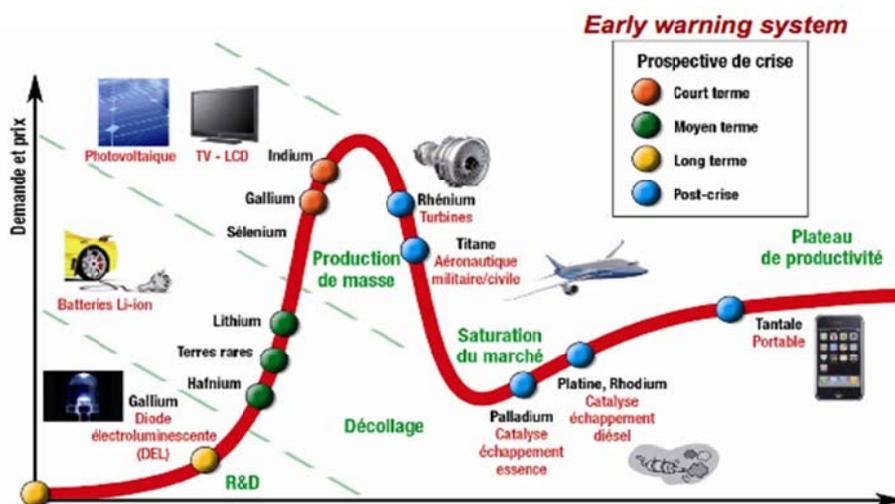
Figure 5 : Mécanisme de crise structurelle liée à une innovation technologique pour les métaux « high-tech ».



Source : Hocquard (2005)

Pour le gallium, on a ainsi deux crises structurelles potentielles comme le montre la figure 6 : i) une crise à court terme principalement due à un prix relativement élevé et à la demande croissante et proche du maximum de production pour l'application la plus importante actuellement, à savoir les « photovoltaïques films minces » ; ii) et une à plus long terme due à la diode à lumière blanche.

Figure 6 : Prospective et crises potentielles pour certains métaux.



Source : Hocquard (2010)

Le PNUE tirait lui aussi la sonnette d'alarme en 2009. Il mentionnait que certains éléments nécessitaient une attention particulière à différentes échelles de temps, étant donné leur utilisation dans les technologies durables. Le tableau 4 indique que le gallium se trouvait déjà dans les matières les plus prioritaires.

Tableau 4 : Résumé de la priorité et de l'urgence dans le temps des éléments critiques pour les technologies durables futures.

timeline	Metal
short-term (within next 5 years) + rapid demand growth + serious supply risks + moderate recycling restrictions	Tellurium Indium Gallium
mid-term (till 2020) + rapid demand growth and + serious recycling restrictions or + moderate supply risks + moderate recycling restrictions	Rare earths Lithium Tantalum Palladium Platinum Ruthenium
long-term (till 2050) + moderate demand growth + moderate supply risks + moderate recycling restrictions	Germanium Cobalt

Source : UNEP (2009)

1.4 Objectifs et questions de recherche

L'importance économique du gallium qui est de 6,5 sur 10 pour l'UE semble être légèrement supérieure à celle des Etats-Unis qui est de 2,48 sur 4, ce qui correspond à 6,2 sur une échelle de 10.

Par ailleurs, le gallium est critique pour l'Union Européenne pour le déploiement des technologies relatives à l'énergie dans le cadre du SET-Plan. Il ne l'est pas pour les USA pour ces mêmes technologies.

Ces deux arguments impliquent que ce travail se consacrera donc plus spécialement à la problématique de l'Union Européenne.

Première question : Dans un contexte où le caractère critique du gallium pour l'UE est affirmé et où sa demande est indéniablement en augmentation, la production secondaire, particulièrement celle à partir d'applications en fin de vie, peut-elle changer la donne ?

Deuxième question : La pression sur l'offre pour satisfaire les besoins des technologies émergentes doit-elle impliquer une permissivité environnementale plus élevée pour la production du gallium ?

Pour répondre à ces questions de recherche, le premier objectif de ce mémoire sera la mise en parallèle de la consommation du gallium (ou de son estimation) avec les ressources disponibles issues de la production primaire et de la récupération, de façon à déterminer si ces ressources sont et seront suffisantes pour couvrir les besoins actuels et futurs en gallium.

Le deuxième objectif sera de déterminer l'importance et la viabilité environnementale et économique de la production secondaire et ses incitants, notamment européens.

Outre le recyclage du gallium, d'autres pistes d'actions seront discutées pour réduire son caractère critique. La substitution sera évoquée mais on peut déjà annoncer que pour certaines applications, il n'existe pas actuellement de substituts satisfaisants aux composés du gallium.

1.5 Méthodologie

La méthode de travail va consister en deux étapes :

La première étape consiste en une recherche d'information dans des articles se trouvant dans diverses bases de données ou librairies ainsi que par des recherches via internet, le but étant d'identifier et d'analyser :

- les acteurs responsables de la production primaire du gallium
- les impacts et enjeux environnementaux et économiques de cette production primaire
- les différentes applications du gallium
- les acteurs responsables de production secondaire du gallium en Europe
- les impacts et enjeux environnementaux et économiques de cette production secondaire
- la stratégie européenne, les recommandations ou programmes mis en place

La deuxième étape consiste en une enquête auprès de certains acteurs importants du gallium de façon à pouvoir compléter ou confirmer les informations obtenues lors de l'étape précédente. Cette enquête et les acteurs interrogés sont renseignés en annexe.

2. Production primaire et raffinage du gallium : le monopole asiatique; l'Europe à la traîne

2.1 Introduction

Schématiquement, voici les étapes de la chaîne du gallium dans ses principales applications. Les trois premières étapes vont être détaillées dans ce chapitre. Les autres le seront ultérieurement.

Figure 7 : La chaîne du gallium.



Source : JRC (2011)

Les objectifs de cette description sont multiples :

- montrer la complexité à obtenir du gallium de haute pureté à partir de sources primaires
- révéler l'inefficacité globale de la production primaire actuelle
- mettre en évidence les impacts critiques des étapes de production sur l'environnement

2.2 Les sources de gallium

Plus abondant que certains autres éléments, son abondance moyenne est en effet de 19ppm dans la croûte terrestre alors que par exemple celle du plomb n'est que de 16ppm, le gallium est néanmoins très dispersé et donc plus difficile à extraire : il ne forme pas de minerai naturel exploitable économiquement à l'heure actuelle. Il y a notamment la sönngéite (hydroxyde de gallium ($\text{Ga}(\text{OH})_3$)) et la gallite (CuGaS_2) qui est un minéral très rare, exceptionnel et de très petite taille (1,6mm) présent dans les gisements métallifères tels que la germanite, elle-même un minéral rare (sulfure complexe ($\text{Cu}_{13}\text{Fe}_2\text{Ge}_2\text{S}_{16}$)) et la reniérite (sulfure complexe également ($(\text{Cu,Zn})_{11}(\text{Ge,As})_2\text{Fe}_4\text{S}_{16}$)). On en trouve en Namibie, au Congo et à Cuba (webmineral, s.d.). C'est pourtant dans ceux-ci qu'il peut y avoir la plus grande concentration en gallium (de 0.1%-1%, soit 1.000 à 10.000 ppm). On a même trouvé une concentration allant jusqu'à 1.85% (18.500 ppm) (Ayres et Ayres, 1995).

Pour le reste, le gallium est présent à l'état de trace dans d'autres produits minéraux ou d'origine organique, dont il peut être extrait après concentration (BRGM, 2011). Le tableau 5 reprend les sources en gallium, la concentration moyenne et l'estimation des réserves en gallium lorsqu'elles sont disponibles.

Les sources qui sont commercialement exploitées sont la bauxite, qui est de loin la plus importante, et les résidus de zinc. Ces deux sources sont économiquement rentables pour la production du gallium, parce qu'elles sont avant tout exploitées pour leurs produits principaux qui sont respectivement l'aluminium et le zinc. Économiquement, il ne serait pas rentable d'exploiter la bauxite uniquement pour en extraire du gallium car les concentrations sont trop faibles (Greber, 2002). C'est aussi le cas pour les gisements de phosphate et de charbon, dont le gallium n'est pas récupéré malgré l'importance des réserves (Greber, 2002; BRGM, 2011).

À l'origine de son histoire industrielle en 1943, le gallium était récupéré des fumées et cendres volantes issues de la combustion du charbon (Barron et al, 2011). Aujourd'hui, le gallium n'est récupéré ni à partir du traitement des phosphates ni de la combustion des charbons (BRGM, 2011).

Tableau 5 : Principales sources possibles de gallium, bornes de concentration, concentration moyenne et réserves en gallium dans la source.

Sources	Bornes de concentration du Ga (ppm)	Ga concentration moyenne (ppm)	Réserves de Ga dans la source
Bauxite (Minerai d'aluminium – Ses minéraux spécifiques sont les hydrates d'alumine comme les polymorphes de Al(OH) ₃ (bayerite et gibbsite, monocliniques) et ceux de AlO(OH) (diaspore et boehmite, orthorhombiques). Cette altérite n'est considérée comme minerai d'aluminium que si sa teneur en silice totale ne franchit pas un seuil variable selon les coûts du procédé d'extraction de l'alumine.	33 – 86	50	> à 1 million de tonnes
Sphalérite ou blende (Minéral composé de sulfure de zinc (ZnS))	35		6.500 t
Résidus du raffinage du zinc	5 – 300		
Plumbo-jarosite (PbFe ₆ (SO ₄) ₄ (OH) ₁₂) ⁽¹⁾	1.100 – 3.500		
Kaolin (composé principalement de kaolinite (Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄), soit des silicates d'aluminium)	32 – 86	46	
Autres minéraux silicatés (néphéline ((Na,K)AlSi ₃ O ₈); spodumène (LiAlSi ₂ O ₆), lépidolite (K(Li,Al) ₃ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (F,OH) ₂)	20 – 100		
Gisements de charbon et phosphate	< 10		Plus grande réserve de gallium : plusieurs millions de tonnes
Poussières des fours de combustion du phosphore	200 – 600		
Cendres de charbon	5 – 1.000		

Source: Greber (2002), Elsner et al (2010), Gray et al (2005), Blazy et Jdid (2011), BRGM (2011), USGS (2012a)

(1) Gisement d'Apex Mine –Utah – USA; Cette mine est fermée depuis 1986.

Le gallium est donc uniquement un sous-produit de la production de l'aluminium et du zinc. La production du gallium, à partir des liqueurs issues du traitement de la bauxite selon le procédé Bayer pour l'obtention d'alumine, représente 95 % de la production du gallium (BRGM, 2011).

2.3 Aperçu des procédés d'extraction du gallium

2.3.1 Extraction du gallium comme sous-produit de la bauxite

Le procédé Bayer consiste en la dissolution de la bauxite composée d'alumine monohydratée (Al₂O₃.H₂O) (bauxites européennes et chinoises) ou trihydratée (Al₂O₃.3H₂O) (bauxites tropicales) dans de la soude (NaOH). Les hydrates d'alumine sont dissous sous forme d'aluminate. Certains oxydes métalliques plus basiques (Fe₂O, TiO₂,...) restent inattaqués.

On sépare ensuite ceux-ci de la solution. On obtient une solution d'aluminate contenant également le gallium et appelée liqueur Bayer, et un résidu connu sous le nom de boues rouges. Environ 30 % du gallium contenu au départ dans la bauxite est perdu dans ces boues (Riveros, 1990).

Par diminution de la température et de la pression, il y a précipitation du trihydrate d'aluminium pour la production de l'aluminium métallique. Il s'agit de la cristallisation. Une partie (30 à 40%) du gallium précipite en même temps (Blazy et Jdid, 2011). La liqueur restante ou purge est utilisée pour la production du gallium après plusieurs passages par les étapes précédentes, de manière à accroître la concentration en gallium pour qu'elle soit comprise entre 150 et 250 mg/L (Blazy et Jdid, 2011).

Nous reprenons ci-après les procédés les plus courants d'extraction du gallium (Mishra, 2008).

2.3.1.1 Extraction par électrolyse avec une cathode de mercure

Le gallium est extrait directement par électrolyse dans une cellule à cathode de mercure (Greber, 2002). Suivant les conditions d'opérabilité, il est possible d'obtenir un amalgame titrant 1% de gallium à partir de liqueurs de moins de 300 mg/l (Blazy et Jdid, 2011). L'amalgame est ensuite lixivié en utilisant une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH). Le gallium est finalement récupéré par électrolyse utilisant des cathodes en inox. Malgré le recyclage du mercure, les pertes sont quand même conséquentes et peuvent être comprises entre 500 à 1.000 g pour un kilogramme de gallium (Selvi et al, 2004). Le gallium produit a une pureté de 99%.

Une variante de ce procédé vise à diminuer ces pertes. Elle consiste en la réduction préalable du gallium contenu dans la liqueur par l'utilisation d'un amalgame sodium-mercure (Roskill, 2011). Un amalgame mercure-gallium est ainsi formé. Le gallium en est extrait grâce à une solution caustique et le mercure, qui est à nouveau utilisé pour la production de l'amalgame avec le sodium, circule en boucle fermée (Greber, 2002). Ce processus nécessite des concentrations en gallium très élevées de l'ordre de 150 g par litre et de très faibles teneurs en vanadium, fer, tungstène pour atteindre une efficacité économiquement acceptable (Greber, 2002). Des concentrations aussi hautes sont difficiles à obtenir. Les problèmes de toxicité liés au mercure font également que ces procédés sont peu répandus. Cependant, ils seraient toujours utilisés dans les usines d'un pays membre de l'Union Européenne: la Hongrie (Blazy et Jdid, 2011).

En outre, comme on le verra dans le chapitre suivant, le gallium est utilisé en remplacement du mercure dans certaines applications. Il peut donc paraître contradictoire de recourir au mercure pour produire du gallium. Cependant, comme les impacts environnementaux du mercure dans les pertes (peut-être sous la forme d'un précipité) ne sont pas connus comparativement aux impacts du mercure utilisés dans les applications, on ne peut affirmer que c'est aberrant.

2.3.1.2 Extraction par carbonatation contrôlée ou précipitation fractionnée

Il s'agit d'un processus en deux étapes. La première consiste à injecter du CO₂ dans la solution pour précipiter l'aluminium qui n'a pu être récupéré par le procédé Bayer (Roskill, 2011). Le gallium reste en solution à 90 % environ car il est légèrement plus soluble (Blazy et Jdid, 2011). Une seconde injection de CO₂ plus poussée est effectuée et conduit à la formation d'un précipité titrant entre 0.3 et 1% de gallium (Roskill, 2011). Le précipité est ensuite dissous dans une solution caustique de laquelle le gallium est extrait par électrolyse.

Ce procédé est utilisé en Chine où la main d'œuvre et l'énergie sont peu coûteuses car il en nécessite beaucoup (Moskalyk, 2003).

2.3.1.3 Extraction par réduction directe

Il s'agit d'une opération de cémentation dans laquelle la liqueur Bayer est mise en contact avec un alliage gallium-aluminium appelé « Gallam » et sur lequel vient se déposer le gallium (Gray, 2005). Dans des conditions optimales de température et d'agitation, cette méthode permet d'atteindre un taux de récupération de 99% en 40 minutes à partir d'une solution titrant 0,2 g/L de gallium (Blazy et Jdid, 2011).

Ce type d'extraction, développée par l'Union Soviétique, serait utilisé en Hongrie, en Slovaquie et au Kazakhstan (Gray, 2005; Blazy et Jdid, 2011).

2.3.1.4 Extraction par l'emploi de solvants ou extraction liquide-liquide (Procédé Rhône-Poulenc)

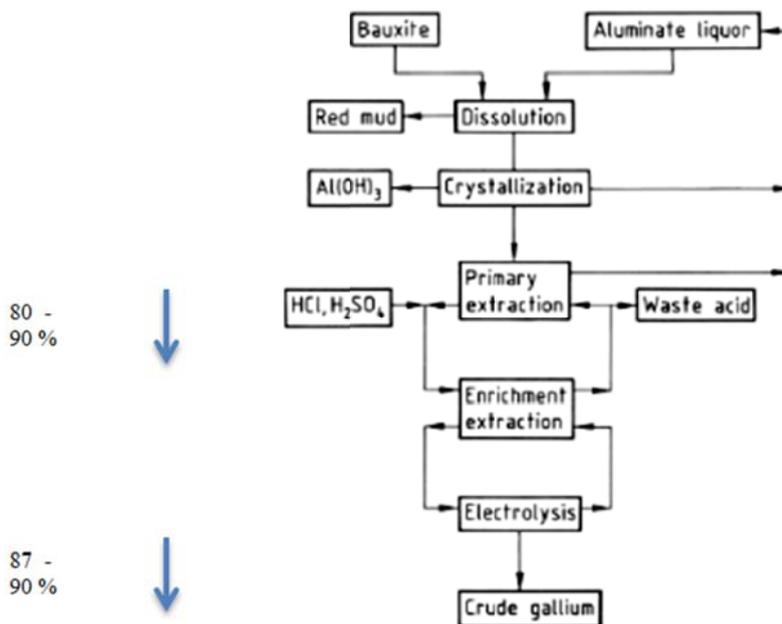
Dans ce procédé, on emploie un dérivé de la 8-hydroxyquinoléine (composé organique de formule brute C₉H₇NO) comme ligand pour extraire le gallium. On a découvert dans les années 70 que ceux-ci

étaient les plus efficaces. Ils ne sont cependant pas très sélectifs en présence de Al et Na. Le ligand commercial utilisé est le Kelex 100 (Blazy et Jdid, 2011).

La formation du complexe ligand-gallium a lieu dans du kérosène. Des taux de récupération du gallium compris entre 80 et 90% sont rapportés dans la littérature (Bautista, 2003; Blazy et Jdid, 2011). Suivant la température de travail et l'ajout d'un certain type de surfactant, la cinétique de formation et le pourcentage de gallium extrait de la solution peuvent être considérablement améliorés : 98% du gallium peut être extrait en 15 minutes avec de l'acide carboxylique (Bautista, 2003; Blazy et Jdid, 2011).

Le complexe organique avec le gallium est ensuite lavé une première fois en utilisant une solution d'acide chlorhydrique ou sulfurique (Greber, 2002). La concentration de l'acide doit permettre le passage de l'aluminium et du sodium retenu par le complexe dans la phase aqueuse, tout en évitant le passage d'une trop grande quantité de gallium (Helgorsky et al, 1976). Il faut noter que l'acide chlorhydrique est plus sélectif vis-à-vis du Al et Na présents dans le complexe que ne l'est l'acide sulfurique (Blazy et al, 2011). Après séparation d'avec la phase aqueuse, la phase organique est ensuite relavée avec une solution d'acide entraînant le passage du gallium dans la phase aqueuse. Le gallium métal est finalement récupéré par électrolyse après concentration par recirculation de la solution d'extraction. Pour l'étape d'électrolyse, l'efficacité d'extraction en laboratoire est comprise entre 87 et 90% (Meijer et al, 2003 ; Bautista, 2003).

Figure 8 : Diagramme représentant l'extraction du gallium selon le procédé Rhône-Poulenc.



Source : Classen et al (2007)

Ce procédé est caractérisé par une grande consommation d'énergie et d'acides. Même si ceux-ci sont réintroduits dans le procédé, on obtient à un moment donné des déchets acides contenant d'autres métaux qu'il faut traiter (Greber, 2002). Cependant, comme il permet de coupler l'élimination précoce de certaines impuretés avec un taux d'extraction relativement bon (en tout cas expérimentalement) et à moindre coût, ce procédé est le plus utilisé (Moskalyk, 2003; Bautista, 2003).

2.3.1.5 Extraction sur résines échangeuses d'ion

Les faibles concentrations en gallium contenues dans les liqueurs Bayer ont entraîné le développement de procédés qui utilisent des résines échangeuses d'ions (Selvi et al, 2004). Plusieurs types de résines

sont possibles. Il y a notamment les résines absorbantes imprégnées de Kelex 100. Lorsque le gallium s'est fixé sur la résine, une solution d'acide chlorhydrique ou sulfurique est utilisée pour éluder le gallium. Le gallium est ensuite précipité. Ce précipité est ensuite à nouveau dissout pour être purifié et concentré par extraction liquide-liquide (Blazy et Jdid, 2011). L'extraction ultime est réalisée avec de l'eau (Blazy et Jdid, 2011). La solution obtenue contient 100 à 130 g/L de Ga (Blazy et Jdid, 2011). Après électrolyse, on obtient un gallium de pureté 4N (99,99%).

D'autres résines, telles que celles avec des sites amidoxines ou à base d'acide hydroxamique, ne sont pas suffisamment sélectives vis-à-vis du vanadium (Selvi et al, 2004; Riveros, 1990). Ce manque de sélection limite le recyclage des résines car leurs sites actifs sont bloqués (Selvi et al, 2004; Riveros, 1990; Blazy et Jdid, 2011).

2.3.2 Extraction du gallium comme sous-produit du traitement du zinc

Le minerai de zinc, la sphalérite, est grillé pour enlever le soufre et produire l'oxyde de zinc (ZnO). La scorie résultante contient du plomb, du fer et du gallium. Le zinc est produit par lixiviation de l'oxyde de zinc. Le gallium est solubilisé avec le fer. Le gallium peut donc être extrait soit des résidus de lixiviation de l'oxyde de zinc (ZnO), soit des scories de la pyrométallurgie.

2.4 Evolution mondiale de la production primaire du gallium et des capacités de production

Tableau 6 : Evolution de 2005 à 2011 de la production primaire, de la quantité de gallium raffiné et des capacités de production et de raffinage du gallium.

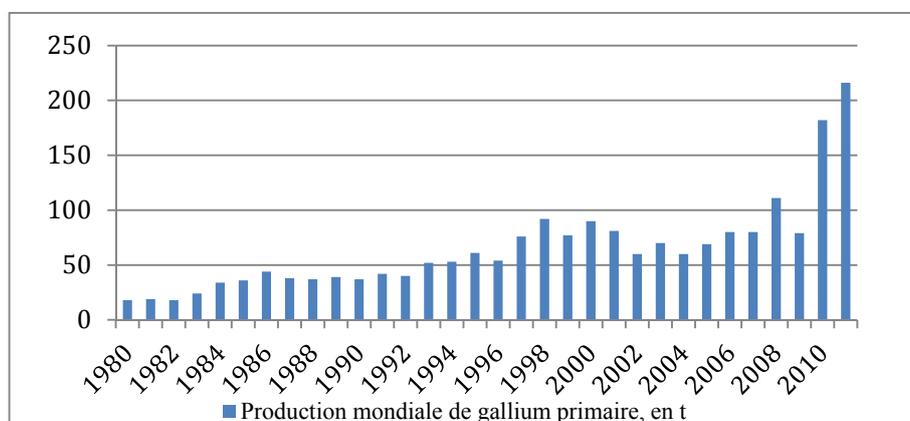
Année	Production Primaire (t)	Gallium raffiné (t)	Capacité de production (t)	Capacité de raffinage (t)
2011	216	310	Entre 260 et 320	270
2010	182	161*	184 **	177
2009	79	118	184	167
2008	111	135	184	167
2007	80	103	184	167
2006	80	99	160 **	152
2005	69	91	160 **	140

Source: USGS (2012a), USGS (2011a), USGS (2010a), USGS (2009a), USGS (2008), USGS (2007a), USGS (2006a)

* Valeur correspondant à la production primaire annoncée de 106 t et non réévaluée suite à la révision de celle-ci.

** D'autres valeurs revues à la hausse pour ces années peuvent être trouvées dans la ligne « total » du tableau 7.

Figure 9 : Evolution de la production mondiale de gallium primaire entre 1980 et 2011 (en t).



Source: BRGM (2011), USGS (2012a), USGS (2011a).

2.4.1 La production primaire

Comme l'indique la figure 9, la tendance globale de la production primaire mondiale est à la hausse malgré quelques diminutions certaines années. Pour 2011, cette hausse est même très importante puisqu'elle est de 19% par rapport à 2010. Cette augmentation de la production primaire est poussée par la demande croissante en gallium pour son utilisation dans des applications de plus en plus diversifiées. C'est que nous verrons dans le chapitre suivant.

On constate cependant une baisse de la production primaire entre 2002 et 2006 ainsi qu'en 2009. La chute de production de 2002 fait suite à une diminution de la demande dans l'industrie des télécommunications et une baisse du prix du gallium. 2004 quant à elle est marquée, d'une part, par la fermeture temporaire au Kazakhstan de l'unité de production suite à un marché dépressif et d'autre part, par la faillite de GEO Specialty Chemicals. En conséquence, l'unité de production du gallium située en Allemagne opérait à seulement 30% de sa capacité. Elle a ensuite été rachetée en joint-venture par Recapture Metals Limited et par le groupe MCP.

La production de gallium en 2009 suit un affaiblissement de la demande en gallium dû au ralentissement économique de 2008.

Bien qu'orientée à la hausse, on peut donc dire que la production primaire reste sensible et est calquée sur les événements externes et les estimations de la demande.

2.4.2 Les capacités de production

Lorsque l'on regarde les tableaux 6 et 7, on constate que les capacités de production mondiales sont clairement en augmentation avec une hausse comprise entre 62 et 80% entre 2005 et 2011².

C'est le résultat de nouvelles unités de production en Corée du Sud, pays qui fait son entrée dans le monde restreint des pays producteurs de gallium primaire, et d'unités additionnelles en Chine où la capacité de production primaire de gallium a été multipliée par 2,4 entre 2010 et 2011. Il est apparemment plus facile d'installer une usine de production en Chine qu'ailleurs, du fait des réglementations plus favorables, mais également de par le grand nombre de petits producteurs d'alumine/aluminium souhaitant diversifier leurs revenus (Roskill, 2011). L'augmentation des capacités est également due à une hausse de capacité de production d'usines existantes, comme celle détenue par RUSAL en Ukraine (Roskill, 2011).

L'autre constat que l'on peut tirer, c'est la diminution de l'écart entre la production et les capacités de production. Roskill estime la production primaire de gallium en 2010 à une valeur située entre 201 et 212 tonnes pour une capacité comprise entre 256 et 261 tonnes. Il faut cependant noter que les capacités peuvent être augmentées jusqu'à un certain point, au-delà duquel l'accroissement incrémental de production peut ne plus être économiquement viable, car tous les minerais de bauxite et les liqueurs Bayer résultantes n'ont pas la même teneur en gallium (Roskill, 2011).

² Suivant les chiffres de capacité utilisés pour 2005 (valeur revue ou non) et si on considère une capacité moyenne de 290 tonnes pour 2011.

Tableau 7 : Evolution des capacités de production primaire de gallium par pays.

Pays	Capacités mondiales de production de gallium primaire (t)											
	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Allemagne	20	30	30	35	35	35	35	35	35	35	35	35
Australie	50	50	50	50	50	50	-	-	-	-	-	-
Chine	8	20	20	40	40	47	59	59	59	59	59	141
Corée du Sud	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16
France	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hongrie	4	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Japon	7	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	10
Kazakhstan	20	20	20	20	20	20	20	25	25	25	25	25
Russie	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	10
Slovaquie	3	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	-
Ukraine	3	5	3	3	3	3	10	10	10	10	10	15
USA	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	153	183	178	203	203	210	179	184	184	184	184	260

Sources : USGS (2012b), USGS (2011b), USGS (2010d), USGS (2009b), USGS (2007b), USGS (2006b), USGS (2004), USGS (2003a), USGS (2002), USGS (2001), USGS (2000), USGS (1999)

Note : ces chiffres incluent la capacité des unités en fonctionnement ainsi que celle des unités en arrêt provisoire.

2.4.3 Les grands acteurs de la production primaire

Tableau 8 : Estimation de la production primaire de gallium par pays pour 2010.

Pays	Production (t)
Allemagne	32
Chine	Entre 116 et 118
Corée du Sud	Supérieure à 10
Hongrie	3 ou 4
Japon	Entre 2 et 4
Kazakhstan	Entre 19 et 22
Russie	Entre 4 et 7
Ukraine	15

Source : Roskill (2011)

En 2010 et en 2011, les leaders de la production primaire de gallium ont été la Chine, l'Allemagne, le Kazakhstan et l'Ukraine (USGS, 2011a; USGS, 2012a). Les autres pays producteurs sont la Corée, la Hongrie, le Japon et la Russie mais avec un tonnage annuel beaucoup plus faible (USGS, 2011a; USGS, 2012a).

En 2010, les pays de l'Union Européenne, l'Allemagne et la Hongrie ne représentaient que 17% de la production primaire de gallium. Alors que la Chine comprend plusieurs producteurs dont un ayant 5 usines, l'UE n'a que deux producteurs de gallium primaire, ayant chacun une unité de production : le consortium MCP/Neo Material Technologies Inc à Stade en Allemagne et MAL Hungarian Aluminium Ltd en Hongrie.

Comment l'Union Européenne peut-elle donc dans une telle position répondre à une demande croissante, en particulier pour atteindre les objectifs du SET-Plan? Dans son étude de 2011, le JRC estime cependant les risques liés à la concentration de l'offre en gallium et aux limitations d'expansion des capacités de production comme étant moyens. C'est justifié par le temps nécessaire à l'installation d'une unité d'extraction de gallium et balancé par le coût raisonnable (€ 20 millions) nécessaire à cette installation, mais aussi par les réserves importantes de bauxite en Europe.

Tableau 9 : Réserves européennes de gallium sur base des dépôts de bauxite relevés dans l'Union Européenne.

Country	European Bauxite Reserves (kt)	European Gallium Reserves (t)
Greece	600,000	12,000
Hungary	300,000	6,000
Turkey	80,000	1,600
Romania	50,000	1,000
France	30,000	600
Italy	5,000	100
Spain	5,000	100

Source : JRC (2011)

Ces réserves ont été calculées sur base d'une teneur moyenne en gallium de 50 ppm dans la bauxite et d'un taux moyen d'extraction du gallium de 40%. Ce taux semble réaliste sur base de ceux trouvés dans la littérature qui ne sont toutefois que des données expérimentales, et non des informations concrètes fournies par les producteurs. Par ailleurs, la Pologne possède des dépôts de zinc non exploités et qui contiendraient des réserves de gallium évaluées fin 2008 à 120 tonnes (Roskill, 2011).

Néanmoins, il faut souligner qu'aujourd'hui encore, l'Allemagne, malgré sa production primaire, est un importateur significatif de gallium en provenance de Chine derrière les USA. De plus, la Chine et la Russie ont imposé des restrictions commerciales concernant le gallium (EICE, 2010).

2.4.4 Efficacité d'extraction du gallium

Que ce soit au niveau mondial ou européen, les réserves en gallium dans la bauxite devraient a priori couvrir les besoins en gallium pendant encore de nombreuses années. Cependant, seule une partie de ces réserves est réellement exploitée et exploitable compte-tenu des caractéristiques techniques des unités d'extraction et de leur nombre. En effet, pour 2010, le taux d'extraction du gallium est très faible comme le montre le calcul suivant.

La quantité de bauxite extraite en 2010 est de 209.000.000 tonnes (USGS, 2012c). Si on considère une concentration moyenne de 50 ppm dans la bauxite, le gallium contenu dans la bauxite extraite en 2011 doit correspondre à une quantité de 10.450 tonnes.

La quantité de zinc extraite en 2011 est de 12.000.000 tonnes (USGS, 2012d). Selon la teneur (46 à 57 ppm) utilisée par Roskill pour estimer la quantité potentielle de gallium produite à partir de zinc en 2009, on arrive à une quantité potentielle de gallium comprise entre 552 et 684 tonnes pour 2010.

On arrive donc à une production théorique de gallium qui se situe entre 11.002 et 11.134 tonnes pour 2010. Or, dans la pratique, la production primaire de gallium pour 2010 est estimée par USGS à 182 tonnes et par Roskill à 212 tonnes. Ceci correspond à un faible taux d'extraction du gallium de 1,65 à 1,9 %. Si on retire les 2 à 4 tonnes de gallium produites par le Japon à partir de zinc, on arrive à un taux d'extraction du gallium à partir de la bauxite d'environ 1,88 %.

S'il y a des réserves, le gallium n'en est donc que très faiblement extrait. S'il ne l'est pas, le gallium est considéré comme une impureté dans le procédé de raffinage de l'aluminium (Roskill, 2011). Les réserves en gallium servent peu sans incitants et moyens pour les exploiter. L'Europe est donc mal positionnée dans le créneau qu'est la production primaire du gallium pour satisfaire la demande. Elle est consciente du problème, bien que celui-ci soit minimisé dans les différents rapports sur base des réserves potentielles. Le challenge que constitue l'augmentation de l'extraction du gallium est présenté, mais les solutions concrètes pour le relever manquent.

Depuis la réalisation des études et analyses européennes, le problème s'est accru avec l'hégémonie grandissante de la Chine et la conjoncture économique. L'ouverture de nouvelles mines de bauxite, de même que l'extraction de davantage de bauxite spécialement pour la production de gallium est peu probable (USGS, 2010b).

En dehors de la production primaire, plusieurs solutions s'offrent cependant à l'Europe pour diminuer la pression de la demande en gallium, l'une étant la production secondaire discutée dans le chapitre 4. Même au Japon, le plus grand consommateur de gallium, Dowa, a réduit sa capacité et sa production de gallium primaire mais a auparavant augmenté ses capacités de recyclage (Roskill, 2011). D'une manière générale, le Japon est peut-être le pays le plus avancé en ce qui concerne la sécurité des matières et le recyclage (EP0W, 2011).

2.5 Le raffinage ou la purification du gallium

Cette opération permet de réduire les impuretés du gallium primaire et secondaire. En effet, les applications les plus importantes du gallium, que sont les circuits intégrés et la plupart des appareils optoélectroniques, nécessitent une pureté supérieure à 6 ou 7N. Or, la pureté du gallium produit par les procédés décrits plus avant dans le document ne dépasse pas 4N (99,99% en masse) et est habituellement de 3N (99,9%). C'est également le cas pour le gallium provenant de certains déchets de production.

Les procédés principaux de purification permettent chacun l'élimination d'impuretés particulières. Il y a notamment la distillation sous vide, qui permet de purifier le gallium liquide par filtration sous vide en enlevant l'humidité résiduelle, et en éliminant les impuretés finement dispersées dans le métal ou les gaz dissous (Roskill, 2011). Ceci permet notamment de soustraire le mercure, zinc, cadmium, manganèse et leurs composés (CMET, s.d.). Une autre procédure consiste en plusieurs lavages successifs avec des solutions acides (acide chlorhydrique) et alcalines pour enlever les oxydes métalliques et obtenir du gallium de pureté 4N (BRGM, 2011).

On peut également effectuer un raffinage électrolytique en milieu alcalin (Roskill, 2011). Des niveaux de pureté plus élevés sont ensuite obtenus par raffinage par zone d'un halogénure de gallium (souvent le trichlorure de gallium), suivi d'une électrolyse de l'halogénure purifié ou par cristallisation fractionnée (Roskill, 2011). Dans ce procédé, le gallium fondu est cristallisé par utilisation d'un condenseur de refroidissement. On estime que 90% du gallium est récupéré par ce dernier procédé (Meijer, 2003). Il faut noter que d'autres évaluations de l'efficacité n'ont pu être trouvées.

Le tableau 6 nous montre que tant la capacité de raffinage que la quantité de gallium raffiné sont en augmentation. Comme il est difficile de distinguer capacité de raffinage et capacité de recyclage, il se peut qu'une partie du tonnage soit compté deux fois (USGS, 2012b).

La purification du gallium a lieu principalement en Chine, au Japon, au Royaume Uni à Wellingborough (groupe MCP), et aux Etats Unis. Des opérations de raffinage ont également lieu en France par le groupe Azelis Electronics, et en Slovaquie par CMK. En Hongrie, MAL raffine le gallium qui est produit.

Malgré la difficulté d'isolement du raffinage par rapport au recyclage et l'absence de chiffres précis quant à la production des unités de raffinage, il semble que ce secteur soit lui aussi majoritairement situé en Asie selon les sources du Roskill.

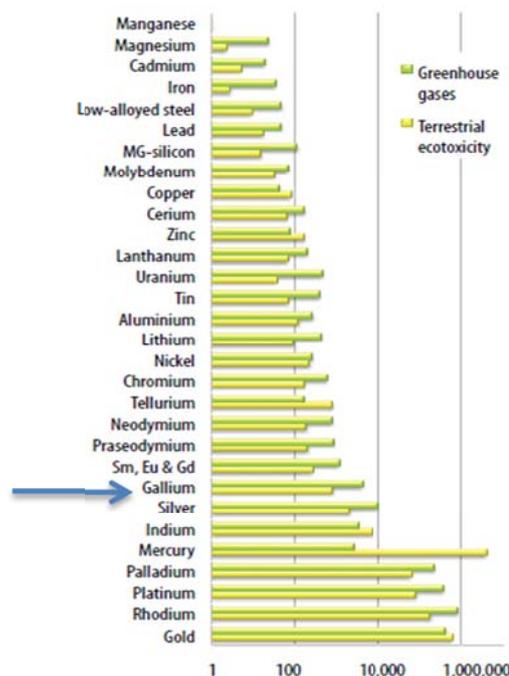
2.6 Les impacts environnementaux de la production primaire et du raffinage du gallium

Les informations concernant les impacts environnementaux de la production primaire et du raffinage font défaut ou datent déjà de plusieurs années. Il existe dans Ecoinvent des données, ainsi qu'un

rapport qui traitent du sujet pour l'obtention de gallium de qualité semi-conducteur. Ce rapport a été publié en 2007 et utilise des chiffres de 2005. Il considère que le gallium est obtenu à partir de liqueur Bayer selon le procédé Rhône-Poulenc schématisé au paragraphe 2.3.1.4. La purification est effectuée par cristallisation fractionnée. Une efficacité de 90% est considérée pour l'électrolyse et la purification conduisant à une efficacité à partir de la solution concentrée de 81%. Ce pourcentage est sans doute élevé par rapport à la réalité, puisqu'il se base sur les bornes supérieures des efficacités obtenues dans des conditions expérimentales précises. Aucun impact du transport n'a été considéré à l'exception de celui des solvants, car on fait l'hypothèse que l'extraction et le raffinage ont lieu dans l'usine d'aluminium qui se trouve par ailleurs en Europe.

Dans le cadre de ce travail, les valeurs des indicateurs ne peuvent pas réellement nous éclairer. En revanche, la comparaison de certains impacts de la production du gallium avec ceux obtenus pour d'autres éléments est intéressante. Celle-ci a d'ailleurs été faite dans le cadre de l'évaluation des impacts environnementaux de la consommation et la production réalisée par l'UNEP. Malheureusement, il n'est pas fait mention des indicateurs utilisés pour obtenir cette figure. Après consultation de la base de données Ecoinvent, il pourrait s'agir des IMPACT 2002+ (Endpoint)/climate change (Horizon de temps considéré : 500 ans) et IMPACT 2002+ (Midpoint)/ecosystem quality (terrestrial ecotoxicity), pour lesquels on retrouve la même corrélation pour les métaux vérifiés (gallium, indium, néodyme, palladium, or) que celle présentée dans la figure provenant de l'étude de l'UNEP.

Figure 10: Graphe de la contribution à l'écotoxicité terrestre et au réchauffement global d'1kg de métal primaire – Réalisé à partir de données normalisées de Ecoinvent.



Source : UNEP (2010a)

La figure 10 rend compte du fait que la contribution de la production d'un kilogramme de gallium au réchauffement global et à l'écotoxicité terrestre est importante. Elle le serait encore davantage avec des efficacités moindres mais peut-être plus proches de la réalité pour l'électrolyse et la purification. Par contre, compte-tenu des quantités produites actuellement qui sont nettement supérieures à celles de 2005, on pourrait peut-être s'attendre à une diminution des impacts. Les impacts sur la toxicité proviennent essentiellement d'émission par des contaminants des minerais et des matériaux annexes utilisés (UNEP, 2010a). Le recyclage se profile à nouveau comme une solution possible visant à réduire ces impacts.

3. Applications du gallium et mise en évidence des points critiques

3.1 Introduction

Après avoir discuté au chapitre précédent de la production primaire et du raffinage du gallium, nous allons aborder dans ce chapitre les différentes applications du gallium. Pour les plus importantes d'entre elles, nous allons essayer de mettre en évidence leurs impacts environnementaux, ainsi que les pertes potentielles en gallium pendant la production et en fin de vie. Cela correspond aux quatre étapes mises en orange dans la chaîne simplifiée du gallium schématisée à la figure 11. Sur cette base, nous tenterons de déterminer les gisements à disposition de la production secondaire.

A l'exception des cellules solaires de type CIGS, le gallium n'est pas utilisé comme tel dans les applications les plus courantes, mais est associé par exemple avec l'arsénique, l'azote ou le phosphore pour former un composant intermédiaire qui va servir de base à la fabrication d'un semi-conducteur. C'est ce dernier, en fonction de ses caractéristiques, qui va être utilisé dans les circuits intégrés des téléphones mobiles, dans les diodes électroluminescentes ou les autres types de cellules photovoltaïques.

Figure 11 : La chaîne du gallium.



Source : JRC (2011)

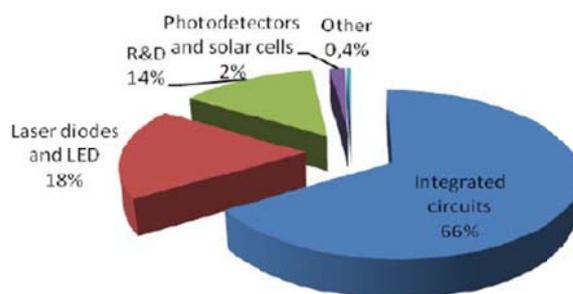
3.2 Aperçu des Applications

Après le début de sa récupération industrielle aux Etats-Unis en 1943, le gallium n'a été que peu utilisé (Blazy et Jdid, 2011). De petites quantités de gallium ont par exemple été employées dans le noyau d'une des bombes atomiques pour contribuer à stabiliser la structure cristalline du plutonium, ainsi également qu'en thermométrie. Ce n'est qu'à partir de 1970 que le gallium a suscité l'intérêt, lorsque l'on a découvert les propriétés semi-conductrices des composés du gallium avec des éléments du groupe 15 (Moskakyk, 2003).

Cependant, bien qu'il soit exploité depuis plus de quarante ans, il n'y a pas de relevés, et donc pas de chiffres disponibles, pour la consommation du gallium en Europe. Il n'y a donc pas non plus de répartition de la consommation européenne entre les différentes applications du gallium. C'est d'ailleurs une des recommandations de l'Union Européenne en matière de gestion des matériaux critiques que d'évaluer celle-ci.

Les dernières études européennes qui concernent les matériaux critiques se basent dès lors sur les chiffres américains et mondiaux. La figure suivante représente la répartition du gallium utilisé entre ses différentes applications en 2007 aux Etats-Unis.

Figure 12 : Répartition du gallium consommé entre ses différentes applications en 2007 aux USA.



Source: ECEI (2010b)

Une répartition de la consommation totale globale entre les applications est estimée pour 2010 dans la dernière édition du Roskill et se base sur une demande correspondant à 280 tonnes de gallium.

Tableau 10 : Répartition de la consommation totale globale de gallium entre les applications.

Application	Estimation du pourcentage de consommation de gallium utilisé dans l'application	Estimation de la borne inférieure du pourcentage de gallium utilisé dans l'application	Estimation de la borne supérieure du pourcentage de gallium utilisé dans l'application
Circuits intégrés	51	50	70
Appareils optoélectroniques	23	18	25
Photovoltaïque	8		
Alliages spéciaux	6	6	8
Aimants	4		
Catalyseurs	2		
Batteries	1		
Autres	5		

Source : Roskill (2011)

Du fait de leurs propriétés, l'arséniure et le nitrure de gallium représentent globalement, c'est-à-dire pour l'ensemble des applications, environ 85% de la consommation mondiale de gallium (MMTA, s.d.a). Un aperçu de leurs propriétés les plus importantes est présenté au tableau 12. Il faut noter que ce chiffre était plus élevé auparavant (jusqu'à 98%) mais on constate maintenant, comme nous allons le voir par après, une diversité plus grande de l'utilisation du gallium, sous forme métal ou allié, avec d'autres composants que l'arsénique et l'azote.

Nous allons distinguer d'emblée les applications à partir desquelles il n'est pas possible de récupérer du gallium de celles où ce potentiel existe. Ces dernières sont les plus importantes et c'est donc celles-ci que nous allons couvrir en premier. Les étapes de fabrication sont détaillées pour les applications courantes au paragraphe 3.3.

3.2.1 Les circuits intégrés

D'après les différents chiffres de la figure 12 et du tableau 10, l'application la plus importante du gallium au niveau mondial est sans aucun doute les circuits intégrés (chips et micro chips, c'est-à-dire puces électroniques).

Un circuit intégré est un composant électronique reproduisant une, ou plusieurs, fonctions électroniques plus ou moins complexes, intégrant plusieurs types de composants électroniques de base

(transistors, diodes, résistances, condensateurs) dans un volume réduit, conçu comme une seule unité avec des fils s'étendant à partir de lui pour les connexions d'entrée, de sortie et d'alimentation (Circuits Intégrés Wikipedia, s.d.; Roskill, 2011).

Les trois sous-domaines les plus importants d'utilisation des puces contenant du gallium sont les téléphones cellulaires et la communication sans fil, les radars et satellites et les applications militaires, telles que satellites et radars également mais aussi les appareils de vision nocturne.

C'est majoritairement sous forme d'arséniure de gallium (GaAs) que le gallium intervient dans les circuits intégrés. Par ailleurs, l'utilisation principale du GaAs, en tant que chips ou micro-chips, est son emploi dans les téléphones portables et dans une sous-catégorie de ceux-ci, à savoir les smartphones. En 2010, on estimait que 70% de la production d'arséniure de gallium était utilisée dans l'industrie de la téléphonie mobile (ADEME, 2010). La téléphonie sans fil est toujours, et restera sans doute, un moteur important pour la fabrication des semi-conducteurs à base de gallium à cause de la pénétration du smartphone dans le marché et l'usage plus large de technologies 3G (génération), 3,5G, 4G et LTE (Roskill, 2011). En effet, ces technologies nécessitent une plus grande quantité de GaAs. Par exemple, pour les smartphones de la quatrième génération, on utilise jusqu'à six fois la quantité de GaAs employée dans un téléphone cellulaire standard (USGS, 2012b). Dans ces appareils, le GaAs intervient dans les modules amplificateurs de puissance, dans les modules amplificateur-filtre de puissance ainsi que dans les modules amplificateur-commutateur de puissance (Roskill, 2011). Les smartphones ont par exemple cinq à six amplificateurs de puissance pour un ou deux dans les combinés standards (Roskill, 2011).

La fabrication des chips et des micro-chips consiste en un grand nombre d'étapes qui passent par la création de huit à vingt très fines couches (connues sous le nom de couches d'épithaxie ou épilayers) sur ou dans le substrat. Cela crée des régions actives d'un point de vue électrique dans et sur la galette (Intersil, s.d.).

3.2.2 Applications optoélectroniques

Viennent ensuite les appareils optoélectroniques tels que les diodes lasers, les diodes électroluminescentes ou LED et les photo-détecteurs. Dans ces applications, c'est principalement sous forme d'arséniure (GaAs) et de nitrure (GaN) que le gallium intervient. Cependant, d'autres alliages, comme le phosphure de gallium (GaP) ou l'antimoniure de gallium (GaSb) sont aussi utilisés.

3.2.2.1 Diodes électroluminescentes

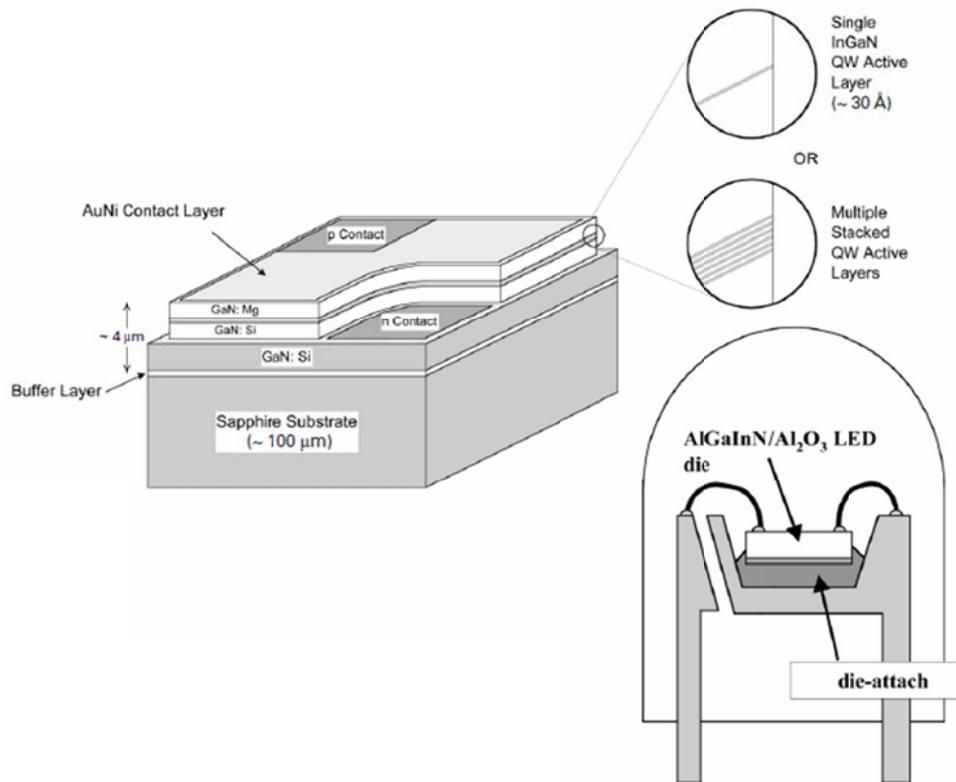
Les LED sont des diodes. Ce sont des jonctions p-n (c'est-à-dire des jonctions formées à la frontière entre un semi-conducteur type-p et un semi-conducteur type-n obtenus par dopage, l'un ayant une charge nette positive car il y a un excès de protons (trous positifs) attirant des électrons; l'autre portant une charge nette négative) qui émettent de l'énergie sous forme de lumière (photons) à différentes longueurs d'onde en fonction des matériaux utilisés lorsqu'elles sont polarisées (Caswell, s.d.). La polarisation entraîne la recombinaison des électrons et des trous. Cette recombinaison se produit au hasard et de manière désordonnée. On parle d'émission spontanée pour la lumière émise (Barron et al, 2011). Chaque couleur du spectre est obtenue par les différents composés du gallium à l'exception de l'ultra-violet et de l'infra-rouge aux longueurs d'onde élevées.

Des étapes supplémentaires sont nécessaires pour fabriquer des LED qui émettent de la lumière blanche. On distingue trois conceptions de LED : les LED basées sur le phénomène de fluorescence (une substance phosphorescente est utilisée pour absorber la lumière bleue et ultraviolette émise et la réémettre comme lumière jaune (Caswell, s.d.; ADEME, 2010b)) ; les LED à mélange de couleurs et les LED dans lesquelles une méthode hybride entre les deux précédentes est utilisée (DEFRA, 2009).

Le dopage peut être réalisé par implémentation d'ions, par diffusion de dopants ou par croissance épithaxiale d'une fine couche de cristal dopé. Les LED à base de nitrure de gallium sont notamment

utilisées dans l'éclairage domestique, l'illumination, les phares et tableaux de bord des véhicules, les éclairages de secours, imprimantes et scanners, les lecteurs CD, les fibres optiques, le rétro-éclairage des écrans des ordinateurs portables, des ordinateurs et téléviseurs à écran plat (Roskill, 2011; JRC, 2011). La figure suivante représente une matrice de LED à base de GaN. Celui-ci est dopé avec du magnésium pour obtenir la couche p-type et avec du silicium pour le n-type.

Figure 13 : Représentation d'une matrice de LED à base GaN.



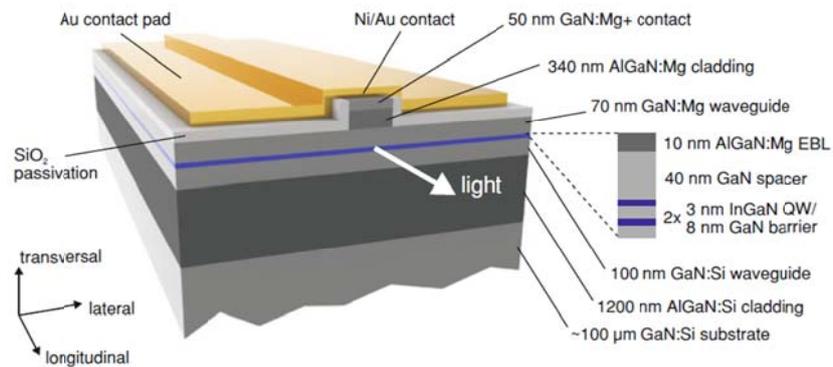
Source : Bour (2001)

3.2.2.2 Diodes laser

Les lasers fonctionnent suivant le même principe que les LED : un excès d'électrons dans la bande de conduction d'un semi-conducteur et un excès de trous dans une autre couche dont la recombinaison entraîne l'émission de lumière. Dans les lasers, cette émission est stimulée et aboutit à l'émission d'une lumière cohérente (Barron et al, 2011).

En fait, la lumière émise passe par des électrons dans un état de haute énergie aboutissant à émettre des photons supplémentaires. L'ensemble de photons émis initialement est réfléchi en partie par une surface clivée. Ce qui n'est pas réfléchi forme le faisceau de sortie du laser. Les photons réfléchis vont continuer à stimuler l'émission (Barron et al, 2011). Les diodes laser sont utilisées en particulier dans les lecteurs et enregistreurs Blu-ray, consoles de jeux, HD DVD, les équipements des télévisions haute définition (Roskill, 2011). La figure 14 représente une vue d'une diode laser.

Figure 14: Vue (non à l'échelle) d'une diode laser à base de GaN et détails de la région active.

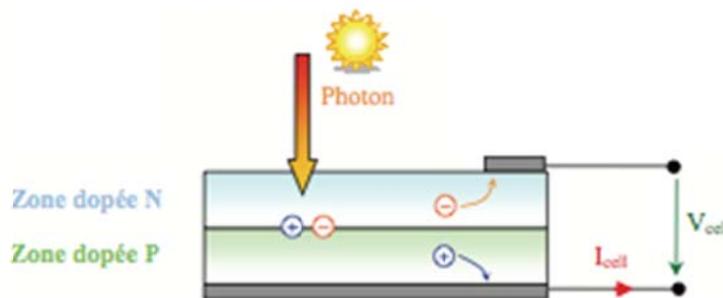


Source: Schelbenzuber (2012)

3.2.3 Cellules Photovoltaïques

Le gallium est aussi utilisé en couches minces dans les cellules des panneaux photovoltaïques qui font partie des technologies de l'énergie. Le principe des cellules solaires est le suivant : la jonction p-n de semi-conducteurs n'est pas polarisée mais est illuminée par de la lumière dont l'énergie des photons est supérieure à la bande de rupture (bande située entre la bande de valence et la bande de conduction). Au lieu d'une recombinaison, il y a génération de paires électron-trou. Les photons excitent les électrons qui sautent vers la bande de conduction, ce qui conduit à un excès de trous dans la bande de valence (Barron et al, 2011). Les porteurs excédentaires vont diffuser à travers la jonction créant un courant.

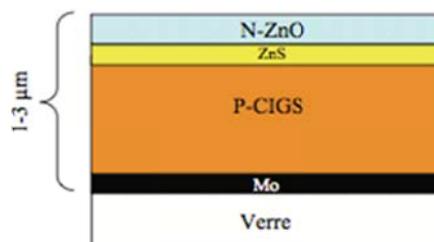
Figure 15 : Schéma de principe de la conversion photoélectrique.



Source: Petibon (2009)

La technologie CIGS (alliage Cuivre-Indium-Gallium-Sélénium) fait partie de la deuxième génération de panneaux photovoltaïques dits couche mince (Thin Film). Le schéma d'une telle cellule est représenté ci-dessous. La couche de CIGS fait environ 1,5 μm et le substrat est du verre (Petibon, 2009). Des rendements de 19,9% ont été atteints en laboratoire avec cette technologie (Petibon, 2009).

Figure 16 : Schéma d'une cellule à base de CIGS.



Source: Petibon (2009)

Il y a également des cellules couche mince à base de GaInP et des cellules multi-jonctions à haut rendement (supérieur à 35%) avec une double ou une triple jonction GaInP/GaAs(/Ge) (Petibon, 2009).

L'arséniure de gallium est utilisé dans les panneaux photovoltaïques de troisième génération qui assimilent les concentrateurs photovoltaïques (CPV) et les technologies émergentes. Dans les CPV, des lentilles focalisent les rayons solaires sur les cellules ce qui permet une augmentation du rendement (Petibon, 2009).

3.2.4 Alliages spéciaux et autres applications

Le gallium est un composant d'alliages fusibles remplaçant le mercure dans un certain nombre d'applications. Il s'agit en particulier des applications nécessitant que l'alliage soit liquide à température ambiante. L'alliage gallium-indium-étain est ainsi utilisé dans les thermomètres pour la fièvre. C'est aussi le cas dans les tensiomètres (Roskill, 2011).

Allié au plutonium, le gallium est aussi utilisé pour stabiliser les allotropes de plutonium dans les armes nucléaires (Yu et Liao, 2011). C'est parmi ses premières applications comme déjà indiqué plus avant.

Le gallium est également employé dans certains aimants très puissants. C'est notamment le cas en Chine où dix tonnes de gallium ont été utilisées à cet effet en 2010 (Roskill, 2011). En décembre 2011, une université aux USA a annoncé avoir mis au point des aimants à l'échelle nanométrique à base de manganèse et de gallium. Ceux-ci pourraient remplacer ceux à base de terres rares (Magnetic breakthrough, 2011). Si pour des raisons évidentes - le gallium est un sous-produit et son prix est plus élevé que celui du néodyme (en mars 2012, le Ga 99,99 % s'échangeait à 500\$/ kg contre moins de 200\$/ kg pour le Nd 99%) - les aimants gallium-manganèse ne pourront sans doute pas substituer mais seulement compléter les aimants composés de terres rares, il est fort probable qu'une augmentation de la consommation du gallium ait lieu dans ce domaine (Roskill, 2011).

Le trichlorure de gallium est utilisé comme dépolarisant cathodique dans les batteries au lithium-chlorure de thionyle (Li-SOCl₂), car il améliore le transport des ions et réduit la passivation (Roskill, 2011). Ces batteries sont utilisées dans des applications fonctionnant dans des environnements difficiles tels que l'aérospatial, les vaisseaux sous-marins ou l'inspection des pipelines (Roskill, 2011).

Le fait que le gallium métal ait une température d'ébullition très élevée est aussi utilisé dans la conception de thermomètres capables de mesurer des températures très hautes (JRC, 2011). Le gallium liquide a la propriété de mouiller la porcelaine et le verre (Blazy et Jdid, 2011) et il forme donc une surface réfléchissante qui peut être utilisée pour créer des miroirs brillants de très haute qualité (JRC, 2011).

Comme additif au magnésium, le gallium améliore la résistance mécanique et à la corrosion de l'alliage (Roskill, 2011).

Le gallium est également présent dans les nanoproducts 2-D et 3-D, c'est-à-dire des produits dont deux ou trois dimensions sont à l'échelle du nanomètre (de un à cent nm). Les nanocristaux d'oxyde de gallium (Ga₂O₃) interviennent en tant que retardateur de flammes dans les revêtements, plastiques, fibres et textiles, mais aussi dans certains alliages et dans des applications catalytiques (Yu et Liao, 2011). Des LED nouvelles peuvent être réalisées, non pas par empilement de couches monocristallines (GaAs, InGaN, GaN) sur un substrat, mais en accrochant sur ce substrat des nano-fils de GaN par leur base. De petites colonnes verticales sont ainsi réalisées permettant une réduction de surface de la diode et un coût de fabrication inférieur à celui des LED actuelles (Rey, 2011). D'autres nanoparticules de phosphore de gallium, de sulfure de gallium ou de séléniure de gallium ont été produites pour leur potentiel électrique, magnétique, optique mais aussi pour être utilisés en science biologique (Yu et

Liao, 2011). Le développement de ces applications nanométriques va conduire à une économie de matière.

3.2.5 Applications à potentiel de recyclage nul

Dans le domaine de l'imagerie biomédicale, on utilise des sels de gallium. En particulier, le citrate de gallium qui contient un isotope radioactif du gallium (^{67}Ga) est utilisé pour détecter et localiser notamment des cellules cancéreuses (Yu et Liao, 2011). La très petite quantité (de 3 à 6mCi) de gallium injectée dans le corps va se concentrer dans les zones infectées, enflammées et près des tumeurs malignes ou bénignes (Gallium scan medical-dictionary, s.d.). La procédure est connue sous le nom de gallium scan (Yu et Liao, 2011).

Des alliages dentaires à base de gallium sont également proposés pour substituer les amalgames de mercure et d'argent et pour restaurer des dents abimées (Yu et Liao, 2011).

Le gallium est potentiellement utilisable comme agent thérapeutique. Le nitrate de gallium a montré une efficacité thérapeutique vis-à-vis de certaines tumeurs, cancers et autres problèmes pulmonaires par exemple (Yu et Liao, 2011). Le maltolate de gallium est un complexe utilisé dans les essais cliniques et précliniques pour le traitement possible de maladies infectieuses et de cancers (Yu et Liao, 2011). L'arséniure de gallium est aussi employé dans le traitement de l'ostéoporose (Blazy et Jdid, 2011).

3.2.6 Applications exceptionnelles

Le gallium est également important pour certaines expériences physiques sophistiquées (Yu et Liao, 2011). Le gallium est en effet un des quelques rares éléments capables d'absorber les neutrinos solaires, qui sont des particules élémentaires émises par les réactions de fusion solaire (Vannucci, 2011). Les neutrinos solaires ont une énergie extrêmement basse et ils sont difficilement détectables. Ces expériences qui ont eu lieu dans les années 90 ont utilisé quelques dizaines de tonnes de gallium métal ou de chlorure de gallium (Yu et Liao, 2011).

3.3 Rendement d'utilisation du gallium pour quelques applications

Ce paragraphe est consacré au passage en revue des étapes de fabrication des circuits intégrés, des dés de LED et des cellules solaires pour identifier et quantifier, quand les chiffres sont disponibles, les pertes en gallium et leur nature au cours de celles-ci. A l'exception de la technologie CIGS qui sera décrite à part, les étapes de fabrication des composants sont similaires et utilisent les technologies décrites ci-dessous.

Tableau 11 : Composé du gallium : applications et pureté requise.

Composés du gallium	Applications	Pureté requise
GaAs semi-isolant	Circuits intégrés	6 à 7N (99,99999%)
GaAs semi-conducteur	LED visible Diodes laser Diodes émettrices dans l'infra-rouge	6 à 7N (99,99999%)
GaAs semi-conducteur	Photo détecteurs	4 à 5N (99,999%)
GaAs	Photovoltaïque	4 à 5N (99,999%)
GaN (InGaN)	LED visible (bleu, indigo, violet) Diodes laser	6 à 7N (99,99999%)
GaN	Transistor – amplificateurs	
GaP (GaAsP, GaAlP, InGaAlP)	LED visible (rouge, orange, jaune, vert)	6 à 7N (99,99999%)
GaInP	Photovoltaïque	
GaSb	Diodes émettrices dans l'infra-rouge Autres systèmes d'imagerie infra-rouge	

Sources: Roskill (2011), JRC (2011), USGS (2012b), Seeley (2011)

Le tableau 11 reprend les composés du gallium, leurs applications principales ainsi que la pureté requise pour celles-ci pour le gallium et les éléments auxquels il est associé.

Notons que pour certaines technologies de fabrication, la pureté peut encore être supérieure à celle mentionnée dans le tableau.

3.3.1 Fabrication du substrat

La première étape de la fabrication consiste en la production d'une galette, qui est une fine tranche d'un matériau semi-conducteur ou semi-isolant. Ce substrat est produit à partir d'un monocristal de grande pureté que l'on découpe en tranches. Comme matériaux utilisés, il y a notamment le silicium, le saphir cristallin, le GaAs, le GaN. Chacun a des propriétés désirables mais aussi des limitations. Les applications requièrent différentes qualités de gallium comme spécifié dans le tableau 11.

Pour le GaAs, un des avantages est sa bande interdite de 1,2 eV qui est plus élevée que celle du silicium. De plus, cette bande est directe, ce qui signifie que la transition entre la bande de valence maximum et la bande de conduction minimum ne requière pas d'interaction avec une particule pour avoir lieu (Barron et al, 2011). Il a une vitesse plus élevée d'électrons saturés ainsi qu'une plus grande mobilité des électrons, ce qui permet à des transistors de fonctionner à des fréquences supérieures par rapport au silicium. Par contre, c'est un pauvre conducteur (Barron et al, 2011). Sans dopage, il est en fait semi-isolant.

Le nitrure de gallium (GaN) est un matériau très dur dont la large bande interdite de 3.4 eV lui confère des propriétés spéciales pour les applications en optoélectronique, et dans des dispositifs de haute fréquence et de forte puissance. Sa sensibilité aux rayonnements ionisants est faible, ce qui le rend adapté pour les réseaux de cellules solaires des satellites. Il peut opérer et fonctionner à des températures et des voltages plus élevés que le GaAs. Il est idéal comme amplificateur de puissance de fréquences micro-ondes.

Figure 17 : Zone de fonctionnement (puissance (W), fréquence (Ghz)) potentielle de différents composés.

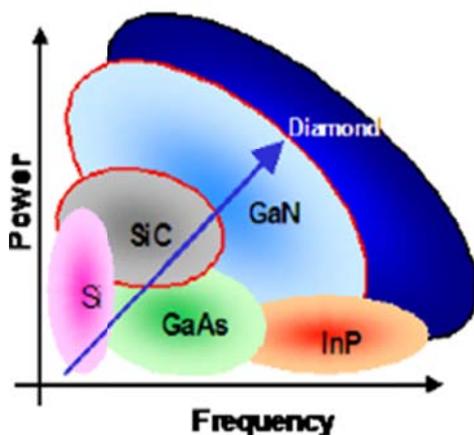


Tableau 12 : Propriétés des composés.

	Si	GaAs	4H SiC	6H SiC	GaN	Diamant
Bande de rupture (eV) Directe ou indirecte	1.1 ind.	1.43 dir.	3.26 ind.	3.0 ind.	3.4 dir.	5.5
Mobilité des électrons (cm ² /V/s)	1500	8500	1000	500	1800	4500
Mobilité des trous (cm ² /V/s)	480	400	80	110	150	3800
Vitesse de saturation (10 ⁷ cm/s)	1.0	2.0	2.0	2.0	2.5	2.7
Conductivité thermique (W/cmK)	1.5	0.5	3.3	3.3	1.3	24

Sources: Bösch (2008), Reiner (2005), Weyers (s.d.)

On peut encore noter que même si on prévoit une décroissance progressive de l'utilisation de GaAs dans les semi-conducteurs à partir de 2015, elle sera cependant balancée par une augmentation de l'utilisation de GaN (Roskill, 2011).

3.3.1.1 Substrat d'arséniure de gallium

3.3.1.1.1 Croissance du lingot de monocristal d'arséniure de gallium

Le substrat de GaAs est obtenu à partir d'un lingot de monocristal de GaAs, lui-même étant produit au départ de morceaux de GaAs polycristallin ou des éléments Ga et As.

Il y a à la base trois techniques principales utilisées aujourd'hui pour la croissance des monocristaux de GaAs. Plusieurs variantes existent également. Leur principe est la croissance d'un monocristal à partir d'un ou plusieurs matériaux semi-conducteurs. Un germe est utilisé pour enclencher la cristallisation. Ces techniques sont représentées à la figure 18.

La croissance du monocristal présente un problème stœchiométrique du fait de la perte possible d'arsénique par évaporation (Barron et al, 2011). L'arsénique est en effet volatil aux hautes températures rencontrées durant la croissance du cristal (Roskill, 2011). Par ailleurs, au-dessus de 615 °C, il y a des risques de sublimation du fondu (Roskill, 2011). Les techniques de croissance du monocristal sont conçues pour l'éviter ou limiter ces problèmes. Le tableau 13 reprend les pertes de gallium qui peuvent se produire au cours de cette étape.

Tableau 13 : Description des pertes en gallium lors de la croissance du lingot.

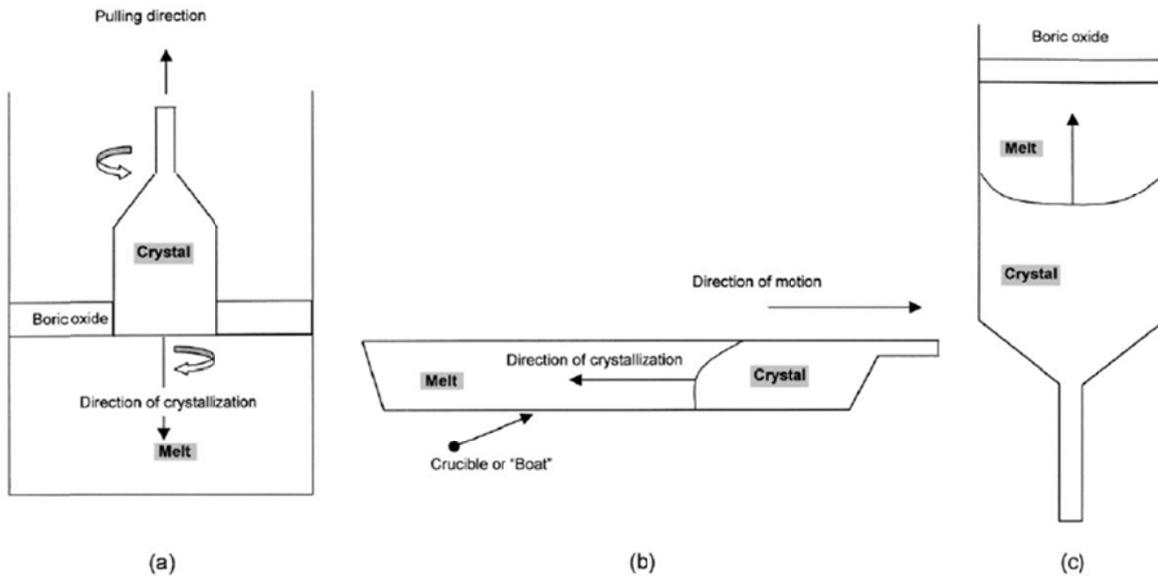
<i>Etape</i>	<i>Description</i>	<i>Pertes potentielles de gallium</i>
Production du lingot de monocristal selon la méthode 'Liquid Encapsulated Czochralski (LEC)' – Variante de la technique Czochralski	-Retrait contrôlé d'un germe de cristal hors du fondu de GaAs -La solidification a lieu lors de ce retrait -Le GaAs fondu (obtenu à partir de morceaux de GaAs polycristallin ou de gallium de haute pureté et arsenic élémentaires) est encapsulé par une couche d'oxyde de bore (B ₂ O ₃)	- Pertes de gallium au travers de l'encapsulant (oxyde de bore) employé pour éviter la dissociation du GaAs aux températures de travail élevées - Gouttelettes de gallium ou traces de gallium à la surface du cristal dues à l'évaporation de l'As de la surface émergente
Production du lingot de monocristal selon la méthode 'Horizontal Bridgman (HB)'	-Utilisation d'un bateau en quartz ou en nitrure de bore pyrolytique (pBN) pour éviter l'adhérence fondu–contenant et ainsi la nucléation parasite -Pas d'encapsulant -Contrôle précis de la stoechiométrie: Zone de cristallisation avec arsénique maintenue à une température de 610°C de façon à avoir une pression permettant d'éviter l'évaporation du As -Zone avec la charge (Morceaux de GaAs polycristallin fondus) maintenue à 1240°C -Mouvement de gauche à droite qui implique que le fondu se refroidit et se solidifie	- Pas de véritables pertes lors de cette étape. Par contre, la forme du lingot imposée par le bateau entraîne des pertes plus conséquentes à l'étape suivante de mise en forme.
Production du lingot de monocristal selon la méthode 'Vertical Gradient Freeze (VGF)' Inklus la technique Vertical Bridgman	-Procédé à zones multiples pour imposer un gradient de température précis au fondu. -Utilisation d'un creuset chauffé en pBN pour les mêmes raisons et/ou utilisation d'un encapsulant B ₂ O ₃ -Système scellé ou four dans une chambre pressurisée pour empêcher l'évaporation de l'As	- Pertes de gallium au travers de l'encapsulant (oxyde de bore)

Sources : Barron, Roskill (2011), Rudolph (1999)

Les pertes en gallium mentionnées dans le tableau constituent les résidus des réacteurs de croissance de monocristal de GaAs qui peuvent être valorisés lors du recyclage. Ils ne sont en effet que peu contaminés par le réacteur.

En outre, certains lingots ne répondent pas aux standards et font donc partie également des sources de déchets recyclables.

Figure 18: Méthodes de croissance de monocristaux: (a) Liquid Encapsulated Czochralski (LEC); (b) Horizontal Bridgman (HB); (c) Vertical Gradient Freeze (VGF).



Source : Grant (2001)

3.3.1.1.2 Fabrication du substrat ou galette à partir du lingot

Le bloc de monocristal obtenu est ensuite mis en forme et puis découpé en très fines tranches. Celles-ci vont à leur tour subir une série de traitements jusqu'à l'obtention d'une galette, dont la surface aura les propriétés physiques et chimiques adéquates pour servir de matériel de départ pour la fabrication de circuits intégrés ou jonctions (Barron et al, 2011). Au cours de ces opérations, du gallium se perd sous différentes formes. Ces pertes sont reprises dans le tableau 14.

Du lingot de monocristal à la galette polie, la perte de matière sous forme de morceaux de GaAs ou de poussières est comprise entre un tiers et la moitié du bloc d'origine (Barron et al, 2011). Ces déchets, surtout les morceaux, sont une source en gallium importante pour la production secondaire. Il en est de même des galettes cassées lors du découpage en tranches.

Tableau 14: Description des pertes en gallium au cours des étapes de préparation de la galette.

Etape	Description de sa fonction	Pertes potentielles de gallium
Coupe (Cropping)	Coupe à la scie circulaire de la partie conique et de la fin du lingot de monocristal et d'un échantillon	- Morceaux de GaAs constitués par les bouts du lingot - Poussières de GaAs
Meulage (Grinding)	Permet d'obtenir le diamètre précis de la galette. Lors de la croissance, on prévoit 1 à 2 mm d'épaisseur en plus. Ce surplus est donc éliminé.	Poussières de GaAs
Identification des plats (Orientation flattening)	Découpe de un ou deux plats sur la longueur du lingot. Un des deux est utilisé pour positionner automatiquement la galette lors des étapes suivantes.	Poussières de GaAs
Gravure (Etching) du lingot de monocristal	Les procédés des étapes précédentes sont relativement abrasifs pour le lingot de monocristal ce qui crée des fosses, creux et fissures à la surface du lingot qui risquent de fragiliser la galette. Le procédé de gravure consiste à éliminer ces défauts en plongeant le cristal dans une solution chaude. Pour le GaAs, on utilise une solution de HCL-HNO ₃ (eau régale) qui va attaquer le cristal aux endroits où il est endommagé.	Perte en GaAs par solubilisation dans la solution

Tableau 14 suite: Description des pertes en gallium au cours des étapes de préparation de la galette.

<i>Etape</i>	<i>Description de sa fonction</i>	<i>Pertes potentielles de gallium</i>
Découpe en galettes (Wafering)	Découpe du lingot en de fines tranches de dimensions précises avec une scie à lame de diamant.	Poussières de GaAs
Traitement thermique	Un niveau d'oxygène supérieur aux concentrations acceptées peut détériorer les propriétés du semi-conducteur. Au-delà de certaines températures, il peut agir comme donneurs d'électrons. Le traitement thermique de la galette, à une température comprise entre 500-800 °C et puis un rapide refroidissement, permet de supprimer les donneurs.	
Tournage (Lapping)	Procédé pour supprimer les variations d'épaisseur de la galette et obtenir une galette bien plate. La galette est prise en sandwich entre deux plaques en rotation – une solution d'eau et de particules abrasives est utilisée.	Environ 20 µm de GaAs est enlevé par côté. Poussières de GaAs retenue en partie dans la solution abrasive
Contournage des bords (Edge contouring)	Les bords de la galette sont arrondis pour éviter les fissurations. La galette est mise en rotation rapide, frottant contre un outil coupant en diamant	Poussières de GaAs
Gravure de la galette	Les procédés endommagent la surface de la galette jusqu'à 10 µm. La galette subit donc un traitement chimique humide de gravure. Un des agents oxydants qui convient bien est le H ₂ O ₂ en mélange avec l'acide sulfurique et de l'eau.	Perte entre 3 et 12 µm selon les faces plus riches ou moins riches en As
Polissage (Polishing)	Le but du polissage est d'obtenir une surface lisse de type miroir sur laquelle les détails des composants électroniques peuvent être définis par lithographie. Traitement mécano-chimique pour des variations de surfaces inférieures de 5 à 10 µm. La surface de la galette est comprimée sur une surface de polissage sur laquelle est déposée une solution de chlorate de sodium (NaOCl) contenant de très fines particules de silice (SiO ₂) de diamètre 10 ⁻¹⁰ m.	Poussières très fines d'un produit Ga₂O₃-As₂O₃. Elles constituent des déchets d'une faible qualité du point de vue de la teneur en gallium.
Nettoyage (Cleaning)	Dans les processus précédents, diverses manipulations et produits ont souillés les galettes. Elles doivent donc être nettoyées. Utilisations successives de solvants organiques chauds. Les temps d'immersion varient en fonction du taux de décapage des solutions. Ils peuvent être très courts pour éviter celui-ci.	

Sources : Barron et al (2011), IFC (2007)

3.3.1.2 Substrat de GaN

Malgré ses nombreux avantages précisés plus haut, l'obtention d'un substrat de nitrure de gallium pour son utilisation dans les applications électroniques a constitué et continue d'être un challenge. Les méthodes de croissance du lingot présentées plus haut ne fonctionnent pas, car le GaN a une température de fusion très élevée (supérieure à 2.500°C). L'azote s'évapore du cristal en croissance et les atomes de gallium et d'azote ne se lient pas (Reiner, 2005). Pour empêcher cette évaporation, de très hautes pressions (supérieures à 1.000 MPa) sont nécessaires, ce qui est difficilement réalisable dans un procédé commercial (Reiner, 2005).

Actuellement, il existe trois technologies principales de production d'un substrat massif de GaN (Roskill, 2011): i) HVPE (Hydride Vapour Phase Epitaxy) ; ii) HTHP (High Temperature – High Pressure) ; iii) Amonothermal growth. C'est la technologie HVPE qui est la plus utilisée parmi les producteurs de substrat GaN. Le tableau 15 reprend une description des pertes potentielles en gallium pour cette technologie.

Tableau 15: Description des pertes en gallium pour la technologie HVPE.

<i>Procédé</i>	<i>Description de sa fonction</i>	<i>Pertes potentielles de gallium</i>
HVPE	<p>- Du chlorure de gallium est formé dans une zone du réacteur par réaction entre le gallium métal fondu et du HCl gazeux. La température dans cette zone est comprise entre 700 et 900 °C</p> <p>- Le GaCl est transporté par un gaz porteur (H₂ ou N₂) dans la zone de croissance où il réagit avec NH₃ pour former le GaN. La température dans cette zone est située entre 900 et 1.100 °C. Les parois du réacteur sont chauffées pour éviter la déposition de GaN</p>	<p>- Pertes en gallium sous forme de chlorure de gallium qui ne va pas réagir avec NH₃</p> <p>-Déposition possible de GaN sur les parois du réacteur</p>

Sources : Weyners (s.d.), Reiner (2005), Sengül (2008), Dimitriev et al (2006)

Des informations sur une possibilité de valorisation industrielle de ces pertes n'ont pu être trouvées. Il faut ajouter cependant que la production de substrat de GaN est encore relativement récente.

3.3.2 Inspection des galettes

Les galettes, qui ne remplissent pas les critères de contrôle de qualité mécanique, électrique et chimique, sont à la fois une autre source de perte en gallium mais aussi une potentialité de recyclage. Cette dernière est néanmoins plus limitée que les précédentes.

3.3.3 Croissance/Déposition de diverses couches

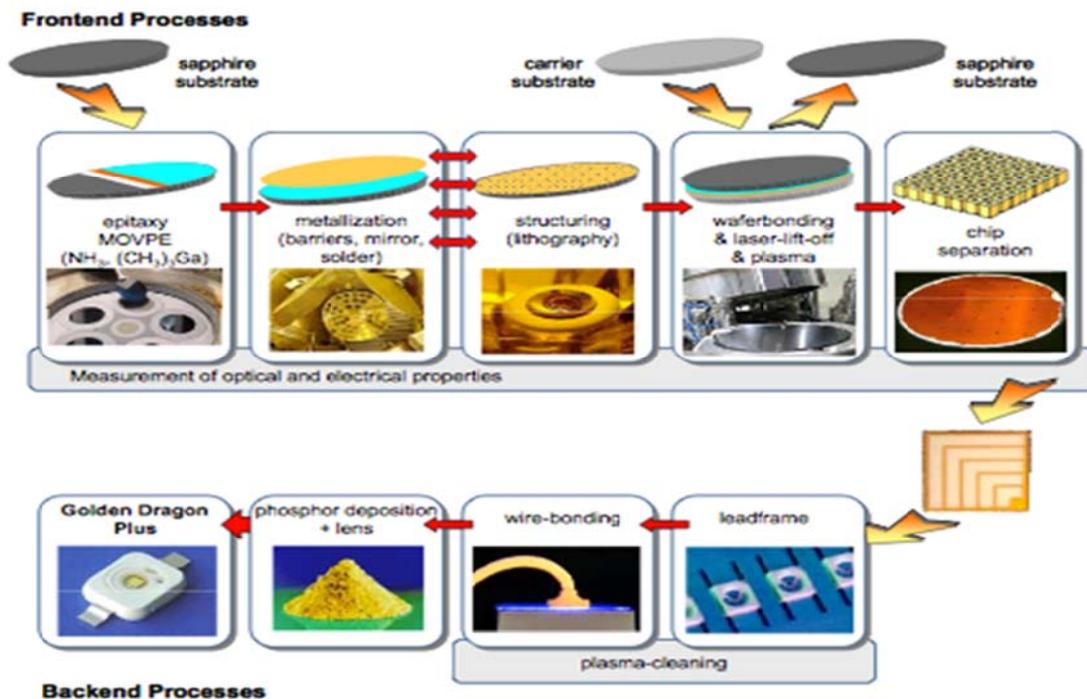
La galette ainsi obtenue précédemment peut maintenant servir de substrat pour les étapes suivantes. Son diamètre, pour un composé du gallium, varie entre 50 et 100mm (galettes 2'', 3'' et 100mm) pour une épaisseur comprise entre 350 et 625µm pour du GaAs (Wafer Technology, s.d.). Une galette en silicium peut avoir un diamètre de 150mm.

L'ordre dans lequel les étapes suivantes se déroulent peut varier d'une application à l'autre. Dans le cas des circuits intégrés, l'étape suivante est la photo-lithographie: processus au sein duquel le motif représentant les composants d'un circuit intégré est transposé sur la galette au moyen de lumière ultraviolette. Cette technique est utilisée pour marquer les différentes zones du substrat devant être dopées, métallisées ou isolées. Au préalable, la galette est recouverte d'un matériau sensible (photoresist) à la lumière. Au niveau des aspects environnementaux, on notera l'utilisation en excès de matériaux photorésistants, et donc la production importante de déchets de matériaux de recouvrement (Sengül et al, 2008).

Ensuite, on a les étapes de révélation et de gravure qui permettent d'enlever la couche de matériau exposée, soit en utilisant des produits chimiques (acides, bases, sels) soit par bombardement ionique (plasma) (Intersil, s.d.). Cela entraîne la génération de déchets acides ou organiques, ou d'émission de sous-produits gazeux toxiques. Dans ces étapes, il n'y a pas de véritables pertes en gallium.

L'étape suivante est la déposition d'une couche sur la galette, pour le dopage ou l'isolation. Le substrat peut ne pas être un composé du gallium. Plusieurs techniques sont possibles. Pour les circuits intégrés, ces étapes sont répétées de très nombreuses fois. Dans le cas des LED, la déposition par épitaxie intervient avant l'étape de lithographie comme le montre la figure 19 (Osram, 2009).

Figure 19 : Etapes de base de la fabrication d'une LED blanche Golden Dragon Plus.



Source: Osram 2009

La déposition d'une couche monocristalline (epitaxial growth) signifie qu'il y a une orientation cristalline précise de la couche par rapport au substrat. Pour la croissance par épitaxie, les méthodes principales sont (Roskill, 2011):

- HVPE (Hydride Vapour Phase Epitaxy)
- MBE (Molecular Beam Epitaxy)
- MOCVD (Metal Organic Chemical Vapour Deposition)
- LPE (Liquid Phase Epitaxy)
- VPE (Vapour Phase Epitaxy)

Il faut noter que pour la technologie MOCVD, d'autres appellations sont aussi utilisées comme MOVPE (Metal Organic Vapour Phase Epitaxy), OMCVD (OrganoMetallic Chemical Vapour Deposition) ou OMVPE (OrganoMetallic Vapour Phase Epitaxy) (Thompson, 1997).

Deux de ces technologies vont être détaillées ci-dessous, la méthode HVPE ayant déjà été présentée. Il s'agit des techniques MOCVD et MBE, toutes deux utilisées par IMEC pour la croissance du GaN. IMEC réalise des recherches au niveau mondial dans le domaine nanoélectronique. Elle délivre des solutions technologiques pour la mise en œuvre notamment de semi-conducteurs pour les LED, et de cellules de panneaux photovoltaïques.

La technologie MBE requiert un gallium ultra-pur, c'est-à-dire avec une pureté supérieure à 7N : 7N5 (99,99995%) ou 8N (99,99999%). Pour obtenir une telle pureté, un traitement de raffinage supplémentaire est nécessaire.

Pour ces deux technologies, IMEC annonce une perte en gallium qui correspond à 80 % de la quantité initiale de gallium. Cela semble énorme. Il faut cependant souligner que c'est pour l'obtention de couches d'épaisseur équivalente à seulement quelques μm . Pour pouvoir véritablement évaluer ce pourcentage, la quantité de gallium utilisée dans ces techniques doit plutôt être comparée avec la consommation totale en gallium. Devant la difficulté à obtenir les informations via les contacts et l'absence de chiffres dans la littérature, IMEC ne disposant d'ailleurs pas non plus de ces chiffres, une approximation a été calculée pour l'année 2010 sur base de données tirées de la huitième édition du

Roskill. Elle est expliquée au paragraphe 3.5.1 de ce chapitre. Le tableau 16 explique notamment les pertes en gallium pour ces deux procédés.

Tableau 16 : Description des techniques MOCVD et MBE de croissance par épitaxie, de leurs pertes en gallium et des aspects environnementaux.

Méthode	Description	Matériaux utilisés	Pertes potentielles de gallium	Aspects environnementaux
MOCVD	Déposition d'une couche sur un substrat par réaction chimique entre deux précurseurs gazeux dans un environnement sous vide. Les précurseurs sont chauffés et transportés par les gaz porteurs jusqu'au substrat. Ensuite, il y a adsorption des précurseurs sur le substrat et réaction chimique entre eux. Les atomes diffusent alors vers les sites de croissance. Il y a désorption des sous-produits de réaction.	-Précurseurs : TMG ($\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$) et un hydruure (NH_3 pour le GaN, AsH_3 , PH_3) -Gaz portant : H_2 , N_2 , Ar ou He Note : TEGa ($\text{Ga}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$) peut aussi être utilisé comme précurseur. Cependant, sa pression de vapeur est très basse (4,79 torr à 298 K). Il est donc difficile de le transporter jusqu'à la zone de déposition et d'atteindre des taux de croissance de la couche raisonnables.	Pertes très importantes en gallium, car il est trop risqué de récupérer le précurseur non-converti, et car un excès en précurseurs organo-métalliques est nécessaire pour l'obtention d'une couche d'épaisseur suffisante, uniforme et de qualité.	Production de gaz à effet de serre. Pas d'émission vers l'extérieur car une partie des réactants non utilisés se dépose sur les parois du réacteur, le reste sous forme gazeuse est collecté par adsorption sur un support froid. Ce support est incinéré par crainte de reste de TMG pyrolytique. La conversion des réactants est en effet incomplète. -Utilisation inefficace des hydruures (1% à 20%) -Nécessité d'une haute pureté des réactants gazeux demandant des traitements préalables
MBE	Processus de croissance physique dans lequel le substrat est placé dans un environnement UHV (Ultra High Vacuum). Les éléments de départ sont évaporés pour former un faisceau qui vient frapper le substrat, sur lequel il y a adsorption à la surface. Les atomes diffusent jusqu'à atteindre un endroit favorable à la liaison avec le substrat.	Azote Gallium solide ultra pur	Pertes en gallium mais moindres que par MOCVD car utilisation de moins de gallium au départ.	-Basse utilisation des hydruures (3% à 10%) -Nécessité de gallium ultra-pur obtenu par un raffinage particulier -Accumulation de matériaux sur les parois du réacteur : entretien du réacteur et donc manipulation de produits dangereux

Sources: Réponse à l'enquête d'IMEC, Barron et al (2011), Sengül (2008), Dapkus (1984), Izumi (2001), Roskill (2011), DenBaars (1998)

En ce qui concerne les autres technologies de déposition, le gallium qui ne s'est pas déposé dans le procédé LPE re-circule en boucle (Roskill, 2011). Donc, on ne considère pas de réelles pertes. Pour la technologie VPE, les gaz d'échappement contenant du gallium constituent aussi une source de gallium valorisable.

Les étapes de gravure et de déposition sont précédées et suivies de rinçages au cours desquels les pertes en gallium sont minimales, mais elles génèrent des eaux usées, des acides ou solvants usés en fonction des solutions de rinçages utilisées.

Ensuite, il y a des dépositions métalliques et de films diélectriques (pour les circuits intégrés) qui servent respectivement de contacts électriques et d'isolants, et qui permettent l'interconnexion des régions et/ou des composants (Intersil, s.d.).

Certaines gallettes se cassent au cours des diverses manipulations. Malgré la présence d'autres éléments, la quantité de gallium qu'elles renferment est non-négligeable comme on le verra au paragraphe 4.2.2 du chapitre 4. Ces déchets sont donc potentiellement valorisables.

3.3.4 Découpage en chips et contrôle de qualité

La galette est ensuite découpée en puces (chips) avec une scie en diamant. La découpe est accompagnée d'une extraction par voie humide des poussières et d'une ventilation. Ces poussières contiennent du gallium mais également un grand nombre de contaminants, tels que métaux des circuits et contacts électriques ou les dopants. Contrairement aux poussières peu contaminées engendrées lors de la phase de découpage du lingot en tranches, celles-ci constituent une source moins importante pour le recyclage du gallium. Parmi les pertes en gallium qui peuvent être recyclées dans le cycle de production, on compte les galettes cassées lors de la découpe en puces, ainsi que les puces contrôlées qui présentent des défauts, car chaque pièce est soigneusement inspectée.

3.3.5 Etapes d'assemblage

Viennent alors les étapes de connections des fils, d'emballages spécifiques à chaque application et conduisant au circuit intégré, à la diode LED et à la cellule solaire qui vont servir dans les diverses applications mentionnées. Ces étapes n'entraînent pas de pertes en gallium. Par contre, les composants et les appareils dans lesquels ils interviennent, et qui ne répondent pas aux standards exigés, sont une source de déchets dont le gallium qu'ils contiennent n'est pas valorisé.

3.3.6 Variante dans le processus

Des gaufres en arséniure de gallium de très grande qualité et intégrées sur un substrat de silicium ou un substrat amorphe tel que le verre est cher, ce qui restreint l'usage de ce composé malgré ses nombreux avantages. Il y a possibilité de faire croître par épitaxie à moindre coût des couches assez épaisses de GaAs ou AlGaAs sur un substrat mieux adapté à ce type de croissance. Ce substrat est en fait réutilisable. Les films sont ensuite séparés les uns des autres et distribués sur des substrats désirés. La séparation est réalisée en utilisant une solution spécifique qui détruit les couches dites sacrifiées entre le substrat et la première couche utile, et ainsi de suite (Jongseung et al, 2010). Cette technique est appelée Epitaxial Lift-Off (ELO) et est assez souvent employée pour la fabrication des cellules photovoltaïques, mais peut l'être aussi pour les composants opto-électroniques (Jongseung et al, 2010).

3.3.7 Technologie CIGS

Dans cette technologie, une couche métallique de molybdène de $0,5\mu\text{m}$ d'épaisseur est déposée par pulvérisation sur du verre à vitre pour réaliser le contact arrière. Puis, on vient déposer une couche CIGS de type P, suit ensuite une couche de sulfure de Cadmium (CdS) ou de sulfure de zinc (ZnS) d'environ 50 nm, et enfin une couche de ZnO (Oxyde de Zinc) de type N, de $1\mu\text{m}$, servant de contact avant (Petibon, 2009).

Différentes méthodes existent pour réaliser la déposition de la couche CIGS : i) la co-évaporation ; ii) Chemical Vapor Deposition (CVD). Cette dernière catégorie regroupe cinq méthodes qui ne sont pas encore beaucoup utilisées, car elles produisent des films qui ont une efficacité de conversion énergie solaire-électricité plus basse. Certaines sociétés de fabrication passent aussi par une phase liquide. La technologie CIGS fait l'objet de nombreuses recherches pour améliorer son efficacité par rapport aux technologies basée sur le silicium. La plupart des cellules solaires CIGS sont produites selon la technique de co-évaporation caractérisée par une importante consommation d'énergie et par la possibilité de pertes en gallium par désorption (Sengül et al, 2008).

3.4 Mise en évidence des points critiques dans les évaluations environnementales des applications courantes

Malgré l'importance et le caractère critique de certains matériaux, il y a finalement peu d'analyses du cycle de vie d'applications dans lesquelles ils interviennent. C'est également le cas pour le gallium.

3.4.1 Les LED

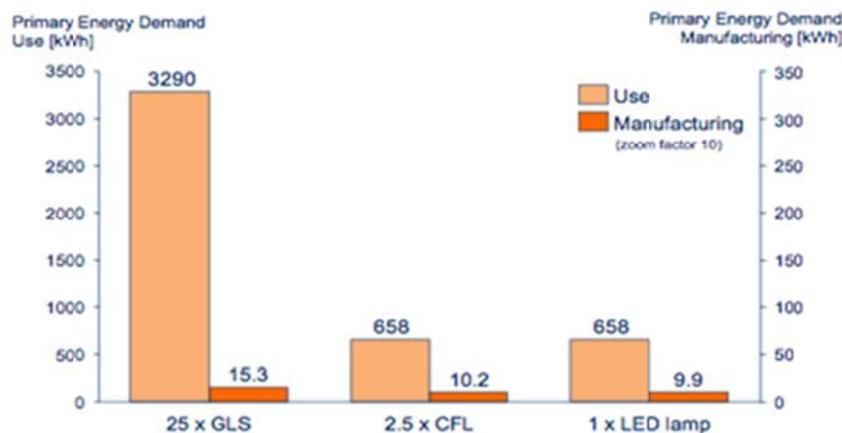
Pour les LED, il y a toutefois deux analyses qui ont été réalisées en 2009. La première évalue le cycle de vie d'éclairages et compare les types suivant : ampoule incandescente (40W), lampe fluorescente compacte (8W) et LED (8W) contenant six diodes avec un alliage indium-nitride de gallium pour un temps de vie respectif de 1.000h, 10.000h et 25.000h. Cette évaluation a été réalisée par OSRAM et Siemens.

Les unités fonctionnelles choisies sont un flux lumineux compris entre 345 et 420 lumens, une température associée à la couleur blanche comprise entre 2.700 et 3.000K, et un index de rendu de couleur supérieur à 80 pour une durée d'utilisation de 25.000 heures.

Pour la LED, une première conclusion est que la production représente moins de 2% de la demande totale d'énergie relative à la production de la lampe et à son utilisation. Les étapes avant et après découpage en puces demandent une quantité d'énergie similaire, mais moindre que celle requise pour la fabrication du socle et du bulbe (OSRAM, 2009).

Par ailleurs, la demande totale en énergie est bien moindre comparée à celle de l'ampoule incandescente, et quasi identique à celle de la lampe fluorescente compacte, même si elle constitue cependant le plus gros poste d'impacts.

Figure 20: Demande d'énergie primaire pour la fabrication et l'utilisation des lampes considérées dans la LCA réalisée par Osram.



Source : Osram (2009)

Une tendance similaire, à savoir un impact plus grand lors de l'utilisation de la lampe que pendant sa fabrication, est observée au niveau du potentiel de réchauffement global [kg CO₂-Eq./Lamp(s)], du potentiel d'acidification [kg SO₂-Eq./Lamp(s)] et d'eutrophisation [kg PO₄-Eq./Lamp(s)]. Par contre, le potentiel de création d'ozone photochimique [kg Ethene-Eq./Lamp(s)] est plus important pour la production de la LED que pour les autres lampes, car le processus de fabrication de la diode génère des déchets chimiques susceptibles d'agir en faveur de cette création. Pour toutes les lampes, le potentiel de toxicité sur l'homme [kg DCB-Eq./Lamp(s)] est plus important lors de la fabrication que l'ensemble des autres impacts analysés (OSRAM, 2009). L'analyse du cycle de vie montre enfin que la consommation de gaz et de charbon est le facteur dominant du potentiel d'appauvrissement abiotique, et non celles des matières premières qui composent les lampes. La conclusion est que la LED se défend donc tant au niveau de la consommation énergétique qu'au niveau des autres impacts sur l'environnement.

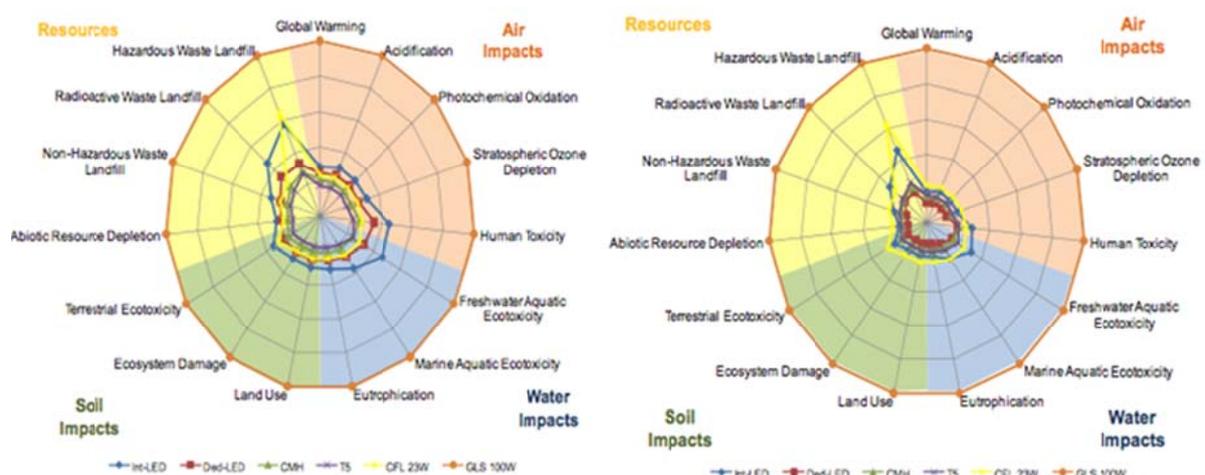
Cette évaluation nous indique une tendance. Elle a cependant des limites, dont une non négligeable, puisqu'elle considère l'incinération des lampes comme l'unique possibilité en fin de vie. Bien que

cette hypothèse soit appliquée à l'étude des trois ampoules, cette considération n'est pas réaliste pour tous les pays européens (cadre de l'étude pour la fin de vie), car dans certains états membres, comme en Belgique et en France, un système de récupération existe, assuré respectivement par Récupel et Récylum. Il aurait donc été plus correct de considérer une collecte partielle des lampes, et une valorisation de celles-ci en fin de vie. Cela aurait certainement creusé l'écart à l'avantage de LED entre celle-ci et l'ampoule à incandescence, puisque pour cette dernière rien n'est prévu. Pour la LED, une valorisation des matériaux aurait pu être envisagée.

Une seconde étude, menée par Navigant Consulting Europe pour le DEFRA, évalue le cycle de vie de lampes ultra efficaces. Six lampes ou luminaires ont été considérés dans cette étude. La couverture étudiée est donc plus large. Il s'agit d'une lampe LED avec ballast intégré (contenant dix diodes), d'un luminaire LED (appelée Ded-LED sur la figure ci-dessous), d'une lampe halogène à iode métallique (CMH), d'une ampoule fluorescente linéaire de type T5, d'une ampoule fluorescente compacte (CFL) et d'une ampoule incandescente. Leurs temps de vie respectifs sont de 20.000, 50.000, 12.000, 24.000, 6.000 à 15.000 et de 1.000 heures. Les unités fonctionnelles sont une efficacité opérationnelle de 100 lumens (mesure le flux lumineux d'une source de lumière) ou plus par Watt, et une qualité de lumière blanche représentée par une température associée à la couleur blanche comprise entre 2.500 et 4.000K (DEFRA, 2009). Cette étude utilise la base de données des évaluations des impacts de cycles de vie (Ecoinvent) pour évaluer selon quinze indicateurs environnementaux, la production des matières premières utilisées, la fabrication des lampes, leur distribution, leur utilisation et les impacts en fin de vie (DEFRA, 2009).

Il ressort de cette étude, comme de la précédente d'ailleurs, que c'est l'étape d'utilisation qui domine les impacts environnementaux, et ce, principalement de par la consommation d'énergie. Les résultats de l'étude pour les différents indicateurs ont été synthétisés dans le premier graphe araignée ci-dessous. Le deuxième graphe extrapole l'évaluation des indicateurs pour une efficacité fonctionnelle future accrue des lampes.

Figure 21: Evaluation relative en 2009 (a) et future (b) des impacts du cycle de vie de 6 types de lampes ou luminaires. L'évaluation future considère une augmentation de l'efficacité des lampes considérées.



Source : DEFRA (2009)

Il apparaît que la lampe LED semble impacter le plus l'environnement par rapport aux autres lampes, notamment en terme de déchets dangereux enfouis dans le sol et de toxicité humaine. Pour cette dernière, il ne peut être discuté que les lampes contiennent des composés toxiques ou dangereux pour l'homme. Cependant, cette étude suppose que la majorité des lampes et luminaires considérés dans l'étude ne seront pas recyclés ou éliminés de façon appropriée (DEFRA, 2009). Elle fait donc l'hypothèse que seulement 20% des lampes de chaque catégorie sont recyclés après collecte, les 80%

restant étant mis en décharge (DEFRA, 2009). Une telle considération conduit aux résultats obtenus du fait de l'accumulation, même si les produits dangereux sont présents en faible quantité. Cette étude date de 2009, et jusque tout récemment au Royaume-Uni (cadre de l'étude), 75% des déchets de biens électriques, dont les lampes, finissaient à la décharge. Ceci explique l'hypothèse peu réaliste pour d'autres pays, et même aujourd'hui pour le Royaume-Uni, où un programme de recyclage des lampes existe maintenant.

D'une manière générale, les moins bons résultats obtenus pour la LED peuvent être contestés. L'analyse initiale se base en effet sur une efficacité de 60 lm/W pour la LED. Pour une efficacité de la LED de 102 lm/W, les valeurs obtenues pour les indicateurs se rapprochent fortement de ceux obtenus pour les autres lampes comme le montre la figure 21 (b). Il faut aussi noter que OSRAM a mis au point en 2011 des LED à lumière blanche ayant une efficacité de 142 lm/W, et qu'un autre fabricant a obtenu une efficacité de 160 lm/W pour une LED à base de GaN. On est donc largement au-dessus des valeurs considérées pour les évaluations. Pour les efficacités atteintes en 2011, les valeurs des indicateurs seraient sans doute très réduites, faisant de la LED un élément incontournable pour l'environnement en matière d'éclairage (Whitaker, 2011a ; Wright, 2011).

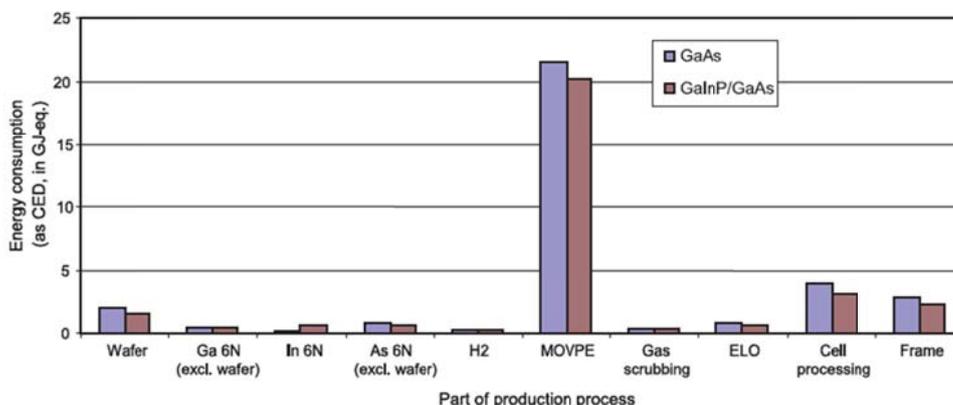
De cette étude, on ne peut malheureusement pas utiliser le résultat en matière d'épuisement des matières premières, car Ecoinvent utilise l'antimoine (Sb) comme indicateur, ce qui n'est pas adapté au cas des LED à lumière blanche. Un autre indicateur tel que le gallium ou l'indium aurait été plus judicieux.

3.4.2 Le photovoltaïque

Pour le photovoltaïque, il y a quelques ACV intéressantes, notamment deux études réalisées en 2002 et en 2006. Parmi les technologies couvertes, il y a la technologie en double couche mince GaInP/GaAs et en couche mince GaAs. Ces dernières sont développées sur substrats de GaAs réutilisables faisant donc intervenir la ELO. L'unité fonctionnelle choisie est une capacité de 1 kilowatt au pic de puissance (1kWp) sous des conditions météorologiques néerlandaises pour un panneau photovoltaïque (Mohr et al, 2007).

Ces études considèrent que les couches minces sont produites par MOCVD (aussi appelé MOVPE). Il ressort des deux études que c'est cette étape dans la fabrication d'un panneau qui consomme le plus d'énergie.

Figure 22 : Energie primaire utilisée dans les différentes étapes de production de modules GaAs and GaInP/GaAs d'une capacité de 1 kWp³.



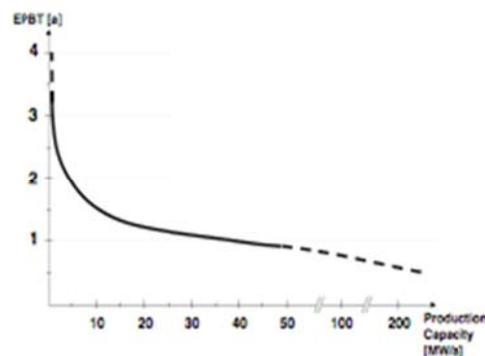
Source: Mohr et al (2007)

³ L'énergie nécessaire à la production du phosphore ne se trouve pas sur la figure car sa valeur est trop petite. (<0.1 GJ-eq.).

En outre, il apparaît que le temps de retour énergétique (EPBT), c'est-à-dire le temps d'utilisation nécessaire d'un panneau photovoltaïque permettant une compensation de l'énergie utilisée pour produire un panneau photovoltaïque, est plus grand pour la technologie en double couches minces GaInP /GaAs que pour la technologie multicristalline-Si. Ceci est dû à la consommation énergétique de la technologie MOCVD de croissance par épitaxie utilisée avec le gallium (Mohr et al, 2007). Dans l'étude, la fin de vie des modules solaires n'est pas considérée.

Une évaluation réalisée en 2008 de la durabilité de différents systèmes solaires (SENSE), dont le CIGS, montre que les améliorations futures permettant un accroissement de la capacité de production (pour atteindre une valeur supérieure à 100 MW/an par rapport à environ 20 MW/an aujourd'hui) auront un effet bénéfique sur l'EPBT et la performance environnementale (SENSE, 2008).

Figure 23 : Exemple d'évolution de l'EPBT pour la technologie CIGS.



Source: SENSE (2008)

Une dernière étude réalisée en avril 2011, qui visait une reformulation de la directive DEEE pour prendre en compte les panneaux photovoltaïques en fin de vie, montre clairement les bénéfices de toute initiative de collecte et de traitement. Cependant, lorsque ceux-ci sont encadrés par une politique, les bénéfices sont d'autant plus grands. La couverture totale (PV résidentiels et non résidentiels) ou partielle (résidentiels uniquement) des panneaux, quelle que soit leur technologie, par la directive signifierait en effet qu'un important pourcentage des panneaux seraient collectés, traités et recyclés de manière adéquate (ECDGENV, 2011). C'est maintenant chose faite, puisque les panneaux photovoltaïques sont couverts par la directive DEEE révisée début 2012. Leur recyclage est ainsi traité au chapitre suivant.

3.4.3 Les enseignements tirés des études

- Certains composés du gallium sont toxiques et dangereux et nécessitent pour leur fabrication dans les applications d'autres éléments également classés comme tels. L'arséniure de gallium est classé par l'IARC (Agency for Research on Cancer) comme étant cancérigène pour l'être humain. Disséminés en fines particules dans le corps, il peut en effet réagir plus facilement du fait d'une plus grande surface de contact, et libérer de l'arsenic qui risque de s'accumuler (Webb et al, 1984).
La croissance d'arséniure de gallium par épitaxie utilise de l'arsine (AsH_3), gaz toxique et même mortel, qui peut causer des lésions aux globules rouges, aux poumons, au foie, aux reins, au système respiratoire et au cœur (Praxair, 2010). Il est soluble dans l'eau et dans de nombreux liquides organiques. En conséquence, le potentiel de toxicité sur l'homme et les potentiels d'impacts sur les eaux sont souvent élevés.
- L'appauvrissement des ressources semble lié à la consommation d'énergie plus qu'à l'utilisation des matériaux critiques.
- Le recyclage en fin de vie des applications n'est pas ou très peu considéré dans les analyses.

- Les technologies à base de gallium sont en pleine évolution, et avec des efficacités en croissance, cela devrait conduire à des impacts environnementaux moindres, sauf si l'aspect économique est trop dominant pour faire les choix technologiques appropriés.

3.5 Analyse des gisements potentiel en gallium

3.5.1 A partir des pertes au cours de la production des composants

Sumitomo Electric, un fabricant de substrat en arséniure de gallium, estimait en 2003 que 40% du gallium qu'il utilisait pour la croissance cristalline était recyclé dans ce processus (JRC, 2011). C'est en effet lors de la fabrication du lingot, et lors de sa découpe que les déchets de GaAs sont le plus facilement récupérables, car ils sont alors en partie constitués de morceaux. 20% étaient encore récupérés auprès des fabricants de composants en arséniure de gallium, à partir de galettes cassées ou défectueuses, des boues d'amincissement de la galette et des déchets de matériaux de départ utilisés dans les techniques de croissance par épitaxie (JRC, 2011).

Ces 20% ne comprennent pas les excès de triméthylgallium et de triéthylgallium, puisqu'ils sont perdus à cause de la nature pyrolytique des composés. Les pertes en gallium, dans les méthodes utilisant ces précurseurs, sont les seules à ne pas pouvoir être diminuées par récupération de gallium dans l'état actuel des technologies. Or, ces pertes apparaissent tout de même comme étant non négligeables, selon la tentative d'évaluation de l'importance détaillée ci-dessous.

3.5.1.1 Situation

Rappelons qu'IMEC annonce une perte globale en gallium qui correspond à 80 % de la quantité initiale de gallium utilisé dans les techniques MOCVD et MBE.

Bien que la méthode MBE n'utilise pas le TMG, il y a des pertes en gallium sur les parois du réacteur. Comme déjà mentionné auparavant, Roskill, mais également Neo Materials Technologies Inc, estiment la demande en gallium pour 2010 à 280 tonnes (USGS, 2012b). Rappelons que ces chiffres comprennent les pertes, puisque ce sont les industriels producteurs qui « demandent ». Ils ne correspondent donc pas à la quantité véritablement délivrée à l'application. Notons enfin que le trichlorure de gallium mentionné dans le tableau ci-dessous est utilisé pour produire le triméthylgallium, précurseur utilisé dans les techniques MOCVD et MOVPE.

Le trichlorure de gallium n'est pas utilisé dans la technologie HPVE, car les deux atomes de chlore supplémentaires (par rapport au HCL) pousseraient la réaction de croissance vers un phénomène de gravure (décapage de la couche en formation), plutôt que vers la déposition.

Bien que le triéthylgallium puisse être utilisé comme précurseur dans les techniques MOCVD et MOVPE, il est moins favorable du fait de sa basse pression de vapeur (SAFC, s.d.), car il est moins stable que le TMG et qu'il entraîne de fortes réactions parasites (Photonics Lab, 2004).

La technologie MOCVD, et dans une moindre mesure la méthode MBE, domine largement la croissance par épitaxie. En 2010, poussés par la croissance rapide du marché des LED très brillantes, plus de 780 réacteurs MOCVD ont été livrés (USGS, 2012b). De plus, sur les sept plus grands fournisseurs de composants avec substrat de silicium et couche épitaxiale de GaAs, trois utilisent la technologie MOCVD, deux la technologie MBE, un les technologies MOCVD et MBE, et un la technologie MOVPE dont le précurseur est aussi du TMG. Par ailleurs, plusieurs fournisseurs de TMG ont augmenté leur capacité de production (USGS, 2012b).

3.5.1.2 Hypothèse

En conséquence, l'évaluation de l'importance des pertes en gallium se base sur l'hypothèse que la totalité du trichlorure de gallium consommé en 2010 est utilisée pour produire du triméthylgallium, lui-même unique précurseur de la technologie MOCVD.

3.5.1.3 Calculs

Sur base du brevet numéro 6495707 (Process and apparatus for production of organometallic compounds) assigné à Epichem en 2002, la productivité de triméthylgallium à partir de trichlorure de gallium est comprise entre 50 et 68% selon les variantes appliquées. Cependant en 2005, Epichem chiffrait à 75% la productivité de TMG à partir de gallium de qualité électronique (Mohr et al, 2007). N'ayant pu trouver une productivité actualisée, c'est ce dernier chiffre qui est utilisé.

Si on se réfère au tableau, sur base de la quantité de trichlorure de gallium consommé, la quantité de TMG utilisé dans les applications semi-conductrices a été comprise entre 13,25 et 15 tonnes.

Tableau 17: Estimation par Roskill de la quantité de gallium utilisé en 2010 pour différents domaines d'utilisation.

Domaine d'utilisation du Ga	Estimation de la quantité de gallium utilisé en 2010 (tonnes)
<i>Applications semi-isolantes</i>	140 à 145
Production des lingots pour la fabrication des substrats	133 à 142
Technologie MBE de croissance épitaxiale	2 ⁽¹⁾
<i>Applications semi-conductrices</i>	65 à 70
Fabrication des substrats	45 à 50
Trichlorure de gallium	15 à 20
<i>Photovoltaïque (seulement CIGS)</i>	4 à 20 ⁽²⁾
<i>Autres applications</i>	50

Source : Roskill (2011)

(1) ou plus mais certainement pas plus que dix tonnes

(2) suivant les technologies utilisées pour la construction des panneaux produisant 1GW

On peut donc dire que la somme de la quantité de gallium utilisée par la technologie MBE et de la quantité de TMG correspond à la quantité de gallium employée par les technologies MOCVD et MBE. Ceci donne pour 2010 une quantité globale de gallium comprise entre 15,25 et 24 tonnes pour ces deux méthodes.

3.5.1.4 Résultats

Si on utilise le pourcentage de perte communiqué par IMEC (80%), on obtient une perte en gallium comprise entre 10,6 et 19,2 tonnes en 2010. Par rapport à la consommation totale globale de 280 tonnes pour 2010, cette perte représente un pourcentage de 3,8 à 6,9%. Les pertes en gallium encourues lors de la production des couches par MOCVD et MBE correspondent donc, à titre indicatif, à une partie importante de la quantité de gallium utilisée pour le photovoltaïque (8%) en 2010.

3.5.2 A partir des applications en fin de vie

3.5.2.1 Gisements disponibles actuellement ou à court terme

Les déchets d'équipements électriques et électroniques générés dans l'Union Européenne (EU27) ont été identifiés comme le flux de déchets croissant le plus rapidement, et devrait atteindre 12,3 millions de tonnes en 2020 (Willians, 2010).

Parmi ceux-ci, les téléphones mobiles occupent une place particulière, avec approximativement 794 millions d'abonnés en Europe qui remplacent leur téléphone mobile en moyenne tous les 18 mois (Sallingboe, 2008). Ceci correspond à un gisement potentiel annuel de 500 millions de téléphones portables. Aucun autre appareil électronique n'a un taux de remplacement aussi élevé, et donc une durée de vie aussi courte (Uryu et al, 2003). Le contraste est d'autant plus impressionnant, quand on compare avec les LED et les panneaux photovoltaïques pour lesquels la durée de vie est bien plus longue.

Au début des années 2000, une analyse a estimé à 610 millions le nombre cumulé de téléphones portables jetés au Japon d'ici 2010, ce qui correspond à une quantité cumulée de gallium et d'arsénique dans ces téléphones mobiles de respectivement 142 et 93kg (Uryu et al, 2003).

Environ 130 millions de téléphones mobiles sont jetés annuellement aux Etats-Unis (MII, 2010). Un rapide calcul nous indique que l'ensemble correspond à une quantité potentielle d'environ 30kg de gallium. Cela peut paraître dérisoire. Rappelons alors que les smartphones de 4^{ème} génération contiennent six fois la quantité de gallium d'un téléphone portable de base. A taux de remplacement équivalent, on arriverait alors à une borne supérieure de 180 kg de gallium pour les USA dans les smartphones jetés. A l'échelle de l'Europe, on estime alors un gisement compris entre 116 et 696 kg sur base de chiffres de renouvellement de 2008.

Les téléphones portables constituent donc une source potentielle de gallium qui pourrait être recyclée et valorisée.

Ce n'est pas la seule car le gallium est présent dans les circuits intégrés et autres semi-conducteurs, mais aussi dans les LED soudés sur les cartes électroniques de nombreux autres appareils électroniques (ordinateurs, LCD, imprimantes pour n'en citer que quelques-uns). Une carte électronique est un système complexe, très hétérogène contenant un grand nombre de matériaux. C'est en fait un ensemble constitué d'un support isolant et de conducteurs métalliques plats (une ou plusieurs fines couches de cuivre), destinés à assurer les liaisons électriques entre des composants électroniques qui seront disposés à la surface du support (Williams, 2010).

Un rapport de l'UNEP sur les déchets électroniques nous renseigne sur le pourcentage des divers éléments, dont le gallium, dans un ordinateur après son démantèlement. Le tableau suivant reprend quelques données pour le gallium et l'indium indiqué à titre comparatif.

Tableau 18: Teneur et poids récupérable de gallium et d'indium après démantèlement d'un PC.

Elément	Teneur (% du poids total)	Efficacité de recyclage	Poids récupérable de l'élément (kg)
Gallium	0,0013	0%	0
Indium	0,0016	60%	0,00026112

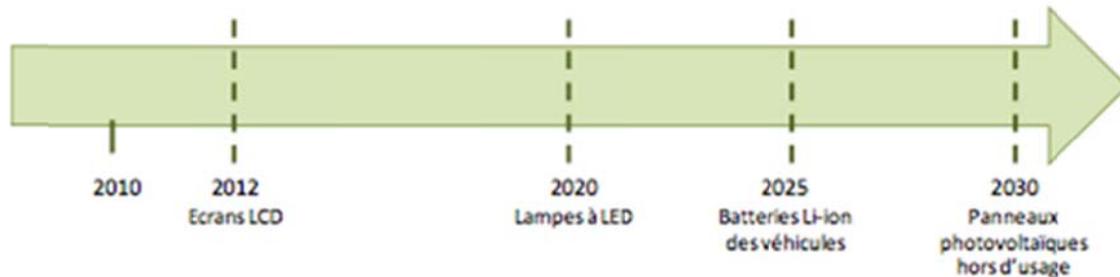
Source : UNEP (2007)

Alors que leur teneur dans un ordinateur démantelé est du même ordre de grandeur, l'indium est recyclé alors que le gallium ne l'est pas. Sans doute se trouve-t-il sous une forme plus complexe et plus dispersée compliquant sa récupération ? En tous cas, si on se base sur l'estimation de 12.750.000 ordinateurs en fin de vie aux USA en 2002, on peut dire qu'ils constituent eux-aussi un gisement potentiel (Xiang et al, 2007).

Plus généralement, tous les déchets électroniques contiennent des matériaux critiques qui n'attendent qu'à être traités dans des conditions adéquates et être valorisés. Ces montagnes de déchets portent bien leur nom de mines urbaines.

3.5.2.2 Gisements disponibles à moyen terme

Figure 24: Estimation de l'apparition de volumes significatifs de produits en fin d'usage pour diverses applications en développement.



Source : ADEME (2010b)

Dans la figure ci-dessus, les applications qui concernent le gallium sont les écrans LCD, les lampes LED et les panneaux photovoltaïques.

Cependant, la date indiquée pour les écrans LCD ne distingue pas les différentes sortes d'écrans plats. Ceux qui utilisent des LED pour le rétro-éclairage, et donc potentiellement du gallium, ne devraient pas atteindre leur fin de vie avant 2015, conformément aux estimations des parts de marché représentées à la figure 24. Des recherches indiquent toutefois que le taux de remplacement des téléviseurs LCD devrait être deux fois ceux obtenus avec les téléviseurs traditionnels à tube cathodique, du fait de l'évolution technologique (Corning, 2011).

Si il y a des LED sur les cartes électroniques, comme dans les écrans plats LCD-LED, elles sont soudées sur celles-ci et sont de taille très réduites (ADEME, 2010b). Par contre, elles dépassent de la surface des cartes, ce qui pourrait faciliter leur séparation (ADEME, 2010b). Elles pourraient ainsi constituer un gisement spécifique différent du reste de la carte et dont le gallium pourrait être recyclé.

Bien que faisant déjà partie du paysage au début des années 2000, les lampes LED sont de plus en plus utilisées dans l'éclairage domestique et général, depuis l'annonce en 2007 et le lancement en 2009 du programme européen de remplacement des lampes à incandescence. Il a été déterminé que ces lampes avaient des durées de vie de 20.000 à 70.000h (ADEME, 2010b). Ceci correspond à une période d'utilisation annoncée par les fabricants de 15 à 25 ans dans des conditions idéales. On estime donc le début de l'obtention de gisements significatifs à 2020 (ADEME, 2010b). Selon Récyclum, organisme chargé de la collecte et du traitement des lampes en France, le gisement en lampes LED s'élevait seulement à quelques dizaines de kilogramme par an avant 2010.

3.5.2.3 Gisements disponibles à long terme

Dans quelques années, les panneaux solaires constitueront eux aussi des mines. L'avenir se prépare maintenant. Cependant, la question de savoir à partir de quand la quantité de déchet de panneaux photovoltaïques contenant du gallium sera suffisante pour être exploitable et rentable est difficile à estimer.

Les panneaux CIGS ont commencé à être installés à partir des années 2000. Si on considère une durée de vie de 20 à 25 ans, on ne peut espérer une quantité suffisante à recycler avant 2030. Des études estiment même qu'avant 2050, la quantité ne sera pas assez grande pour générer un revenu (ECDGENV, 2011).

Les gisements mentionnés ne sont que des potentialités. Même en faisant l'hypothèse d'une collecte efficace, pour diverses raisons économiques ou autres (réutilisation, exportation des déchets), seule une partie des objets en fin d'usage, variable en fonction de leur type, constituera le véritable gisement.

A côté du problème de la quantité pour le recyclage, l'aspect prix joue également un rôle essentiel. La récupération et le recyclage sont aussi fondamentaux pour l'environnement. L'incinération de produits contenant du GaAs génère inévitablement des émissions toxiques qu'il faut traiter, ou bien les déchets électroniques abandonnés continueront à contaminer les eaux et sols de pays lointains où ils ont été exportés. Cependant, le recyclage des téléphones mobiles et autres objets électroniques ne peut croître que s'il est viable et rentable économiquement (MII, 2010).

Le recyclage du gallium sera traité plus en profondeur au chapitre suivant.

3.6 Aspects économiques

La difficulté avec les matériaux critiques, c'est d'arriver sur le marché avec la bonne technologie, rentable et soucieuse de l'environnement, au bon moment. Pour le gallium, comme pour d'autres métaux rares et critiques, prévoir la demande future pour ces technologies est un mélange d'art et de science (Roskill, 2011). Dans le cas du gallium, il y a plusieurs obstacles qui rendent difficile son évaluation.

Il y a notamment le secret qui entoure le monde du gallium. Les fabricants qui développent de nouvelles technologies veulent garder secret leurs nouveautés jusqu'à ce que leur mise sur le marché soit un succès, et également afin de protéger ces technologies en obtenant des brevets (Roskill, 2011).

Un autre obstacle est le prix du gallium souvent trop bas, mais qui fluctue également, et empêche des prévisions de rentabilité assurée.

La tâche se complexifie encore d'avantage étant donné le climat économique morose, et donc peu favorable à l'environnement, ce qui peut modifier à très court terme la courbe d'évolution de certains produits par rapport aux estimations de pénétration du marché et de croissance.

Voici deux exemples pour illustrer cette difficulté.

Depuis 2009, le marché des LED, et en particulier des LED ultra-brillantes (HB-LED), connaît une croissance exponentielle, comme prévue par Strategies Unlimited à la figure 25. Celle-ci est due à l'adoption des écrans LCD rétro-éclairage et à la pénétration des LED dans l'éclairage général (semiconductorTODAY, 2010). Ceci a mis une pression certaine sur la chaîne d'offre du gallium et de l'indium, augmentée début 2011 par une hausse du prix du gallium (Opto et Energy Solutions Newsletter, 2011).

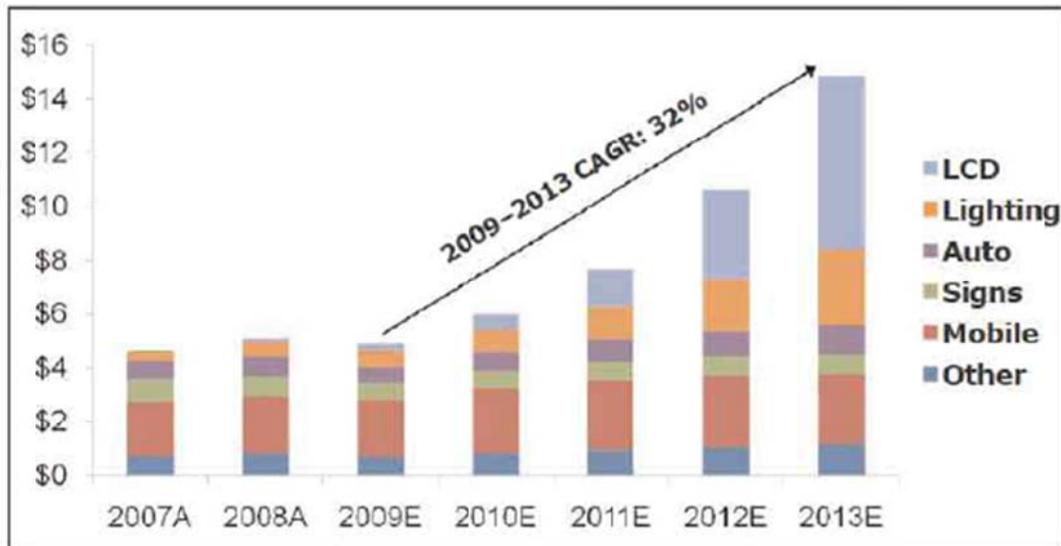
Pour être satisfaite, cette demande a eu au moins deux conséquences. La première a été l'augmentation des productions et des capacités de production du triméthylgallium (TMG) par tous les grands producteurs (Dow Electronic Materials, AkzoNobel, SAFC Hightech, Chemtura) (USGS, 2012b).

La deuxième a été la vente record de réacteurs MOCVD. Plus de 780 réacteurs MOCVD ont été livrés en 2010 (USGS, 2012b). La technologie MOCVD permet par rapport à d'autres technologies, et notamment par rapport à la méthode MBE, d'obtenir à la fois les plus bas coûts de production de galettes et des LED et le plus haut débit de production (Fischer, 2010). La croissance épitaxiale par MOCVD est l'étape la plus critique déterminant la brillance, la productivité et le coût total (semiconductorTODAY, 2010).

C'est aussi au cours de cette étape, comme mentionné et montré plus haut, que la conversion des matériaux utilisés est la plus faible et les pertes en gallium importantes et de surcroît irrécupérables. On peut relever ici une contradiction au niveau du choix d'une technologie qui permet de répondre à une très forte demande, induisant une pression importante sur la matière première gallium, mais qui elle-même génère des pertes de cette matière et en consomment beaucoup d'autres. L'aspect

économique à court-terme prime d'avantage par rapport au problème d'épuisement des matières premières, et donc par rapport à la sauvegarde de l'environnement.

Figure 25 : Marché des LED ultra-brillantes (en milliard de \$) : Strategies Unlimited, Août 2009.



Source : semiconductorTODAY (2010)

CAGR : représente le taux de croissance annuel du produit. A pour Actual c'est-à-dire valeurs réelles. E pour estimation.

En 2011, alors que la production mondiale de LED à base de GaN a augmenté de 36% en volume unitaire et a donc suivi la tendance prévue, la vente de ces LED n'a progressé que de 1% due à une croissance plus lente du rétro-éclairage LED (USGS, 2012b). Les nouvelles unités de production de TMG construites les années précédentes seront opérationnelles en 2012. Seront-elles toujours aussi nécessaires ?

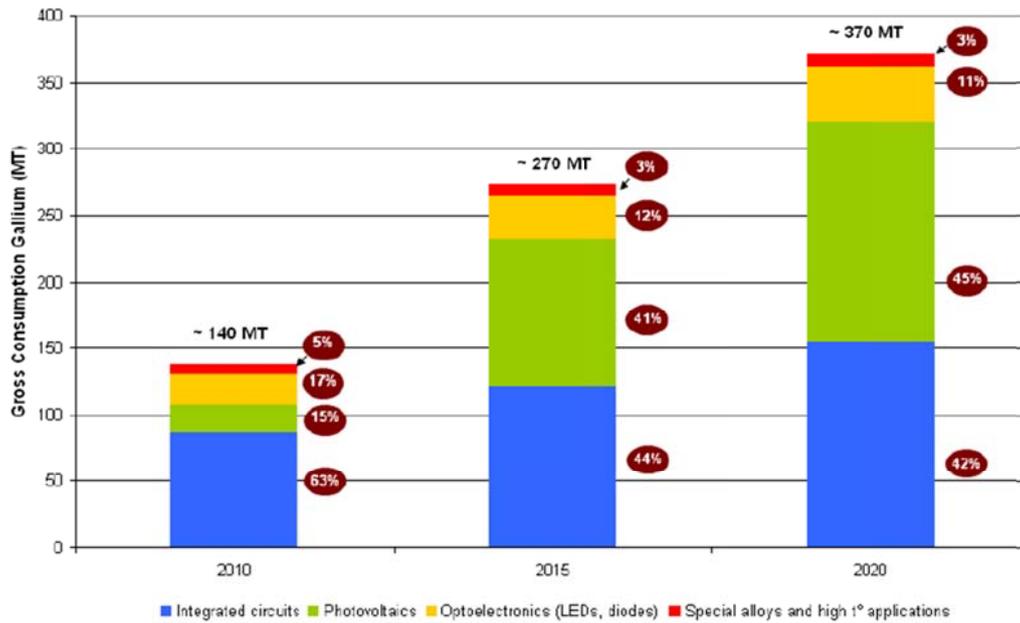
Le deuxième cas concerne la technologie CIGS que l'on prévoit en forte croissance également. Cependant en 2011, le marché s'est retrouvé en surproduction accompagnée d'une réduction des prix des modules CIGS, du fait de la complexité des procédés de fabrication contraignant la production en masse, mais aussi de la baisse des prix de panneaux en silicium à la base déjà moins onéreux (USGS, 2012b).

Dans de telles conditions, il est plus risqué d'investir et de prendre des initiatives en faveur d'une réduction de l'utilisation de matériaux critiques. Seules les entreprises ayant les reins solides financièrement sont capables de résister et de progresser.

Lorsque l'on regarde la figure 26, on constate que la consommation en gallium annoncée par Roskill pour l'année 2010 dépasse largement les estimations données par Öko-Institut (140 tonnes) présentées au chapitre 1. Ensuite, le pourcentage de gallium prévu pour le photovoltaïque (15%) est presque le double de celui avancé pour 2010 dans ce secteur (8%). Les prévisions de l'Indium Corporation montrées à la figure 27 indiquent quant à elles une utilisation du gallium plus conséquente pour le secteur LED que pour le photovoltaïque.

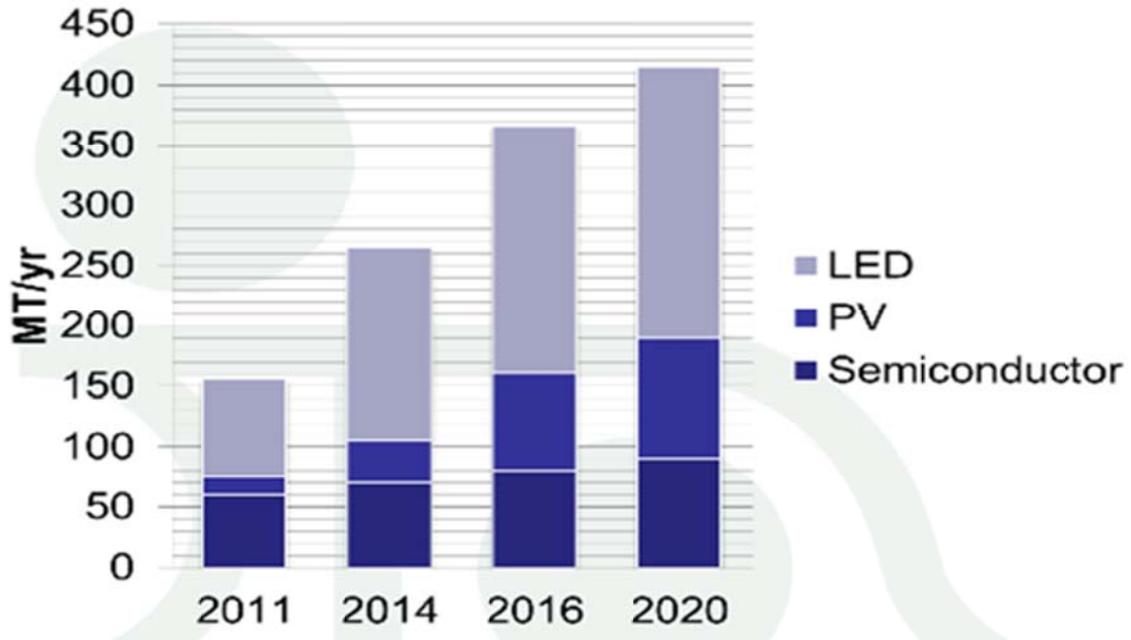
Cela confirme une consommation en gallium à la hausse, mais aussi une estimation difficile des besoins réels, tout comme d'ailleurs la traduction de ceux-ci en termes d'impacts, ou de potentiel sectoriel pour les productions primaire et secondaire. Quels seront véritablement le tonnage et le type de déchets à disposition des unités de recyclage du gallium ?

Figure 26: Pr evision de la consommation brute en gallium en million de tonnes et pourcentage par secteur d'application.



Source : ECEI (2010b)

Figure 27 : Pr evision de croissance des applications phares  mergentes du gallium.



Source: Murphy et al (2011).

3.7 Conclusion des chapitres 2 et 3

La production mondiale de gallium primaire pour 2010 est de 182 tonnes (USGS, 2011a). Dans la dernière édition du Roskill, elle est même estimée être comprise entre 201 et 212 tonnes. Quelle que soit la valeur exacte, elle semble être largement inférieure à la demande évaluée dans le Roskill 2011 à 280 tonnes. Or, au niveau mondial, le bilan offre-demande en gallium est globalement équilibré (BRGM, 2011). Sans les apports en gallium venant de la production secondaire, c'est-à-dire du recyclage et/ou de la consommation de stocks restant des années précédentes, cette demande n'aurait jamais pu être satisfaite.

Cependant, même si globalement la situation semble équilibrée, localement, en Europe par exemple, c'est plus complexe. L'Europe a besoin de gallium pour atteindre les objectifs qu'elle s'est fixés, notamment ceux du SET-Plan. Or, elle est clairement devancée par l'Asie, et la Chine en particulier, qui monopolise la production primaire et le raffinage.

La demande en gallium ne cesse de croître pour des applications de plus en plus diversifiées dans lesquelles la quantité unitaire de gallium est limitée, et tend même à diminuer (nanotechnologies). Malgré la difficulté du recyclage à partir de telles applications, l'Europe doit inciter celui-ci pour défendre sa position concurrentielle au niveau technologique.

L'actuelle production secondaire de gallium peut-elle continuer à répondre à la demande, surtout lorsque celle-ci est forte et soudaine ? Comment va-t-elle évoluer ? Nous allons faire le point sur celle-ci dans le chapitre suivant et tenter de répondre à ces questions.

Du point de vue environnemental, en dehors de la substitution, le recyclage est en tout cas l'alternative qui semble la plus plausible, compte tenu des impacts environnementaux de la production primaire et de l'improbabilité actuelle d'extraire plus de bauxite pour produire plus de gallium.

4. Production secondaire : opportunité économique et environnementale pour l'Union Européenne

4.1 Introduction

Selon le PNUE, l'Union Européenne gaspille 99% de ses métaux de haute technicité pour un taux de récupération en fin de vie nul ou à tout le moins inférieur à 1%! Le gallium fait partie de ces métaux gaspillés. Ce chapitre, qui est consacré à la production secondaire du gallium et donc à son recyclage, va tenter de déterminer pourquoi il en est ainsi et si la situation évolue.

Les sources de la production secondaire peuvent être de deux types : d'une part, les déchets de production de semi-conducteurs, ou autres alliages pour batteries ou aimants; d'autre part, les objets en fin de vie tels que les lampes et luminaires LED, les panneaux photovoltaïques, les téléphones mobiles et appareils électroniques contenant du gallium, ainsi que tout objet utilisant batteries et aimants à base de gallium. Ces sources correspondent aux deux flèches sur le schéma ci-dessous.

Figure 28 : La chaîne du gallium.



Source : JRC (2011)

La production secondaire du gallium vise différents objectifs : i) quantitatif : car elle permet une augmentation du tonnage de gallium disponible et, en conséquence pour certains pays, une autonomie d'approvisionnement plus grande; ii) financier : car parfois le prix du gallium peut être très élevé et il devient alors intéressant de le revendre ; iii) environnemental : en diminuant les impacts élevés relatifs à la production primaire par une consommation énergétique réduite, ainsi que par l'évitement de diverses pollutions dues à des objets abandonnés ou mal traités.

Ces objectifs sont déjà largement remplis par le recyclage à partir de déchets de production, en tout cas pour les semi-conducteurs à base de GaAs. Les déchets de production constituent à l'heure actuelle l'unique source utilisée pour le recyclage. Il faut alors se demander s'il y a encore une marge d'optimisation, et si ces objectifs peuvent être remplis par le recyclage d'objets en fin de vie. Le rapport du PNUE 'Recycling Rates of Metals' indique en tout cas que le gallium, comme les métaux perdus, sont « intrinsèquement recyclables » (Euractiv, 2011).

4.2 Recyclage du gallium à partir de déchets de production

4.2.1 La capacité de recyclage

Tableau 19 : Evolution des capacités mondiales de production primaire et de recyclage.

Année	Capacité de production primaire (t)	Capacité de recyclage (t)
2011	Entre 260 et 320	198
2010	Entre 184 et 260	141
2009	184	78
2008	184	78
2007	184	78
2006	Entre 160 et 184	73
2005	Entre 160 et 179	68

Source: USGS (2012a), USGS (2011a), USGS (2010a), USGS (2009a), USGS (2008), USGS (2007a), USGS (2006a)

Le tableau ci-dessus nous montre que la capacité de recyclage est forte augmentation. Elle a été multipliée par 2.5 en deux ans. La quantité de gallium recyclé n'est pas connue précisément mais, d'après Neo Material, le gallium recyclé compterait en 2010 pour 50% du gallium consommé (USGS, 2012a).

4.2.2 Recyclage des déchets de production des semi-conducteurs

On estime que le recyclage des déchets de production dans le domaine des semi-conducteurs GaAs est optimisé à plus de 90%, grâce à l'accessibilité et à la maturité des technologies (JRC, 2011). Il est par exemple recommandé d'utiliser certains types de filtres, qui permettent de récupérer les particules de GaAs des eaux (Burke, 2011). Pour rappel, la productivité en termes de gallium utilisé n'excède pas 20% (Fedorov, 2006). Du point de vue des semi-conducteurs en arséniure de gallium, cela correspond donc à une perte de seulement 8% de gallium.

Les déchets sont généralement broyés. Le gallium est extrait par lixiviation dans une solution acide chaude. La solution acide est neutralisée et l'hydroxyde de gallium précipite. Il est filtré et lavé. Le gâteau ainsi produit est dissous dans une solution caustique, dont du gallium de pureté 3 ou 4N est obtenu par électrolyse (USGS, 2003b). Un raffinage supplémentaire permet d'aboutir à une pureté supérieure à 6N (Roskill, 2011).

On ne dispose pas d'une quantification de la diminution des impacts sur l'environnement pour le recyclage des déchets de production des semi-conducteurs. Néanmoins, on peut dire que le procédé semble moins complexe et que le nombre d'étapes est plus limité par rapport à la production primaire, pour un résultat en terme de pureté du gallium similaire ou supérieur. Bien que ces déchets soient contaminés par divers éléments au cours des étapes de production, la concentration en gallium est plus élevée comme le montre le tableau 20. De moins grandes quantités d'acides sont donc nécessaires. De plus, comme la majorité des déchets est considérée comme dangereuse, le recyclage permet de les valoriser. Les impacts sur l'environnement ne peuvent donc qu'être moindres. Notons toutefois que le recyclage présenté ci-dessus fait partie d'un flow-sheet spécifique. Dans d'autres métallurgies, le déchet de production est remonté d'une, deux ou trois étapes dans le même flow-sheet, ce qui réduit certains impacts.

Tableau 20 : Caractérisation des principales sortes de déchets contenant du gallium d'une galette GaAs.

Procédé	Type de déchet	Pourcentage de Ga dans le déchet
Croissance cristalline et production de la galette	- Résidu du creuset dans lequel a eu lieu la croissance du monocristal - Monocristal rejeté - Morceaux du lingot suite à son dimensionnement - Galettes cassées ou rejetées	39 à 48 %
	- Poudre provenant du dimensionnement du lingot de monocristal - Poudre provenant de la découpe en galette et du tournage	≤ 30 à 46%
	- Résidu du polissage	< 1%
Croissance LPE et VPE de couches par épitaxie	- Couches défectueuses	≤ 47%
Croissance VPE de couches par épitaxie	- Gaz d'échappement	6 à 15%
Croissance LPE de couches par épitaxie	- Résidu de la phase de croissance	87 à 99,99%

Source: Fedorov (2006) ; Roskill (2011)

Un procédé, qui a été développé il y a une dizaine d'années au Canada, permet d'obtenir une pureté très grande de 7N. Après broyage des déchets, ce procédé consiste en plusieurs extractions par solvant et une électro-purification (Moskalyk, 2003; USGS, 2003b). Il existe également d'autres procédés

directement intégrés dans la boucle des opérations de raffinage et de production de GaAs (USGS, 2003c).

Les grands acteurs du recyclage sont le Japon, la Chine, l'Allemagne avec PPM Pure metal dont la capacité de recyclage est supérieure à 10 tonnes, le Royaume-Uni avec MCP, la Slovaquie avec CMK et le Canada et les USA avec Neo Performance Materials. Le Japon, avec différentes firmes, et Neo Performance Materials dominent le secteur.

Dans ce créneau qu'est la production secondaire, l'Europe est mieux positionnée par rapport à l'Asie, en termes d'acteurs impliqués, qu'elle ne l'est pour la production primaire. L'Europe pourrait peut-être développer davantage le secteur si un procédé était développé pour le recyclage, inexistant aujourd'hui, des déchets de croissance par épitaxie MOCVD. Malheureusement, la marge de manœuvre est réduite du fait du caractère pyrolytique et dangereux des intrants.

4.2.3 Recyclage des déchets de production des cellules CIGS

Bien que la conversion des matériaux en couche mince pour le photovoltaïque soit d'environ 50%, et donc plus grande que l'efficacité des autres procédés de la filière semi-conducteur, l'autre moitié se dépose contre la surface intérieure des chambres à vide, dans laquelle a lieu la déposition de l'alliage Cu(In,Ga)Se_2 (Réponse d'UMICORE à l'enquête). Roskill annonce même un plus haut potentiel de recyclage pour le gallium compris entre 66 et 75% (Roskill, 2011).

UMICORE a développé un procédé qui permet le traitement des déchets de production des cellules photovoltaïques CIGS. Les cellules défectueuses ne sont pas considérées. Ce procédé a été intégré dans les installations existantes à Hoboken en 2010. La capacité est de 50 tonnes par an. Ce procédé recycle donc la poussière de la chambre à vide et aboutit à la production de produits finis pour le cuivre, l'indium et le sélénium. Quant au gallium, il se trouve sous la forme d'un concentré d'hydroxyde de gallium qui est purifié par les raffineurs de gallium. Ce concentré contient de 20 à 40 % de gallium pour une concentration dans les déchets comprise entre 6 à 10 % de gallium (Réponse d'UMICORE à l'enquête). Cela correspond à la réalisation d'une concentration d'un facteur trois.

C'est un procédé hydro-métallurgique assez compliqué, aux dires de M. Harald Oosterhof, responsable du laboratoire dans lequel il a été développé. Il semble en effet qu'aucune autre compagnie n'offre ce service de recyclage à ses clients. Notons toutefois que Roskill mentionne l'intégration des déchets de production de cellules CIGS par Neo Performance Materials dans son recyclage.

Le procédé mis au point par UMICORE consiste en une lixiviation des déchets, au cours de laquelle ils sont dissous, ainsi qu'une série d'étapes de raffinage qui conduit à la séparation des quatre métaux. Au niveau environnemental, la pollution la plus importante issue du procédé est de l'eau salée (Na_2SO_4 et/ou NaCl), ce qui n'est ni dangereux ni toxique. L'usine possède aussi un dispositif de traitement des eaux de manière à être en-dessous des limites imposées par le gouvernement flamand en termes de rejets (Réponse d'UMICORE à l'enquête).

Cette démarche de fermeture d'une boucle de production par le recyclage des déchets engendrés est primordiale. Tout d'abord, il s'agit d'une valorisation de déchets classés comme dangereux dans le cas particulier des cellules CIGS. Ensuite, cela permet un découplage de la production primaire, car on récupère plus efficacement un métal difficile à produire et dont la demande croît. Enfin, ces déchets contiennent des éléments de valeur dont les prix peuvent monter très vite. Une partie de cette valeur est donc restituée aux clients producteurs qui peuvent la réinvestir ailleurs.

La mise en place d'autres procédés pour la récupération du gallium, à partir des déchets de production d'aimants, devrait être envisagée également, puisqu'il est vraisemblable que ce domaine consomme davantage de gallium à l'avenir.

4.2 Recyclage du gallium à partir d'objets post-consommation

Comme cela a été mentionné, il n'existe à l'heure actuelle aucun recyclage industriel du gallium à partir d'objets en fin de vie. Plusieurs éléments expliquent cette situation.

4.2.1 Absence de recyclage : pourquoi ?

Le premier élément justificatif est d'ordre quantitatif et qualitatif. La quantité de gallium présente dans les objets en fin de vie est souvent minime, et le gallium y est dispersé voire très dispersé. Le gallium est en outre majoritairement allié avec d'autres éléments conduisant à des composés dangereux et toxiques. Plus un élément est dispersé physiquement et chimiquement, plus son recyclage sera complexe (EP0W, 2010). La séparation d'une matière sera d'autant plus difficile que de petites quantités de celle-ci doivent être récupérées d'un large volume de déchets. Le tableau suivant témoigne de ces différents aspects. De surcroît, comme expliqué précédemment, certains gisements ne seront pas disponibles avant plusieurs années.

Tableau 21: Description de déchets par rapport au gallium.

Type de déchets	Etat/forme du métal	Quantité et concentration en métal	Accessibilité du métal
Circuits intégrés	GaAs en majorité	≤ 0.01 % dans un microprocesseur	Très dispersé
LED	GaN en majorité	$0.53 \mu\text{g}$ pour 1mm^2 càd $< 0.01\%$ du poids de la diode	Très dispersé
Cellules Photovoltaïques CIGS	$\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$	La couche d'alliage représente 1% en masse. *	Dispersé

Source : Angerer (2009), ADEME (2010), Réponse enquête IMEC (2011), Réponse enquête Revatech (2012)

* Dans un panneau, il y a environ 0.01% de gallium en masse.

En ce qui concerne la faible concentration des métaux critiques dans les objets en fin de vie, la situation pourrait être pire à l'avenir, car le leitmotiv dans l'industrie électronique est d'utiliser le moins de matière possible dans ses composants. Grouper les sources et attendre d'avoir des stocks conséquents pour l'obtention de flux plus riches en éléments peu concentrés facilitera leur recyclage et pourrait donc inverser la tendance (EP0W, 2011).

L'aspect prix joue également un rôle essentiel dans l'absence de recyclage. Comme le montre la figure 29, celui du gallium et de l'indium (auquel le gallium est associé dans certaines applications) évoluent ces dernières années en ligne avec l'indice du prix des matières premières (indice CRB)⁴, et sont donc très sensibles à la conjoncture mondiale.

Il est intéressant de constater toutefois que lorsque l'on rebase à 100, afin de pouvoir comparer entre elles les progressions en valeur absolue de différentes commodités, la progression des prix du gallium et de l'indium est très largement inférieure à celle de l'indice CRB, et en particulier à celui du pétrole depuis 2004. C'est ce que l'on peut voir à la figure 30. En d'autres termes, si sa valeur suit les aléas de la conjoncture, l'aspect critique et stratégique du gallium n'est pas encore suffisamment reflété dans les prix de marché. Le gallium n'a d'ailleurs notamment pas bénéficié de la spéculation qu'ont connue les terres rares.

⁴ CRB : L'indice Reuters-Jefferies CRB est un indice des prix des matières premières. Il est composé des prix de 19 matières premières cotées sur les marchés d'échange NYMEX, LME et CME. Ces prix sont agrégés en 4 groupes, auxquels un poids spécifique est attribué : le groupe des hydrocarbures, celui des actifs liquides, celui des actifs très liquides, et celui des matières premières diverses. C'est l'indice le plus communément utilisé dans les marchés financiers pour suivre l'évolution générale du prix des matières premières.

Figure 29 : Evolution des prix (en \$) du gallium et de l'indium (LHS) et l'indice général CRB du prix des commodités (RHS) depuis 2004.



Note: LHS (Left Hand Scale) ou axe gauche ; RHS (Right Hand Scale) ou axe droit

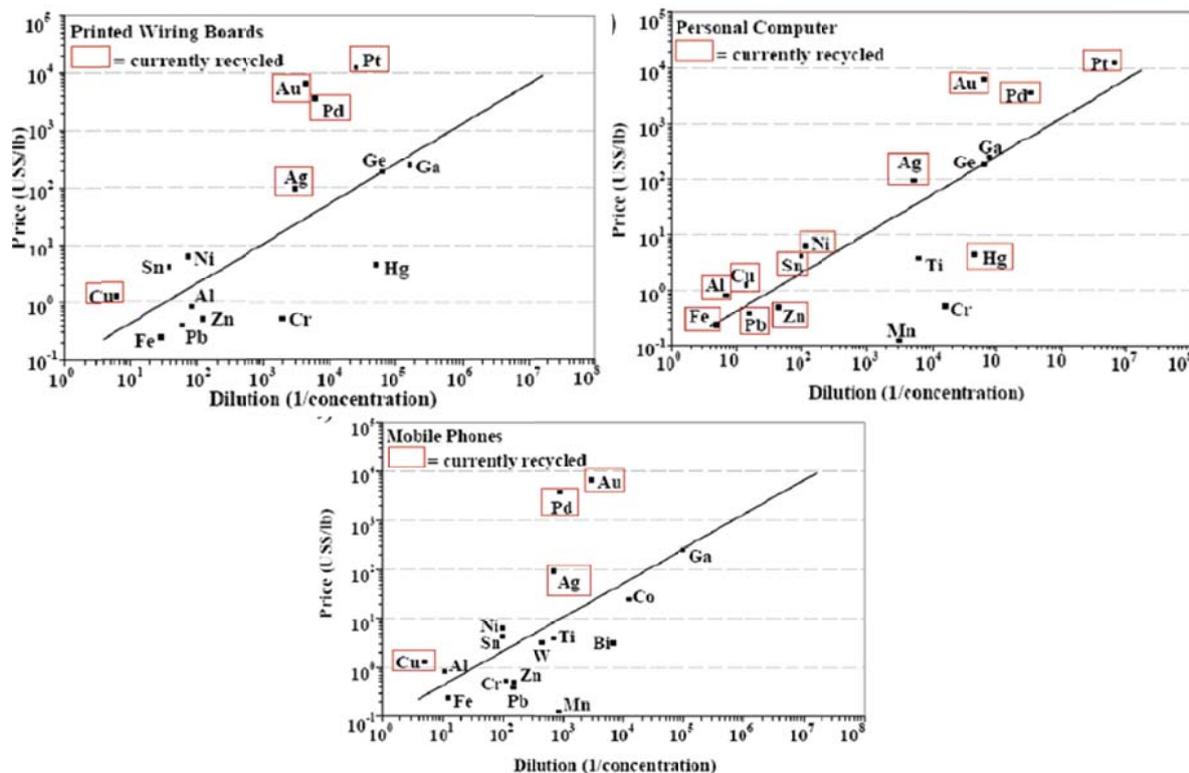
Figure 30 : Evolution des prix (en \$) du gallium, de l'indium (LHS), de l'indice général CRB du prix des commodités et du pétrole rebasé à 100 depuis 2004.



Si « les opportunités de récupération des déchets post-consommation sont beaucoup plus limitées du fait des quantités très limitées dans ces produits » (JRC, 2011), cela s'explique essentiellement par la relation qui existe entre les matériaux qui sont recyclés dans un produit après consommation et leur prix et degré de concentration. C'est ce que représentent les figures 31a, b et c respectivement pour les cartes électroniques, les ordinateurs et les téléphones portables. La droite de régression telle que calculée par Sherwood avec des prix de 2004 montre en effet que le gallium se situe souvent juste à la limite. Compte tenu du fait que le prix actuel est plus ou moins identique à celui de 2004, il n'existe

donc toujours pas d'incitants économiques suffisants pour stimuler la récupération post-consommation, tandis que la capacité de substitution reste limitée.

Figure 31 : Relation entre la concentration des divers métaux et le prix du métal pour a) les cartes électroniques, b) les ordinateurs et c) les téléphones portables.



Source : Johnson et al (2007)

Le troisième élément qui explique le faible taux de récupération est d'ordre environnemental. Il a été en effet calculé que la récupération du gallium d'un objet en fin de vie ne bénéficiait guère à la réduction des émissions de CO₂. L'essentiel de l'impact provenant de l'utilisation du gallium est associé à son traitement dans le composant (EP0W, 2011). Par exemple, dans la fabrication d'un semi-conducteur au gallium, on estime que la production du gallium compte pour moins de 2% de l'impact global sur les émissions de carbone (EP0W, 2011). Les avantages de la récupération des matériaux critiques, tel que le gallium, sur les émissions de carbone sont susceptibles d'être négligeables sur une base unitaire, et petits même à grande échelle (EP0W, 2011).

4.2.2 Les projets de recyclage du gallium post-consommation

Cependant, si aucun projet de recyclage du gallium post-consommation n'était connu en 2010 et au début de 2011, la situation est en train d'évoluer, tant la demande en gallium a été importante ces derniers temps, ce qui avait d'ailleurs mené à des hausses importantes de son prix l'année dernière.

Au Canada, la société Process Research ORTECH a travaillé au développement d'un procédé technologique propre. Il permet de récupérer et de raffiner du gallium, afin d'obtenir du gallium métal de très haute pureté à partir de semi-conducteurs en arséniure de gallium provenant notamment des téléphones portables. L'arsénique se retrouve quant à lui dans un sous-produit stable et sûr pour être éliminé (Ortech, s.d.).

Plus près de nous, en Wallonie, on recense également deux projets qui visent la récupération de divers éléments parmi lesquels le gallium. Nous les présentons plus en détail ci-après.

C'est sous l'impulsion du département de recherche et développement de la société COMET Traitements pour le premier projet, et de REVATECH SA pour le second, qui par leur veille technologique ont pressenti la nécessité de valorisation de matières et la problématique des métaux critiques, qu'une demande de subsides a été adressée auprès de la Région Wallonne pour mener à bien ces projets. Un consortium a été mis place pour les deux projets.

4.2.2.1 Valorisation d'un produit obtenu par un procédé développé dans le cadre du Projet Phoenix et comparaison avec le procédé existant d'Umicore

Le premier projet a discrètement démarré en 2009 après avoir été labellisé dans le cadre du pôle MECATECH du plan Marshall. Il précède donc l'établissement de la liste des matières critiques pour l'Europe par l'UE. Il est le fruit d'une part, d'une collaboration entre trois entreprises, dont la société COMET Traitements (Groupe COMET) située à Châtelet, et de trois centres de recherche, dont le CERTECH (Centre de ressources technologiques en chimie) et le laboratoire GeMME (Génie Minéral, Matériaux et Environnement) de l'Université de Liège, et d'autre part, d'un cofinancement public-privé.

Le projet Phoenix a pour but de développer un procédé intégré, à basse température, pour la valorisation globale des matières organiques contenues dans les résidus de broyage de déchets métalliques (Comet, s.d.). Différents produits sont issus de ce procédé dont des métaux. Un second objectif, celui qui nous intéresse dans le cadre de ce travail, est aussi la récupération de métaux précieux et spéciaux de ce sous-produit.

Les objets en fin de vie préalablement séparés (séparation densimétrique, par courant de Foucault et magnétique) sont traités par la société Comet. Les objets post-consommation couverts par le projet sont les véhicules en fin de vie (VHU), les DEEE, c'est-à-dire notamment les cartes électroniques (Printed circuit boards), les téléphones mobiles, les moniteurs LCD et autres déchets électriques et électroniques. L'objectif est un recyclage de 4.000 tonnes de déchets par an (Réponse enquête ULg, 2012).

Le procédé qui est en train d'être développé pour la récupération des métaux est assez complexe car le nombre de métaux à extraire est important. Il consiste en une étape de mise en solution des résidus contenant les éléments métalliques par des solutions acides oxydantes (solvolyse développée par le CERTECH). Les métaux - Cu, Zn, Fe, terres rares, In, Ga - vont être dissous alors que d'autres tels que Pb, Sn vont être enrichis dans le résidu solide. Les éléments présents dans la solution vont ensuite être récupérés sélectivement par des procédés tels que l'extraction par solvants et la précipitation sélective (Réponse enquête ULg, 2012). Ceci devrait permettre d'obtenir des métaux relativement purs. Le gallium sera vraisemblablement récupéré sous la forme d'un de ses oxydes ou sels organiques. Il n'y a pas encore de prévision du tonnage de gallium qui sera récupéré.

Si on se focalise sur la récupération des métaux, les avantages du procédé développé sont les suivants :

- Il permet d'éviter les grands fours traditionnels qui nécessitent des équipements de traitement des gaz et de purification des eaux usées que peu d'installations possèdent, et qui sont pourtant indispensables sous peine de contribuer fortement à l'empreinte écologique.
- Une très grande variété de déchets est considérée. Il est prévu de les traiter simultanément. Aujourd'hui, quand ils sont recyclés, c'est souvent en filière séparée ce qui conduit à des concentrations plus limitées en métaux critiques tels que le gallium. La valeur économique n'est alors pas suffisante pour inciter à la mise en œuvre de procédés de récupération.
- C'est un projet innovant et pionnier en matière de recyclage du gallium à partir de cartes électroniques, puisque, malgré l'existence d'unités de traitement de celles-ci comme à Hoboken par Umicore, le gallium n'en est pas extrait.

- Il est flexible. En effet, d'autres types de déchets pourraient s'ajouter ultérieurement. Par ailleurs, il ne se limite pas dans le cas du gallium aux sources avérées que sont les téléphones mobiles et les cartes électroniques. Comme on l'a vu au chapitre 3, ce n'est que dans quelques années que l'on aura des stocks conséquents de LCD LED contenant du gallium. Il en est de même pour les véhicules dans lesquels des LED auront été utilisées pour le rétro-éclairage du tableau de bord par exemple. Prévoir maintenant la récupération du gallium permet non seulement de valoriser les sources actuelles, mais aussi de tableer sur un potentiel plus grand d'ici quelques années.
- Ce processus se base une récupération couplée : un nombre limité de métaux dits « payants » fournissent l'incitant financier pour le recyclage d'autres éléments de valeur économique et/ou de concentration moindre (comme le gallium) (Hagelüken, 2010).
- C'est un projet qui une fois exploité pourra être bénéfique à la fois économiquement, par la valeur des éléments récupérés et la création de l'emploi, et socialement, particulièrement si un démantèlement manuel nécessitant de la main d'œuvre est envisagé en plus des procédés physiques.

Pour illustrer certains de ces avantages, on peut analyser le recyclage actuel des cartes électroniques et des téléphones mobiles qui contiennent eux-mêmes des cartes électroniques. On en trouve encore dans les ordinateurs ou les télévisions.

Umicore possède à Hoboken une unité basée sur un procédé thermique et hydro-métallurgique qui sépare et récupère des métaux précieux, ainsi que d'autres métaux de base et spéciaux. Le gallium n'est pas recyclé, car il se retrouve en concentration trop faible, et il finit dans les scories après oxydation où il peut aussi se volatiliser suivant les conditions d'atmosphère et de température (Williams, 2010). Il est donc perdu alors que ce procédé permet de récupérer 17 éléments dont l'indium (Hagelüken, 2005). Avec d'autres procédés, le problème des températures ne se poserait pas.

Le four est alimenté par différents déchets industriels, par des sous-produits d'autres industries non-ferreuses ainsi que par d'autres déchets recyclables, comme des catalyseurs ou cartes électroniques et autres appareils électroniques (téléphones mobiles, ordinateurs portables). Avant l'entrée dans le four, les déchets subissent une préparation spécifique à chaque type, comme le démantèlement de certaines parties par exemple.

Les déchets de petites tailles, tels les téléphones portables, ne sont pas démantelés à l'exception de la batterie qui est retirée. Vu que les coûts de démantèlement sont bien plus élevés par rapport aux gains environnementaux, certaines matières servent de combustibles (Hagelüken, 2005). De plus, il n'y a pas d'obligation par la DEEE de tri sélectif des cartes électroniques dont la surface est inférieure à 10 cm² (ADEME, 2010b). Une séparation plus poussée faciliterait sans doute une valorisation des déchets contenant du gallium.

Des recherches sont en cours pour développer de nouvelles technologies permettant l'extraction d'autres métaux des déchets. Umicore explore notamment de nouvelles méthodes de récupération des terres rares, mais celles-ci ne sont pas actuellement exploitables au niveau commercial. Christian Hagelüken d'Umicore n'a pas souhaité divulguer s'il y avait des recherches similaires pour le gallium au sein de l'entreprise.

Cependant, des doutes sont exprimés sur les possibilités des procédés thermiques actuels de recyclage à pouvoir permettre la récupération des éléments critiques restants comme le gallium, et ceci pour les raisons expliquées ci-dessus (JRC, 2011).

En ce qui concerne le flux de déchets d'équipements électriques et électroniques, la Commission a proposé un nouvel objectif de collecte ambitieux, qui garantirait que 85% du flux de DEEE soit disponible en vue de la valorisation des matières premières qu'il contient, au lieu d'être perdu à la suite d'un traitement inadéquat (EC, 2011). Les quantités de DEEE disponibles pour le traitement thermique vont donc inévitablement augmenter. Or, actuellement, la quantité de déchets qui alimente

les fonderies conventionnelles en Europe est limitée à 6% des disponibilités. Ces chiffres font donc craindre une capacité insuffisante dans l'Union Européenne pour traiter ce flux supplémentaire (EP0W, 2011), d'où l'intérêt de se tourner vers d'autres procédés, tels que le procédé mécanique et catalytique du projet wallon ou encore le procédé chimique. Cependant, ce dernier conduit à la production de beaucoup d'eaux usées, alors que le traitement proposé dans le projet est plus respectueux de l'environnement (Xiang, 2007).

4.2.2.2 Projet RARETE (Recycling Applied to Minor Metals and Rare Earths in new Technologies)

Ce projet a démarré en avril 2012 dans le cadre du Plan Marshall 2.Vert. Il vise l'extraction de métaux mineurs contenus dans les écrans plats LCD et plasma sans limitation de taille ou d'applications, ainsi que dans les panneaux photovoltaïques à l'exception de ceux à base de silicium. Ce projet couvre donc la technologie CIGS. Le gallium fait partie des éléments que l'on souhaite valoriser à partir des panneaux solaires, pas à partir des écrans. En effet, tout ce qui constitue le rétro-éclairage, les LED par exemple, n'est pas recyclé dans ce procédé, car d'autres éléments de valeur, tels que ceux des poudres fluorescentes, seraient alors perdus pour la récupération d'une très petite quantité de gallium très dispersé.

Le consortium mis en place pour ce projet comprend deux sociétés industrielles (Revatech SA et 5N Plus) et trois centres de recherche agréés (Sirris, CTP, CERTECH).

Le Sirris, qui est le centre collectif de l'industrie technologique belge, est chargé du démantèlement des gisements. Le CTP, qui est le Centre technologique international de la Terre et de la Pierre, s'occupe du broyage des gisements, et donc de trouver la granulométrie de broyage adéquate. Comme dans le projet précédent, le CERTECH étudie la mise au point d'une technologie de solvolysé en milieu supercritique des broyats.

La société 5N Plus est en charge de la séparation du concentré polymétallique obtenu par solvolysé en métaux purifiés. L'objectif est véritablement d'obtenir des métaux de très grande pureté, car leur valeur marchande dépend évidemment fortement de cette dernière.

Revatech SA va quant à elle assurer la coordination du projet et va réaliser une analyse du cycle de vie (ACV) des différentes étapes du procédé mis en place, de manière à quantifier leurs impacts environnementaux. Si le projet donne lieu à une exploitation commerciale, l'objectif pour le gallium est de récupérer 10% de la production primaire mondiale actuelle à l'horizon 2025, c'est-à-dire environ 20 tonnes (Réponse enquête par Revatech, 2012).

Ce projet présente l'avantage de couvrir le recyclage des panneaux photovoltaïques de type CIGS et de viser le recyclage du gallium, ce qui est nouveau. En effet, si la question du recyclage des panneaux solaires en fin de vie est posée depuis quelques années, le recyclage concernait le plus souvent ceux à base de silicium. Aujourd'hui, il y a une ou deux compagnies situées en Allemagne qui, sous l'égide de PV CYCLE⁵, ont des technologies pour le recyclage des PV en couche mince CIGS. Cependant, elles ne récupèrent pas de gallium, bien que 85% des matériaux utilisés dans ces modules soient recyclés (PV Cycle). Il faut rappeler ici que la réglementation européenne oblige à recycler au moins 70% des matériaux d'un panneau solaire. L'objectif est donc atteint sans même recycler le gallium.

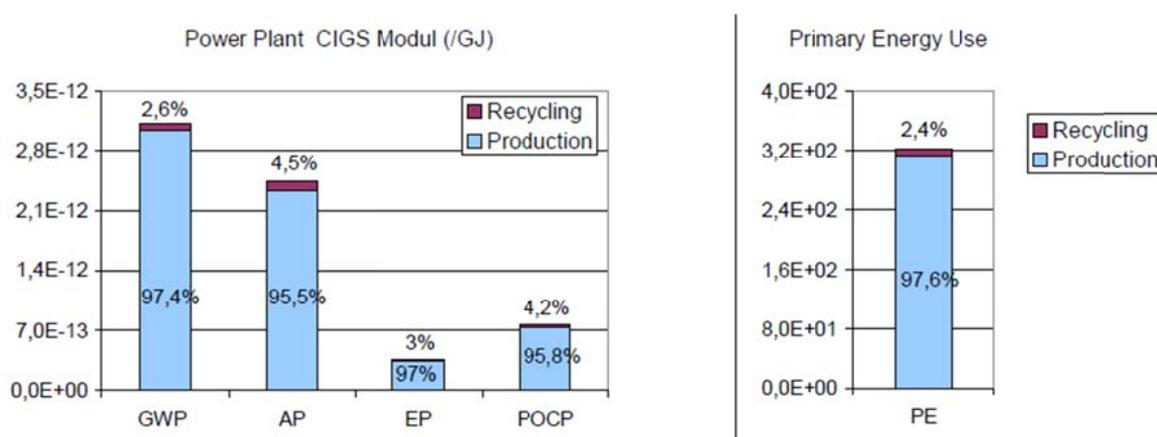
Bien que l'on ne dispose pas encore de l'ACV, on peut cependant penser qu'au niveau de l'impact environnemental, la solvolysé envisagée a de grandes chances d'aboutir au développement d'un procédé comportant un nombre réduit d'étapes, nécessitant une demande énergétique moindre et permettant de récupérer des éléments de grande pureté (Réponse de Revatech à l'enquête, 2012). En

⁵ PV Cycle: une association créée en juillet 2007, à l'initiative de certains producteurs de panneaux photovoltaïques et basée à Bruxelles, se donne pour objectif de mettre en place un programme volontaire de reprise et de recyclage des panneaux photovoltaïques en Europe

outre, le fait de travailler avec de l'eau supercritique évite l'emploi de réactifs dangereux pour l'environnement.

Lors de l'évaluation de la durabilité de systèmes solaires (SENSE) réalisée en 2008, les impacts environnementaux et les bénéfices de la phase de recyclage ont été calculés. Dans cette estimation, on a tenu compte de tous les procédés intervenants depuis le démantèlement des panneaux jusqu'à l'élimination du déchet final, ainsi que de tous les crédits associés aux matériaux recyclés, tels que ceux provenant par exemple des semi-conducteurs récupérés. La stratégie de recyclage considérée est un traitement thermique (pyrolyse), suivi d'un traitement chimique des panneaux de types CIGS et CdTe. L'application utilisée est une installation de PV montés au sol à usage non-domestique et située en Europe centrale. Les résultats obtenus pour le recyclage et la production des panneaux ont été regroupés pour être facilement comparés.

Figure 32 : Impacts environnementaux et énergie primaire requise pour la production et le recyclage d'une installation de panneaux solaires CIGS montés au sol.



Source: SENSE (2008)

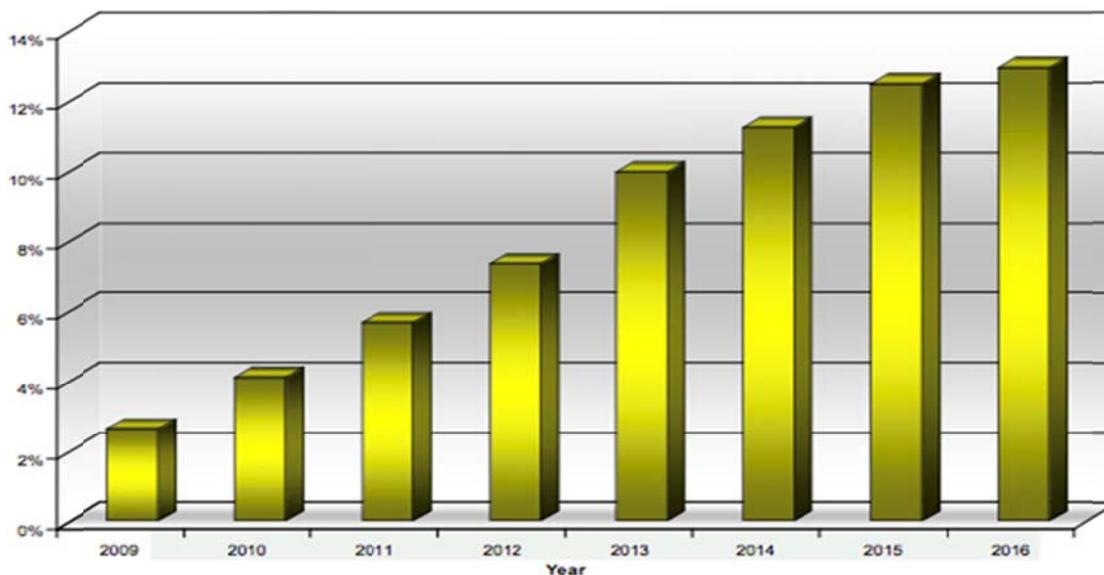
Les résultats obtenus confirment l'importance du recyclage, puisqu'il ne contribue que très peu aux impacts sur l'environnement et à la quantité d'énergie consommée sur l'ensemble du cycle de vie du système. Les bénéfices tirés du recyclage des matériaux compensent presque les coûts environnementaux potentiels liés à celui-ci (SENSE, 2008). D'autres analyses ont montré que l'implémentation d'une unité industrielle comme système de recyclage conduit à une réduction des impacts environnementaux potentiels. L'implémentation de telles structures est donc plus que souhaitable, et devrait conduire à des améliorations ultérieures en termes de performance environnementale (SENSE, 2008).

Sur le chiffre avancé par le projet d'une récupération du gallium équivalente à 10% de la production primaire actuelle en 2025, quelques doutes peuvent par contre être émis. Ces chiffres sont le résultat d'une étude commandée par Revatech à Cide Socran. Si on considère qu'un panneau fait environ 17 à 20 kg pour une dimension de 1 à 1,66 m² et qu'il contient environ 0,01% en masse de gallium, cela correspond à maximum 2g de gallium par panneau (Alubel, s.d., Communication Revatech, 2012). En faisant l'hypothèse d'une récupération de gallium de 100% du module CIGS, il faudrait accumuler d'ici 2025, et recycler entre 9 et 10 millions de panneaux CIGS pour atteindre ces objectifs. Cela semble irréaliste, même en supposant une collecte et une centralisation optimale des panneaux par PV CYCLE pour l'Europe entière, grâce à l'introduction de ceux-ci dans la directive européenne DEEE révisée en 2012, et un changement précoce d'une partie des panneaux photovoltaïques, avant qu'ils n'atteignent leur fin de vie, pour une amélioration du rendement.

Il y a plusieurs raisons à cela dont certaines ont déjà été évoquées auparavant. La première est que les estimations des gisements ne prévoient pas que ceux-ci puissent atteindre des quantités importantes au plus tôt avant 2035, comme expliqué au chapitre 3. Ceci est renforcé par une part de marché ultérieure

et actuelle de la technologie couche mince CIGS qui est relativement limitée comme le montre la figure suivante. Or, c'est uniquement cette part qui constituera le stock de déchets à valoriser du point de vue du gallium.

Figure 33 : Part de marché annuelle de la technologie CIGS dans le secteur photovoltaïque.



Source: Murphy et al (2011)

Le secteur photovoltaïque, et en particulier le CIGS, a connu quelques fermetures d'entreprise, notamment aux USA et en Allemagne. Les prix pratiqués doivent être bas pour pouvoir rester compétitifs par rapport à ceux pratiqués par la Chine, et par rapport à ceux des couches minces en silicium cristallin, qui ont connu une baisse de prix importante ralentissant la pénétration du CIGS en 2011.

Enfin, même si le procédé développé est efficace et conduit à un taux de récupération très élevé du gallium, car il est moins dispersé dans un module CIGS que dans d'autres applications, il y aura toujours certaines pertes qui augmentent le nombre de panneaux nécessaires pour atteindre les 20 tonnes de gallium recyclé.

C'est d'ailleurs pour toutes ces raisons que ce projet ne se limite pas au CIGS en fin de vie comme source de déchets. Il n'y a pas de métal payant pour rendre le seul recyclage des modules CIGS attractif économiquement (EP0W, 2011).

Ceci étant, le projet RARETE pourrait quand même être un projet viable et rentable, car d'autres éléments que le gallium, l'indium par exemple qui peut être valorisé à partir des deux sources de déchets, peuvent plus rapidement apporter la valeur économique nécessaire.

4.2.3 Le recyclage post-consommation du gallium, une étape essentielle

4.2.3.1 Pour l'environnement

Les projets présentés constituent un espoir. Cependant, il y a encore du chemin à parcourir. Actuellement, il n'y a pas de projet de valorisation des LED en fin de vie, cassées ou non. Or, le recyclage est d'autant plus important que ces déchets ont été classifiés comme déchets dangereux selon les « Californian standards », notamment du fait des hauts niveaux de cuivre, plomb, nickel ou argent contenus dans les lixiviats des tests réalisés (EP0W, 2011). Ces mêmes tests ont également détecté la présence de gallium et d'indium qui pourraient sans aucun doute être valorisés.

Depuis janvier 2012 et l'adoption de la révision de la Directive DEEE, les lampes LED sont couvertes par le texte (WEEE, 2012). Cela signifie qu'un pourcentage minimum de 75% de lampes, incluant les LED, doit être récupéré et que 65% doit être recyclé. Par ailleurs, compte tenu des prévisions d'une hausse de l'usage des LED dans l'éclairage domestique et général, il y a un beau potentiel.

Cependant, quand les possibilités de recyclage ne sont pas disponibles, les déchets de haute valeur sont traités sans récupération de tous les métaux contenus dans ceux-ci (Hagelüken et Meskers, 2010). C'est d'ailleurs ce qui risque de se produire avec les LED. Qu'il s'agisse des lampes ou des LED soudées sur les cartes électroniques, les LED ne font pas l'objet d'un traitement spécifique (ADEME, 2010b). Ceci va conduire ainsi à une perte certaine en gallium dans un avenir plus ou moins proche, entraînant comme obligation, pour répondre à la demande, de produire plus de gallium primaire, avec les conséquences environnementales pointées au chapitre 2.

On peut encore ajouter que les pourcentages imposés actuellement par la directive européenne DEEE pour la récupération des matériaux sont des pourcentages en masse très vite atteints par le recyclage des éléments les plus abondants. Les métaux spéciaux comme le gallium finissent alors en remblais ou en déchets ultimes.

D'autres objets en fin de vie dans nos pays, tels que les ordinateurs et téléphones portables, sont en fait donnés par charité ou exportés en Afrique, en Asie ou en Europe de l'Est sous couvert de la réutilisation (Hagelüken et Meskers 2010). Il est estimé qu'environ 50% des équipements électroniques IT utilisés quittent l'Europe d'une façon ou d'une autre (Hagelüken et Meskers, 2010). Pour les téléphones mobiles, moins de 10 % du potentiel théorique est recyclé de façon appropriée (UNEP, 2010b). En pratique, la probabilité d'un recyclage efficace à partir d'objets en fin de vie dans les pays en voie de développement ou en transition est plutôt basse (Hagelüken et Meskers, 2010). Seulement certains métaux de valeur sont recyclés avec une efficacité très faible, dans des conditions souvent désastreuses pour l'homme et l'environnement. Quant aux métaux spéciaux, on n'en parle même pas.

4.2.3.2 Pour diminuer la pression de la demande

Une analyse des opportunités d'implémentation du recyclage des éléments critiques de diverses applications conclut que le gallium fait partie des éléments, dont le recyclage ne permet pas de diminuer la pression sur la demande, et ce, étant donné la trop faible valeur économique associée (EP0W, 2011).

Bien qu'intéressante cette analyse ne considère que les opportunités élevées et moyennes de recyclage, ce qui limite les applications au photovoltaïque pour le gallium, et effectivement, si l'on se cantonne à ce secteur, la conclusion semble réaliste. Malgré des estimations de quantités recyclées prometteuses à partir de cellules solaires, elles ne seront pas disponibles avant 15 à 20 ans. A ce moment-là, rien ne nous dit que la demande en gallium sera toujours aussi importante et pressante. Ce sera peut-être le début de la fin de l'ère gallium qu'on estime comme incontournable pour au moins vingt à trente ans (BRGM, 2011).

Maintenant, si l'on considère les autres opportunités, les plus faibles du point de vue du potentiel, les quantités récupérées, même si ce ne sont que quelques tonnes par-ci par-là, pourraient avoir une influence locale sur le bilan offre-demande. On pense bien sûr à l'Union Européenne et en particulier à certains de ses Etats Membres, comme la France par exemple, dont la situation pourrait être moins critique vis-à-vis du gallium, d'autant que ces opportunités, comme celle que représente le projet Phoenix, permettraient un approvisionnement en gallium certes plus limité, mais dans un terme beaucoup plus court que dans le cas du photovoltaïque. C'est ce tonnage qui peut faire la différence pour répondre à une demande soudaine en gallium.

Par ailleurs, si le recyclage du gallium post-consommation n'évolue pas davantage, alors que le recyclage de l'aluminium est quant à lui élevé, la faiblesse éventuelle de la production primaire de ce

dernier pourrait limiter encore plus celle du gallium, creusant un peu plus le déficit d'offre (Hagelüken et Meskers, 2010).

4.2.3.3 Pour le développement économique

La mise en place de procédés de recyclage adaptés au mieux aux différents types de déchets, efficaces dans la récupération d'un maximum de métaux, respectueux de l'environnement et rentables, demande des ressources financières, mais surtout des ressources humaines compétentes, car une fois définis, ces procédés vont être exploités industriellement, ce qui nécessitera également de la main d'œuvre.

Une Europe en pleine tourmente économique, mais soucieuse dans le même temps d'un développement durable, ne peut pas négliger la piste du recyclage des métaux spéciaux, tel que le gallium, à partir des objets en fin de vie. Au contraire, elle doit l'inciter. De cette façon, elle pourra ainsi diminuer leur caractère critique actuel et la pression sur l'offre qui les caractérise.

4.3 Conclusion du chapitre 4

Le recyclage du gallium à partir des déchets de production de semi-conducteurs GaAs est fortement optimisé. La récupération du gallium des derniers pourcentages de pertes va être de plus en plus complexe, étant donné le type de déchet et/ou la concentration en gallium dans ceux-ci. Ceci risque alors de ne plus en valoir la peine tant d'un point de vue économique qu'environnemental.

En ce qui concerne les déchets provenant du procédé MOCVD/MOVPE, le potentiel de recyclage, malgré son existence, peut être considéré actuellement comme négligeable de par la nature des matériaux que les déchets peuvent contenir. Pour rappel, il peut subsister des précurseurs pyrolytiques dans les déchets.

Le recyclage récent du gallium des déchets de production des cellules photovoltaïques CIGS est un progrès certain. Il est viable économiquement grâce à différents métaux dits 'payants'. Il doit constituer, en tant que fermeture de boucle de production, un modèle pour les nombreuses applications du gallium encore en développement, telles que les batteries, aimants, alliages spéciaux, nanotechnologies. Le recyclage du gallium et des autres éléments utilisés doit en effet faire partie intégrante du design de production, pour éviter des coûts et des pertes inutiles ainsi que des impacts environnementaux. Ne pas considérer dès à présent ces applications et leurs pertes potentielles, sous prétexte que le tonnage en gallium nécessaire est plus faible ne peut qu'aggraver, d'une part, le caractère critique du gallium, et d'autre part, les conséquences environnementales car ces applications sont de plus en plus nombreuses.

Quant au recyclage du gallium à partir d'objets post-consommation, on peut dire qu'il est enfin en train d'évoluer et d'être considéré. Mieux vaut tard que jamais. Il reste cependant des freins à son développement plus large, dont certains pourraient être levés par l'Union Européenne. Cela sera discuté au chapitre suivant. En terme de développement possible, on vise notamment le recyclage du gallium à partir des LED ou des cellules photovoltaïques défectueuses, c'est-à-dire celles qui ne sont pas intégrées aux panneaux. Il est certain que le recyclage post-consommation a un rôle à jouer en faveur de l'environnement, économiquement, et sûrement socialement.

Par type spécifique de déchets, il est vrai que les quantités de gallium qui pourraient être retirées peuvent paraître anodines, d'où la nécessité d'optimiser les sources de déchets et d'être prêt au moment où elles seront valorisables quantitativement et rentables.

D'un point de vue environnemental, le recyclage à partir des deux sources valorise des produits dont les impacts sur l'environnement peuvent très souvent être conséquents, s'il n'est pas réalisé ou mal fait. De plus, les procédés existants et ceux proposés semblent à première vue y être plus favorables: moins d'étapes, moins grande quantité d'acide, solvolysé avec de l'eau, limitation de l'emploi des fours.

A ce stade, il est possible de répondre à la première question de recherche. Pour rappel, celle-ci était : « Dans un contexte où le caractère critique du gallium pour l'UE est affirmé et où sa demande est indéniablement en augmentation, la production secondaire, particulièrement celle à partir d'applications en fin de vie, peut-elle changer la donne ? ». La réponse est oui mais de manière différenciée en fonction des sources : déchets de production – objets en fin de vie.

Comme on l'a vu précédemment, la production primaire de gallium est insuffisante pour couvrir l'entièreté des besoins en gallium, et une partie de ceux-ci est couverte par le gallium recyclé des déchets de production. Globalement, au niveau mondial, l'équilibre est respecté. Localement, par contre, il y a des risques que ce ne soit plus le cas. L'extension de la production secondaire peut maintenir l'équilibre entre offre – demande.

Le recyclage des déchets de production des nouvelles ou plus récentes applications peut y participer en veillant, comme mentionné plus haut, à le considérer le plus en amont possible dans le procédé, et ce, afin d'éviter une contamination du gallium trop importante par d'autres éléments aux différentes étapes. En effet, les quantités de gallium utilisées par type d'application tendent à diminuer. Si tel était le cas, cela nécessiterait un raffinage plus poussé et le recyclage ne serait plus viable ni économiquement, ni peut-être du point de vue environnemental.

Actuellement, la production secondaire à partir de sources post-consommation ne pourra vraisemblablement pas changer drastiquement la donne au niveau global, car les tonnages récupérés seront sans doute limités à quelques tonnes par grandes catégories de déchets. Cependant, comme la téléphonie mobile explose (actuellement, 5.000 smartphones vendus toutes les 10 minutes dans le monde), la quantité de gallium recyclé à partir de cette source pourrait elle aussi être plus importante, pour autant que la collecte des anciens téléphones soit optimisée.

Elle pourrait en tout cas permettre à certains Etats de répondre temporairement à une augmentation soudaine de la demande en gallium, et d'être ainsi moins dépendant de la production primaire, et donc de la Chine. En d'autres termes, cela permettrait de diminuer au moment requis la pression de la demande. Néanmoins, il faut se concentrer en priorité sur les sources actuelles et disponibles, c'est-à-dire les DEEE, tout en développant des procédés de recyclage pour le potentiel prévu à moyen terme. Il faut ensuite bien sûr préparer le long terme tout en ne perdant pas de vue que le caractère critique d'un élément varie en fonction des évolutions technologiques. Celui-ci peut diminuer voire disparaître, et rendre la production secondaire de cet élément moins attractive économiquement, si les procédés ne sont pas assez flexibles.

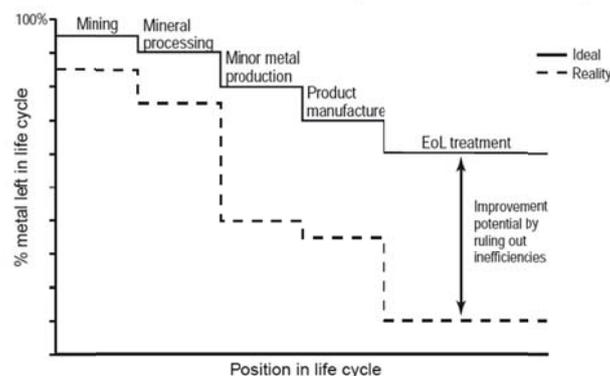
La production secondaire du gallium peut donc jouer un rôle plus essentiel encore que celui qu'elle joue aujourd'hui, mais pour y arriver certains obstacles doivent être levés. Nous allons aborder ceux-ci au chapitre suivant.

5. Pistes de solutions pour optimiser les productions primaire et secondaire du gallium et diminuer son caractère critique pour l'Union Européenne

5.1 Introduction

Comme on a pu le constater dans les chapitres précédents, la production primaire de gallium n'est pas efficace. Si la production secondaire du gallium à partir de déchets de production l'est dans le domaine le plus important que sont les semi-conducteurs GaAs, en ce qui concerne les objets en fin de vie, elle est par contre plus encore qu'inefficace : elle est inexistante industriellement ! Il y a donc un potentiel de progrès pour ces productions. C'est ce que nous montre la figure 34 ci-dessous. Bien que certaines pertes soient inévitables, des améliorations du système et des procédés peuvent accroître la disponibilité des métaux rares tels que le gallium (Hagelüken et Meskers, 2010).

Figure 34 : Représentation des pertes de métaux rares au cours du cycle de vie en réalité et dans une situation idéale et de la marge d'amélioration possible



Source : Hagelüken et Meskers (2010)

Des pistes pour améliorer les productions du gallium vont être présentées. Elles peuvent être de tout ordre, technique, économique ou légal. L'augmentation des quantités de gallium primaire et/ou secondaire est une option pour diminuer le caractère critique du gallium. D'autres options, telles que la substitution du gallium et la réutilisation des objets seront envisagées. **Nous verrons si une piste ou une combinaison d'améliorations se détache, et permet la réduction couplée du caractère critique du gallium et des impacts sur l'environnement.**

5.2 Amélioration de la production primaire

Plusieurs possibilités peuvent être envisagées pour augmenter le tonnage de gallium primaire.

- Puisque des réserves de bauxite sont disponibles en Europe, une solution consisterait en leur exploitation par l'ouverture de nouvelles mines et installations de production du gallium qui utiliseraient soit les techniques actuelles soit des nouvelles. Cette solution, qui ne peut cependant pas se mettre en place très rapidement, a un coût économique, celui de la construction et de la mise en fonctionnement de l'installation, mais aussi environnemental. La bauxite, bien que première source de gallium actuellement, n'est pas la source où le gallium est le plus concentré, ce qui constitue une faiblesse initiale puisque des étapes successives de concentration et de raffinage sont nécessaires. Par ailleurs, il faudrait que la nouvelle installation soit rentable et réponde aux normes environnementales européennes. Une telle installation est plus aisée en Chine étant donné les faibles coûts de production (main d'œuvre bon marché) et les moins grandes contraintes environnementales appliquées. Pour toutes ces raisons, cette piste n'est pas celle qui est envisagée pour faire face à la croissance de la demande en gallium. Elle n'est d'ailleurs pas celle mise en avant au niveau européen ni

mondial (JRC, 2011; USGS, 2010b). A supposer que cette solution soit quand même décidée et mise en place, elle comporte une limite. Puisque les teneurs en gallium sont très variables d'une bauxite à l'autre, il serait difficile de déterminer le nombre de nouvelles mines et installations nécessaires pour couvrir la demande.

Par contre, des primes ou des réductions de charges au niveau approprié inciterait sans doute davantage les producteurs d'aluminium à mettre en place des unités de récupération du gallium. De même, des contrats à terme au lieu de contrat spot, entre entreprises européennes de raffinage du gallium et entreprises exploitantes, garantiraient l'approvisionnement des secondes et une source financière sûre pour les premières. Actuellement, aucune place de marché ne négocie des contrats à terme sur des petits métaux (à part le Co et le Mo) qui sont vendus de gré à gré (L'édito des matières premières, 2008).

- Une autre possibilité serait de diversifier les sources et de se tourner vers d'autres sources exploitables, comme les cendres de charbon ou les poussières des fours de combustion du phosphore. En effet, comme cela a déjà été mentionné, elles peuvent contenir des concentrations élevées en gallium, d'autant plus que les technologies d'extraction existent en laboratoire et font encore l'objet de recherche pour être améliorées.
- Le gallium primaire pourrait également être extrait comme produit principal de minerais où sa teneur est très élevée. Ceci réduirait certainement les impacts environnementaux de la production. Si de tels minerais n'ont pas été localisés en Europe, il en existe cependant en Afrique et en Amérique. L'Europe pourrait dès lors investir dans l'exploitation de ces sources aux côtés du Congo et du Canada, mais un manque de détails techniques sur les procédés d'extraction du gallium fait qu'il vaut mieux considérer d'autres pistes actuellement (Roskill, 2011).
- Une piste certaine pour l'Union européenne est de mettre en place un programme de R&D, visant l'amélioration de l'efficacité et la réduction des impacts environnementaux des méthodes d'extraction du gallium à partir de la bauxite et du zinc, puisque de telles réserves existent, tout en se focalisant sur les procédés où les efforts pour y parvenir seraient moindres. L'UE semble en effet bien moins active dans ce domaine que l'Asie. Il suffit de regarder la littérature produite sur le sujet ces dernières années pour se rendre compte qu'il y a plus d'auteurs indiens, coréens, japonais ou chinois que d'auteurs européens. Ceci démontre un manque d'implication, un manque de suivi des besoins, que l'Europe paie par une dépendance non négligeable vis-à-vis de la Chine pour son approvisionnement actuel en gallium primaire.

5.3 Amélioration de la production secondaire

5.3.1 A partir des déchets de production de composants

S'il est vrai de dire que les déchets de production sont bien valorisés, cela ne s'applique pas à l'ensemble des applications du gallium.

Dans l'optoélectronique, des solutions doivent être analysées et développées de manière à favoriser la production secondaire pour le procédé MOCVD/MOVPE. Comme l'efficacité de déposition du procédé est très faible et les pertes de gallium irrécupérables, la mise au point d'un nouveau procédé - qui réunirait les avantages de l'actuel procédé le plus utilisé, c'est-à-dire qualité, rapidité de production, facilité et flexibilité d'utilisation, mais qui améliorerait le taux de déposition de matière tout en permettant un recyclage des pertes - doit constituer le challenge à relever pour les industriels aujourd'hui. Une autre possibilité serait d'adapter le procédé actuel pour qu'il fonctionne avec d'autres précurseurs du gallium qui ne soient pas pyrolytiques, de manière à pouvoir récupérer l'excès.

D'une manière générale, dans les nouvelles applications du gallium, où celui-ci intervient en quantités de plus en plus réduites, le système de production mis en œuvre doit être conçu de façon à limiter les pertes en gallium, ou à permettre leur récupération. Le choix des matériaux de départ doit être fait en tenant compte de leurs caractéristiques. Certains procédés devraient donc être revus, voire écartés s'ils ne permettent pas un seuil minimum de récupération de matière au cours du processus de production en cas de pertes.

A l'initiative de grands secteurs dans certains Etats européens ou des gouvernements, certaines actions sont déjà proposées pour la réduction des pertes au cours de la production et le recyclage de celles-ci. C'est le cas de la Fédération des Industries Electriques, Electroniques et de Communication (FIEEC) en France. Pour renforcer ces démarches positives, il serait nécessaire d'avoir des réglementations à un échelon supérieur, c'est-à-dire européen. Dans la directive DEEE, l'UE impose des taux de recyclage en fin de vie par catégorie d'équipements. Pourquoi ne pas avoir le même genre de directive pour la production, visant un taux de recyclage minimum des pertes lorsqu'elles sont trop importantes ? Ceci forcerait la conception de procédés et de systèmes où l'accent est mis en priorité sur l'environnement et sur l'efficacité matière, et non plus uniquement sur l'aspect économique. En fait, c'est déjà théoriquement légalement le cas pour des entreprises IPPC, pour lesquelles la production de déchets doit être limitée et les déchets valorisés. Cependant, il n'y a pas de véritable limite quantitative dans la directive et le suivi de l'application de la directive est apparemment réduit puisque en 2009, seulement une centaine d'entreprises IPPC (118 sur 215) avait fait l'objet d'un contrôle en Wallonie (Rigo, s.d; Publi G2, s.d.). La directive existante devrait donc être revue pour être plus précise et contraignante.

5.3.2 A partir d'objets en fin de vie

Pour faciliter le développement du recyclage d'objets post-consommation, il y a de nombreux freins qui peuvent être levés. Voici différentes possibilités d'y arriver.

5.3.2.1 Pour les DEEE et en particulier les cartes électroniques

- Bien que la législation existante 'Waste Shipment Regulation' en matière de transfert de déchets et en particulier de DEEE soit régulièrement amendée dans un souci de simplification, il faut davantage veiller à son application par un renforcement des contrôles afin d'éviter que, sous couvert de donations ou de la réutilisation, des produits valorisables ne quittent l'Union Européenne et ne soient pas ou mal traités (ADEME, 2010b).
- Au sein des Etats, prôner un renforcement des collectes par diverses campagnes pour éviter une accumulation de déchets électroniques usagés dans les caves et greniers. Il est évident que cela doit être entrepris une fois que l'action précédente a porté ses fruits.
- Soutenir la R&D de manière à développer des procédés, comme celui proposé dans le cadre du projet Phoenix, qui permettent l'extraction du gallium des cartes électroniques et autres objets électroniques de petites tailles, tels que les téléphones portables ou des scories issues de traitements existants (ADEME, 2010b).
- Identifier au niveau de l'UE quelques pôles de centralisation des cartes électroniques et petits déchets contenant du gallium, de manière à créer une source plus importante en gallium distribuée vers un nombre très limité d'unités de traitement.

5.3.2.2 Pour les LED

- Lancer des projets de R&D de manière à mettre en place des procédés permettant la récupération du gallium des lampes LED (ADEME, 2010b).
- Analyser les possibilités et les avantages du démantèlement des LED des cartes électroniques.
- Analyser les synergies d'un traitement couplé des LED retirées des cartes électroniques et des lampes LED, avec comme avantage d'avoir une source de départ plus conséquente en gallium.
- Veiller à la mise en place de structure de collecte au sein des Etats membres.
- Veiller à la centralisation des gisements pour avoir un potentiel non-négligeable à récupérer.

5.3.2.3 Pour les panneaux photovoltaïques

- Soutenir la R&D de manière à développer des procédés, comme celui proposé dans le cadre du projet RARETE, qui permettent l'extraction du gallium des différentes technologies de panneaux photovoltaïques où il est utilisé.
- Assurer la collecte par une association comme PV Cycle, ou par une autre structure, gérer le stockage des gisements de manière à obtenir une source valorisable en métaux (comme le

gallium) dont la concentration unitaire est réduite, et veiller à la distribution de ceux-ci vers un nombre très limité d'unités de traitement (ADEME, 2010b).

5.3.2.4 Leviers génériques

- Mise en place d'une mesure au niveau européen obligeant la récupération du gallium et autres métaux critiques des objets en fin de vie.
- Contraindre les industriels à un éco-design pas uniquement basé sur la réduction de matière, mais qui facilite aussi le recyclage, à partir d'objets post-consommation, de toutes les matières utilisées, même celles qui sont présentes en petites quantités
- Modifier la réglementation actuelle de telle sorte que les pourcentages de recyclage imposés ne soient plus exprimés en masse, pour éviter de les atteindre en ne récupérant que les matières les plus abondantes.
- Pour les objets pour lesquels elle n'existe pas encore (par exemple pour les panneaux photovoltaïques), instauration d'une mesure de prise en charge d'une partie des coûts de collecte et de recyclage des objets post-consommations par les producteurs européens, ou d'une taxe sur les produits importés. Pour les producteurs européens, cette participation aux frais pourrait éventuellement être temporairement compensée par une réduction des charges, en proportion des avantages pour l'environnement du recyclage.
- Mettre en place des projets de recherche visant à déterminer s'il est possible de récupérer, à partir d'un objet fin de vie, le composant intermédiaire (par exemple du GaAs ou du GaN) au lieu du gallium et identifier les avantages d'une telle pratique. Ceci permettrait peut-être d'éviter le coût environnemental du traitement du gallium lors de son intégration dans un produit.

Même si la recherche de sources de financement des mesures peut constituer un souci, il faut encore noter que, comme mentionné au chapitre précédent, le prix du gallium ne reflète fort probablement pas encore son caractère critique. Indéniablement, le prix du gallium devrait selon nous évoluer à la hausse compte-tenu de ses nombreuses applications. Même s'il est impossible de déterminer à quel moment ni sur combien de temps cette hausse peut s'étaler, les industriels, qui auront pris le risque d'investir dans la production secondaire post-consommation du gallium, en sortiront nettement gagnant financièrement si elle se produit.

5.3.3 Leviers communs aux productions primaire et secondaire

- Introduction d'une obligation d'ACV environnementale et sociétale pour tout objet produit sur le sol européen et contenant des matières critiques tel le gallium. Pourquoi sociétal ? Pour tenir compte des critères de société, comme par exemple le fait que le gallium est critique pour l'UE. Cette analyse devrait ainsi conduire à identifier les impacts des procédés sur l'environnement et la société, les pertes en matières et à prendre les actions nécessaires pour réduire impacts et pertes.
- Obligation de transparence imposée au niveau européen de la part de tous les acteurs impliqués dans les productions du gallium, comme ceux qui l'utilisent, veille constante de l'UE et réévaluation annuelle des chiffres. Ceci permettra d'avoir de meilleures connaissances tant sur les besoins que sur l'offre primaire et secondaire. En conséquence, il sera plus évident d'identifier où des actions doivent être entreprises pour pallier un déséquilibre offre-demande.

5.4 Les autres options

5.4.1 La substitution

Des substituts au gallium sont disponibles ou sont en train d'être développés pour certaines applications (JRC, 2011). Si leur utilisation devenait plus conséquente, il faudrait alors moins de gallium. Cependant, globalement, le gallium souffre d'une plus faible substituabilité, par rapport à une majorité d'éléments critiques pour l'Union Européenne comme le montre le tableau 22.

Le remplacement complet du GaAs dans les applications de semi-conducteurs semble peu probable à l'heure actuelle (JRC, 2011). En effet, les circuits intégrés à base de GaAs sont utilisés dans diverses applications du domaine de la défense, car ils ont des propriétés uniques pour lesquelles il n'existe pas de véritable substitut (JRC, 2011).

En outre, pour d'autres applications du gallium, les remplaçants potentiels font partie eux-mêmes des éléments critiques. C'est le cas du germanium qui pourrait être utilisé dans la téléphonie mobile ou de l'indium qui pourrait substituer le GaAs dans les diodes laser et dans le photovoltaïque (JRC, 2011). De plus, certains composés du gallium sont substitués par d'autres composants du gallium plus performants encore, comme cela a déjà été relevé au chapitre 3. C'est le cas du GaN qui surpasse le GaAs et de nombreux autres composants aux hautes fréquences, mais aussi dans les applications optoélectroniques.

Tableau 22 : Substituabilité et taux de recyclage des éléments critiques pour l'UE

Matières premières	Substituabilité (%)	Taux de recyclage post-consommation actuel (%)
Antimoine	64	11
Béryllium		
Cobalt	90	16
Spath fluor ⁽¹⁾	90	0
Gallium	70	0
Germanium	80	0
Graphite	50	
Indium	90	0,3
Magnésium	82	14
Niobium	70	11
Métaux du groupe platine (Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt)	75	35
Terres rares	87	1
Tantale	4	4
Tungstène	77	37

Source : EC (2011)

(1) Nom commercial du principal minerai de fluor

Le silicium et quelques uns de ces composés ont parfois été proposés pour remplacer le GaAs dans certaines applications. Cependant, leur utilisation ne s'est pas souvent répandue (JRC, 2011). Ceci laisse supposer de moins bonnes performances (JRC, 2011).

Dans le secteur des LED, il y a une possibilité de diminution de l'emploi du gallium du fait, par exemple, du développement de LED à base de composés organiques (OLED) utilisés pour le rétro-éclairage des écrans LCD (Lee et Cooper, 2008). Des chercheurs travaillent à leur développement plus large (JRC, 2011).

Pour le photovoltaïque, la technologie couche mince est également disponible pour d'autres éléments que le gallium. Cependant, le gallium est employé dans les dernières technologies de panneaux photovoltaïques : multi-jonctions et CPV. Des recherches ont cependant lieu pour utiliser des matériaux organiques dans les cellules des panneaux.

Parallèlement à une diminution possible de l'utilisation de gallium dans certains secteurs, on l'emploie davantage dans d'autres comme celui des aimants où il semble également performant. Une réduction de la demande et donc de la pression sur les productions par la substitution du gallium n'apparaît pas comme réaliste à court et moyen termes.

5.4.2 La réutilisation

Réutiliser des objets qui ont déjà servi, qu'ils soient encore en état de fonctionnement ou pas, est une solution qui permet de diminuer les quantités d'objets à produire, et donc les quantités de matières premières et d'énergie nécessaires.

Dans le cas du gallium, nombreux sont les appareils électroniques que l'on change avant qu'ils aient atteint leur fin de vie, car d'autres sont plus performants, possèdent de nouvelles fonctionnalités ou sont plus à la mode. Quelques opérations de révision peuvent en général leur permettre de retrouver une seconde jeunesse. Etant donné que c'est le domaine qui utilise le plus de gallium, une réutilisation des objets influencerait certainement à la baisse le caractère critique du gallium. Une utilisation prolongée de ces objets serait davantage souhaitable. Cela passe clairement par une évolution des mentalités. Un grand nombre de consommateurs changent d'appareils électroniques, et en particulier de téléphones portables, comme on change de chemise, juste pour avoir la dernière fonctionnalité qui, par ailleurs, ne sera peut-être jamais utilisée. C'est sans compter l'impact sur les ressources naturelles, comme le gallium, et sur l'environnement pour les produire. Cependant, il faudrait que le prix de ces appareils incite à une utilisation de plus longue durée, c'est-à-dire, qu'il soit plus élevé.

Une autre possibilité pour réduire les quantités de gallium nécessaires serait de réutiliser, non pas tout l'objet, mais des composés récupérés après démantèlement de l'appareil, comme par exemple, les circuits intégrés contenant du gallium. Outre le gain en matière gallium, ce sont également les impacts sur l'environnement des étapes de production et de raffinage que l'on éviterait de cette façon. De plus, si le démantèlement nécessite de la main d'œuvre, cela bénéficierait à l'économie sociale.

Pour les panneaux photovoltaïques, une alternative possible au recyclage serait de fabriquer des nouveaux panneaux à partir d'anciens. Cette option devrait apparemment éviter de développer un procédé complexe de recyclage, tout en réduisant la dépendance à l'égard des matières premières vierges comme la gallium (JRC, 2011). Si cette possibilité a le mérite d'exister, elle ne pourra pas remplacer la nécessité d'un recyclage, et ceci pour plusieurs raisons. Tout d'abord, il sera sous doute très complexe de fabriquer un produit technologiquement plus performant à partir d'un ancien qui l'est probablement moins. De plus, rien ne dit que pour y arriver, il ne faudra pas ajouter de nouveaux composés à base d'éléments critiques. En outre, la fabrication de nouveaux panneaux nécessitera sans doute une séparation des composants, ce qui s'appelle une « désencapsulation ». Cette opération peut être rendue délicate par la présence de composés tels que les vernis.

La réutilisation constitue plutôt une solution complémentaire au recyclage pour diminuer le caractère critique du gallium et la pression sur les productions. Elle a ses limites car les technologies évoluent, de même que les matières utilisées changent.

5.5 L'option la plus favorable pour L'UE et l'environnement

L'option qui permettra de réduire le caractère critique du gallium pour l'Union Européenne à court et à moyen terme, tout en préservant l'environnement, est en fait la combinaison de la réutilisation d'objets dans leur intégralité, ou de composants contenant du gallium, avec le développement du recyclage en fin de vie des gisements dominants, à savoir les DEEE. Cela passe évidemment par un soutien à la recherche et par une obligation de recyclage des composés, même si leur concentration est faible, ainsi que par une obligation de transparence des chiffres d'offre et de demande. Si la pression de la demande venait encore à croître, l'Europe serait alors contrainte de booster la production primaire du gallium en incitant les producteurs d'aluminium à également produire du gallium. Cependant, cette option n'est pas sans conséquences pour l'environnement dans l'état actuel des technologies.

5.6 Conclusion du chapitre 5

Malgré l'actuel caractère critique du gallium pour l'Union Européenne, elle détient certaines cartes qui peuvent diminuer la pression de la demande du SET-Plan et des autres technologies émergentes. Cependant, il est clair qu'il faut passer à la vitesse supérieure. Le gallium nécessite une attention accrue, comme celle déjà accordée aux terres rares. Une étude consacrée à ces éléments et à leur recyclage a été réalisée par Öko-Institut pour le Parlement européen en 2011. Pourquoi n'a-t-on pas d'étude similaire pour le gallium, alors que sa substituabilité est inférieure aux terres rares et que l'on estime sa demande comme étant de plus en plus importante?

Agir dès maintenant en faveur de la production secondaire post-consommation du gallium, c'est aussi créer une opportunité économique en l'intégrant dans le recyclage d'autres éléments payants, tout en préservant l'environnement d'une production primaire plus intensive.

Nous pouvons donc répondre ici à la deuxième question de recherche qui est : la pression sur l'offre pour satisfaire les besoins des technologies émergentes doit-elle impliquer une permissivité environnementale plus élevée pour la production du gallium ?

La réponse est non. L'Europe peut s'en sortir en développant la production secondaire, et en incitant dans un deuxième temps la production primaire à partir des mines existantes de bauxite et de zinc. L'ouverture de nouvelles mines, uniquement pour le gallium, occasionnerait des impacts à l'environnement, tout en étant peut-être non rentable par rapport au gallium produit en Chine. Cette solution doit donc être évitée.

6. Conclusions

Bien que le gallium soit relativement abondant, c'est en tant que sous-produit de la bauxite et du zinc qu'il est extrait. De très nombreuses étapes sont nécessaires à sa production et à son raffinage pour atteindre la pureté requise par les applications. La production du gallium est faiblement intégrée (ADEME, 2010a). Malgré l'existence de réserves importantes, on a également pu constater l'inefficacité actuelle de sa production primaire car il n'est que très peu extrait de la bauxite et du zinc.

Peu de producteurs d'aluminium et de zinc sont ainsi prêts à investir dans la production du gallium étant donné la complexité des procédés, les teneurs en gallium faibles et variables dans la bauxite et le minerai de zinc, ainsi que les éventuelles normes environnementales à respecter, comme c'est le cas en Europe. Aucun investissement en Europe n'est dès lors véritablement assuré de part la plus grande facilité de produire du gallium en Chine. C'est d'ailleurs ce pays qui domine la production primaire. Ajoutons que l'on a pu se rendre compte des impacts environnementaux importants, en termes de réchauffement global et d'écotoxicité terrestre, de la production primaire du gallium par rapport à celle d'autres éléments.

Pourtant, le gallium est un élément fascinant auquel on découvre au fil du temps de nouvelles applications de plus en plus diversifiées. Ceci lui a valu ses différentes appellations : métal rare, critique, stratégique, «vert», et a entraîné une augmentation de sa demande. Selon les estimations les plus récentes, cette dernière est devenue particulièrement importante et le sera encore davantage dans les années à venir pour les technologies vertes et émergentes, d'autant plus qu'il n'y a pas actuellement de véritables substituts au gallium.

C'est en majorité allié à un ou plusieurs autres éléments que le gallium est utilisé, le plus souvent avec l'arsenic et l'azote. Les composés formés sont alors toxiques et dangereux pour l'homme et l'environnement. Alors que les impacts environnementaux de la production primaire sont non négligeables, les émissions de carbone apparaissent comme étant encore supérieures lors de l'intégration du gallium dans un composant. Le gallium n'intervient dans un produit qu'en très faible quantité et celle-ci tend d'ailleurs encore à diminuer. Généralement, le gallium est dispersé voire très dispersé dans l'objet final. Toutes ces raisons, combinées à un prix souvent trop bas, font que le gallium n'est pas recyclé aujourd'hui à partir des produits de post-consommation, alors que la production secondaire à partir des déchets de production dans le secteur des semi-conducteurs GaAs est efficacement optimisée. Elle contribue d'ailleurs au niveau mondial à l'équilibre offre-demande.

Le monopole de la Chine sur la production primaire, couplé à une demande en hausse parfois brutale en fonction des développements technologiques, peut entraîner certains déséquilibres locaux. L'Union Européenne y est d'ailleurs confrontée. Rien que pour atteindre les objectifs énergétiques qu'elle s'est fixée dans le cadre du SET-Plan, l'UE a besoin de davantage de gallium. A la suite de différentes études, l'UE a donc établi une liste d'éléments qualifiés de 'critique', comprenant le gallium, et pour lesquels un problème d'approvisionnement serait susceptible d'entraver le développement et le déploiement de différentes technologies. Sans vouloir être alarmiste, la situation est sous doute pire que celle décrite par les études, car elles se limitent souvent à quelques applications du gallium voire uniquement au photovoltaïque. Or, c'est méconnaître et fausser la réalité que de ne pas considérer l'ensemble des autres utilisations du gallium.

Malgré ce sombre tableau, cette crise potentielle d'un manque de gallium peut constituer une réelle opportunité pour l'Union Européenne. Encore faut-il qu'elle agisse et se donne les moyens d'agir. Elle qui détient certaines cartes peut prendre en exemple le Japon, le plus gros consommateur de gallium, qui s'est permis de réduire sa production primaire, non sans avoir au préalable augmenté sa production secondaire.

Comme on l'a montré en répondant à la première question de recherche, le recyclage post-consommation à partir des gisements disponibles, les DEEE, doit être le moyen d'action privilégié par

l'Union Européenne pour réduire le caractère critique actuel du gallium. Ce recyclage permettra de valoriser un plus large panel de matières que celles récupérées aujourd'hui. Ceci devrait être bénéfique pour l'environnement. Des études et plusieurs projets existent pour le recyclage des terres rares, et des initiatives similaires pour le gallium doivent être entreprises et soutenues. Les projets wallons, une fois plus avancés, nous renseigneront sur les tonnages possibles pour le recyclage des cartes électroniques et sur les bénéfices pour l'environnement par les analyses du cycle de vie. Outre les avantages environnementaux et socio-économiques qui devraient être tirés de leur déploiement industriel ultérieur, ils vont donc déjà nous apporter certains éclaircissements.

En parallèle à la mise en place de la production secondaire à partir d'objet en fin de vie, l'établissement d'un suivi et d'une synthèse annuelle de l'évolution des matières critiques, et donc du gallium, tels que ceux existant aux USA et réalisés par USGS via des enquêtes auprès des acteurs par exemple, est indispensable à l'échelle européenne. Sans informations plus précises et régulières sur les besoins et l'offre que celles actuellement disponibles, il est difficile de prendre les bonnes décisions, d'autant que depuis la fin 2011, le marché du gallium est relativement moribond, n'incitant pas aux investissements. Dans le même ordre d'idée, la réutilisation d'objets ou de composants doit être également renforcée.

La réponse à la deuxième question de recherche nous a permis de conclure qu'une plus grande permisivité environnementale, par l'ouverture de nouvelles mines de bauxite ou de zinc pour répondre à la hausse de la demande en gallium, ne doit pas être à l'ordre du jour au sein de l'Union Européenne. Par contre, l'amélioration de l'efficacité de la production primaire et l'incitation à l'extraction dans les mines existantes, si les besoins s'ont fait sentir, doivent être considérées, dans un souci de respect de l'environnement et d'une plus grande indépendance vis-à-vis de l'offre chinoise.

Ce que l'on constate encore, c'est que les acteurs peuvent travailler, sous la pression économique d'une demande très forte d'un secteur comme celui des LED, en contradiction avec la préservation de l'environnement. Pour pouvoir rapidement répondre à cette demande imposant une pression sur l'offre, ils utilisent certes des procédés aboutissant à des produits de qualité, mais qui génèrent des pertes en gallium irrécupérables.

L'extraction et le recyclage nécessitent d'évoluer comme un système complémentaire, dans lequel la part de chacun pour couvrir les besoins change au cours du temps (Hagelüken et Meskers, 2010). Assurés quasi exclusivement par la production primaire jusqu'au début des années 2000, les besoins le sont maintenant dans une large proportion par le recyclage des déchets de production, et le seront en partie, dans un avenir que nous espérons très proche, par la production secondaire à partir d'objets post-consommation.

En attendant, comme ce type de recyclage n'est pas en place, le gallium s'épuise plus qu'il ne le ferait s'il n'y avait que les pertes inévitables, ce qui n'aboutit qu'à renforcer encore plus son caractère 'critique' pour l'Union Européenne. Place à l'action pour que cela change !

Bibliographie

ABRAHAMSSON Martin *et al* (Groupe D5) (1998), *Life Cycle Assessment on Silicon and Gallium Arsenide Transistors*, Chalmers University of Technology,
<http://www.giuliodedeo.it/via/impresa/cap7/miljopro.html>, Consulté le 24 octobre, 2010

AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAÎTRISE DE L'ENERGIE (ADEME) (2008), *Etat des lieux de la valorisation des matériaux issus du traitement des véhicules hors d'usage*, rédigé par RDC-Environnement et BIO Intelligence Service, ADEME, 92 p.

AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAÎTRISE DE L'ENERGIE (ADEME) (2010a), *Etude du Potentiel de Recyclage de Certains Métaux Rares : Partie 1*, rédigé par BIO Intelligence Service, ADEME, 222 p.

AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAÎTRISE DE L'ENERGIE (ADEME) (2010b), *Etude du Potentiel de Recyclage de Certains Métaux Rares : Partie 2*, rédigé par BIO Intelligence Service, ADEME, 153 p.

« CIGS – La nouvelle technologie à couche mince », in *Alubel*,
<http://www.alubel.it/fr/cigs-la-nouvelle-technologie-a-couche-mince.html>, Consulté le 03 avril, 2012

ANGERER Gerhard *et al* (2009), « Rohstoffe für Zukunftstechnologien : Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage », Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

AYRES R.U. et AYRES L.W. (1995), « Chapter 2: Alumina, Aluminium and Gallium », in *Materials-Cycle Optimisation in the Production of Major Finished Materials*, INSEAD, Fontainebleau, pp. 18-35

BARRON Andrew R. *et al* (2011), *Chemistry of Electronic Materials*, Connexions,
<http://cnx.org/content/col10719/latest/>, Consulté le 14 septembre, 2011

BAUTISTA Renato G. (2003), « Processing to obtain high-purity gallium », in *Journal of the minerals, Metals and Materials Society*, vol.55, n° 33, pp. 23-26, SpringerLink

BELL Terrence (2010), *Defining minor and strategic metals*, Strategic Metal Investments LTD

BERNSTEIN Lawrence R. (2006), « Gallium content of some foods »,
<http://george-eby-research.com/html/gallium-in-food.html>, Consulté le 19 février, 2012

BERSANI François (s.d.), *Métaux stratégiques : La France s'organise*, Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)

BLANCHARD Patrick *et al* (2010), *Analyse de la stratégie de gestion des matières premières critiques de la France : Etat des lieux et analyse*, AEGE, 71 p.

BLAZY Pierre (2006), « Hydrométallurgie de quelques métaux stratégiques », in *Les techniques de l'industrie minière*, n° 32, pp. 53-57

BLAZY Pierre et JDID El-Aïd (2011), *Métallurgie du Gallium*, Techniques de l'ingénieur, M 2 369

BOSCH Wolfgang (2008), *Low Cost Semiconductor Technologies for LNA and Broadband Applications*, RFMD Company

BOUR D.P. (2001), « GaN-based Optoelectronic Devices », in *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, pp. 3445-3455, Elsevier

BRGM (2011), *Les matières premières minérales : le gallium*

Bureau of Mines (1992), *Report of Investigations 9419: Gallium and Germanium Recovery From Domestic Sources*, rédigé par D. D. Harbuck, United States Department of the Interior, 25p.

BURKE Erich (2011), *Waste Minimization, pollution prevention and Resource recovery at a GaAs Manufacturer*, CS MANTECH Conference, May 16th-19th, 2011, Palm Springs, California, USA

« LEDs Exceed California Hazardous Waste Standards », in *Environmental Building News*, <http://www.buildinggreen.com/auth/article.cfm/2011/1/27/LEDs-Exceed-California-Hazardous-Waste-Standards/>, Consulté le 29 avril, 2012

CASWELL Greg (s.d.), *The Transition to High Brightness LEDs*, DfR Solutions

CHAND Naresh (1989), « MBE Growth of High-quality GaAs », in *Journal of Crystal Growth*, vol.97, pp. 415-429, Elsevier

CHAVES Arthur Pinto *et al* (2000), « Gallium recovery as a byproduct of bauxites », in *Light Metals*, pp. 891-895

« CAS 7440-55-3 » in *Chemicalbook*, http://www.chemicalbook.com/CASEN_7440-55-3.htm, Consulté le 31 mars, 2012

« Solar Facts and Advice », in *CIGS Solar Cell*, <http://www.solar-facts-and-advice.com/CIGS-solar-cell.html>, Consulté le 25 février, 2012

CLASSEN M. *et al* (2009), «3 Gallium semiconductor-grade», in *Life Cycle Inventories of Metals*, ecoinvent v2.1 report No. 10 (2009), pp. 13-22

« High Purity Gallium (6N) », in *CMET (Centre for Materials for Electronics Technology)*, <http://cmet.gov.in/products/hyderabad/gallium.php>, Consulté le 12 septembre, 2011

COMET Traitements et INNOVATECH, *Votre voiture transformée en carburants*, Dossier de presse

CORNING (2011), « Corning details path to growth opportunities »

DAPKUS P.D. (1984), « A critical comparison of MOCVD and MBE for Heterojunction devices », in *Journal of Crystal Growth*, vol. 68, pp. 345–355, Elsevier

DENBAARS Steven P. (1998), *Gallium nitride Materials Technology*, International Technology Research Institute

DIMITRIEV Vladimir A. *et al* (2006), « HVPE apparatus for simultaneously producing multiple wafers during a single epitaxial growth run », in *Patent Application Publication*, n° US 2006/0011135 A1

DITTRICH Thomas *et al* (s.d.), *Gallium – can future demand be met by geological and technological availability?*, Department of Mineralogy, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Germany

DUBREUIL Thomas (2012), « Recyclage des panneaux photovoltaïques: crédibilité environnementale pour une filière énergétique », in *de-lege-natura*, <http://www.de-lege-natura.com/blog/lire-article-659539-9040936->

[recyclage des panneaux photovoltaïques_credibili.html](#), Consulté le 26 avril, 2012

ESCALON Virginie (2011), *Quels marchés et quels potentiels pour le recyclage des métaux rares ?*, Bio Intelligence Service

ELSNER Harald *et al* (2010), « Elektronikmetalle – zukünftig steigender Bedarf bei unzureichender Versorgungslage ? », in *Commodity Top News*, n°33, BGR

« PNUE : L'UE gaspille 99% de ses métaux de haute technicité », 2011, in *EurActiv*, <http://www.euractiv.com/fr/107/pnue-ue-gaspille-99-de-ses-taux-de-haute-technicit-news-508315>, Consulté le 19 octobre, 2011

WEEE directive, in *Europarl*, <http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//TEXT+TA+P7-TA-2012-0009+0+DOC+XML+V0//EN#BKMD-9>, Consulté le 28 avril, 2012

EUROPEAN COMMISSION (EC) (2010), *Matières premières – L'industrie européenne doit avoir accès aux matières premières critiques*, European Commission

EUROPEAN COMMISSION (EC) (2011), *Communication de la Commission au Parlement Européen, au Conseil, au Comité Economique et Social Européen et au Comité des Régions : relever les défis posés par les marchés des produits de base et les matières premières*

EUROPEAN COMMISSION DG ENV (ECDGENV) (2011), *Study of Photovoltaic Panels Supplementing the Impact Assessment for a Recast of the WEE Directive*, rédigé par Bio Intelligence Service, 86 p.

EUROPEAN COMMISSION ENTERPRISE AND INDUSTRY (ECEI) (2010a), *Critical raw materials for the EU: Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials*, European Commission, 69 p.

EUROPEAN COMMISSION ENTERPRISE AND INDUSTRY (ECEI) (2010b), *Annex V to the Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials*, European Commission, pp. 74-79

EUROPEAN COMMISSION JOINT RESEARCH CENTRE - Institute for Energy and Transport (JRC) (2011), *Critical Metals in Strategic Energy Technologies: Assessing Rare Metals as Supply-Chain Bottlenecks in Low-Carbon Energy Technologies*, rédigé par MOSS R.L. *et al*, European Commission

EUROPEAN UNION (2009), « Opinion of the European Economic and Social Committee on the 'Non-energy mining industry in Europe » », in *Official Journal of the European Union*

FANG Zheng *et* GESSER H.D. (1996), « Recovery of gallium from coal fly ash », in *Hydrometallurgy*, vol. 41, pp. 187-200, Elsevier

Federal Ministry of Economics and Technology (2010), *The German Government's raw materials strategy: Safeguarding a sustainable supply of non-energy mineral resources for Germany*, Berlin: BMWI, 26 p.

FEDOROV V. A. *et al* (2006), « Preparation of High-Purity Gallium from Semiconductor Fabrication Waste », in *Inorganic Materials*, vol. 42, pp. 570-589

FENG Feng (2008), « Method for producing 4N gallium metal », in *Faming Zhuanli Shenqing*

FIEEC (2011), *Une stratégie efficace sur les matières premières, enjeu de compétitivité de notre industrie : Propositions de la FIEEC*, 12 p.

« Finland's Minerals Strategy », 2010, Geological Survey of Finland

FREROT Antoine (2011), « L'Union Européenne et le défi de l'économie verte, quels modèles pour une meilleure efficacité dans l'utilisation des ressources ? », in *Fondation Robert Shuman/Question d'Europe*, n°206

FTHENAKIS Vasilis *et al* (2009), « Life cycle inventory analysis of the production of metals used in photovoltaics », in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.13, pp 493-317

FISCHER Anne L. (2010), « MOCVD systems meet LED demand », in *Photonics Spectra*, <http://www.photonics.com/Article.aspx?AID=41612>, Consulté le 25 février, 2012

GEYER Roland et DOCTORI BLASS Vetered (2010), « The economics of cell phone reuse and recycling », in *The International Journal of Advanced Manufacturing Thechnology*, vol. 47, n° 9-10, pp. 515-525, Springer

GRANT I.R. (2001), « III–V Compound Semiconductors: Growth », in *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, pp. 1441–1453, Elsevier

GRAY Floyd *et al* (2005), « Gallium and gallium Compounds », in *Encyclopedia of chemical Technology*, vol. 12, pp. 337 – 364, Wiley

GREBER J. F. (2002), « Gallium and Gallium Compounds », in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Germany, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.: Weinheim

HAGELÜKEN Christian (2005), *Recycling of electronic scrap at Umicore's integrated metals smelter and refinery*

HAGELÜKEN Christian (2007), *Metals Recovery from e-scrap in a global environment – technical capabilities, challenges and experience gained: 6th session of OEWG Basel Convention*, Geneva, 7 September, 2007

HAGELÜKEN Christian et MESKERS Christina E. M. (2010), « Complex Life Cycles of Precious and Special Metals », in GRAEDEL Thomas E. et Ester VAN DER VOET (2010), *Strüngmann Forum Report: Linkages of Sustainability*, MIT Press, pp. 163-197

HELGORSKY *et al* (1976), *Process for liquid/liquid extraction of gallium*, United States Patent 3,971,843

HOCQUARD Christian (2005), « Les enjeux des nouveaux matériaux métalliques », in *Géosciences*, n°1, pp. 6-11

HOCQUARD Christian (2008), « Les nouveaux métaux stratégiques : Métaux high-tech, « métaux verts », métaux stratégiques, vers une convergence », in *Mag'Mat* n°26, 30p.

HOCQUARD Christian (2009), *L'âge des métaux rares*, BRGM, 3 décembre, 2009

HOCQUARD Christian (2010), *Ressources minérales, nouvelles frontières*, Ecole thématique CNRS-INSU, Nancy, 3-5 février, 2010

HUIB Wouter et DERK Bol (2009), *Material Scarcity: An M2i study*, Nederland, Materials innovation institute

ICHINO TAKAHASHI Kazue *et al* (2009), « Resource recovery from mobile phone and environmental impact », in *Nippon Kinzoku Gakkaishi*, vol. 73, N°9, pp. 747-751

International Finance Corporation (IFC) (2007), *Directives environnementales, sanitaires et sécuritaires pour la fabrication des semi-conducteurs et autres articles électroniques*, World Bank group

« How semiconductors are made », s.d., in *Intersil*,
<http://rel.intersil.com/docs/lexicon/manufacture.html>, Consulté le 30 janvier, 2011

IZUMI Shigekazu *et al* (2000), « Environmental safety issues for molecular beam epitaxy platform growth technology », in *Journal of Crystal Growth*, vol. 227–228, pp. 150–154, Elsevier

JELACIC C. *et al* (1986), « Method of obtaining gallium from aluminate solution by electrolysis », in *Materials Science and Technology*, vol. 2, n°4, pp.416-419

JIANG W. et WEBER W.J. (2006), « Effect of irradiation temperature on dynamic recovery in gallium nitride » in *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, vol. 242, pp. 431–433, Elsevier

JONGSEUNG Yoon *et al* (2010), « GaAs photovoltaics and optoelectronics using releasable multilayer epitaxial assemblies », in *Nature*, n° 465, pp. 329-333

JONHSON Jeremiah *et al* (2007), « Dining at the Periodic Table: Metals concentrations as they relate to recycling » in *Environmental Science & Technology*, vol. 41, N°5, pp. 1759-1765

JUNG Chang-Hwan *et al* (2009), « Leaching characteristics of rare metal elements and chlorine in fly ash from ash melting plants for metal », in *Waste Management*, vol.29, n°5, pp. 1532-1540

KINOSHITA T. *et al* (2004), « Selective recovery of gallium with non-ionic surfactants from hydrochloric acid solution and its application to leaching solution of zinc refinery residues », in *Separation and Purification Technology*, vol. 37, pp. 127-133, Elsevier

KINOSHITA T. *et al* (2011), « Selective recovery of gallium with continuous counter-current foam separation and its application to leaching solution of zinc refinery residues », in *Separation and Purification Technology*, vol. 78, pp. 181-188, Elsevier

KOZLOV S.A. *et al* (2003), « Preparation of High-Purity Gallium from Semiconductor Fabrication Waste », in *Inorganic Materials*, vol.39, n°12, pp. 1257-1266

KUKUSHKIN S. A. *et al* (2008), « Substrates for Epitaxy of Gallium Nitride: New Materials and Techniques », in *Reviews on Advanced Materials Science*, vol. 17, pp. 1-32

LAHIRI Swati *et al* (1996), « Gallium recovery - technological alternatives », in *Bulletin of Electrochemistry*, vol. 12, pp. 342-346

LAMERANT Jean Michel (1988), « Extraction of gallium from Bayer process liquors and its purification », in *Freepatentsonline*,
<http://www.freepatentsonline.com/EP0297998.html>, Consulté le 16 mars, 2012

LEE Seung-Jin et Joyce COOPER (2008), *Estimating Regional Material Flows for LCDs: Proceedings of the IEEE International Symposium on Electronics and the Environment ISEE (May 2008)*

« Métaux rares : rhénium, gallium, germanium, lithium, cobalt, tantale, titane... (I) » (2008), in *l'édito des matières premières*,
<http://edito-matieres-premieres.fr/metaux-rares-rhenium-gallium-germanium-lithium-cobalt-tantale-titane-i/>, Consulté le 27 juin, 2012

« Aluminium », s.d., in *Madehow*,
<http://www.madehow.com/Volume-5/Aluminum.html>, Consulté le 23 octobre, 2011

MAHAMUNI SANDIP V. *et al* (2010), « Liquid–liquid extraction and recovery of gallium (III) from acid media with 2-octylaminopyridine in chloroform: analysis of bauxite ore », in *Journal of Serbian Chemical Society*, vol. 75, n°8, pp. 1099-1113

MARKTVART T. et CASTANER L. (2003), *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Application*, New York: Elsevier, 16 p.

« Gallium scan of the body », s.d., in *Medical Dictionary*,
<http://medical-dictionary.thefreedictionary.com/Gallium+Scan+of+the+Body>, Consulté le 1 février, 2012

MEIJER A. *et al* (2003), « Life-cycle assessment of photovoltaic modules: Comparison of mc-Si, InGaP and InGaP/mc-Si solar modules », in *Progress in Photovoltaics*, vol. 11, n°4, pp. 275-287

MINERAL INFORMATION INSTITUT (MII) (2010), *Fact Sheet: What's in my cell phone?*, US Geological Survey, 2010

MISHRA C.R. et NAIR M.K.B. (2008), « Bauxite to Gallium-The Electronic Metal of the Twenty First Century », in *Light Metals*

« Minor Metals in the periodic table: Gallium », s.d.a, in *MMTA (MINOR METAL TRADE ASSOCIATION)*,
<http://www.mmta.co.uk/metals/Ga>, Consulté le 24 octobre, 2011

« Gallium (by a special contributor) », s.d.b, in *MMTA*,
http://www.mmta.co.uk/uploaded_files/GalliumMJ.pdf, Consulté le 10 novembre, 2011

MOHR N. J. *et al* (2007), « Life Cycle Assessment of Thin-film GaAs and GaInP/GaAs Solar modules », in *Progress in Photovoltaics : Research and Applications*, vol. 15, pp. 163-179

MOSKALYK R.R. (2003), « Gallium: the backbone of the electronics industry », in *Minerals Engineering*, vol. 16, n° 10, pp. 921-929, Elsevier

MURPHY Michael D. *et al* (2011), *Sustainability of Indium and Gallium – In the Face of Emerging Market*, Indium Corporation

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC) (2007), *Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy*, Washington, DC: The National Academies Press

NEIRA Joaquin *et al* (2006), « End-of-Life Management of Cell Phones in the United States », University of California, Santa Barbara

NORDBERG Gunnar, « Metal: Chemical Properties and Toxicity: Gallium », in *Encyclopaedia of Occupational Health and Safety*, vol. 3, p. 63.17, Geneva: International Labour Office

« New demands puts tension into gallium/indium supply chain », in *Opto & Energy Solutions Newsletter* (2011), 40 Edition

« Recycling: Gallium arsenide recycling », s.d., in *Process Research Ortech*, <http://www.processortech.com/content.php?id=8>, Consulté le 28 avril, 2012

OSRAM (2009), « Life cycle Assessment of Illuminants: A comparison of Light Bulbs, Compact Fluorescent Lamp and LED Lamps »

Patent 6495707 (2002), *Process and apparatus for production of organometallic compounds*, in Patent Genius

PETIBON Stéphane (2009), « Thèse de doctorat : Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Université de Toulouse

PHOTONICS LAB (2004), « MOCVD: Basics and applications », <http://home.icpr.or.kr/~kpscondmat/link/mocvd.pdf>, Consulté le 25 février, 2012

« Magnetic breakthrough may have significant pull », 2011, in *Physorg* <http://www.physorg.com/news/2011-12-magnetic-breakthrough-significant.html>, Consulté le 20 février, 2012

PRAXAIR (2010), *Arsine : Fiche technique santé-sécurité*, Canada

Publi G2 (s.d.), « Contrôle du respect de la législation par le pouvoir régional », in *Éléments de gestion environnementale*, http://etat.environnement.wallonie.be/uploads/tbe/parties/chapitres/fiches/fiches_TBE2010_P61/TBE2010_PUBLI_G2_.pdf, Consulté le 17 juin, 2012

RAMACHANDRA Rao Patcha *et al* (2008), « Environmentally friendly process for the recovery of gallium from Bayer process liquors », in *Indian Patent Application*

REINER Lisa (2005), *Gallium Nitride*, MSE 630, April 20, 2005

REY Marianne (2011), « A Grenoble, les nanotechnologies voient grand : Heliodel – La nouvelle génération de LED », in *L'entreprise*, http://lentreprise.lexpress.fr/recherche-et-developpement/grenoble-pousse-ses-nanotechnologies_31029.html#content, Consulté le 3 février, 2012

RIGO Julie (s.d.), *Pollution de l'air : Quels impacts sur la santé*, réseau intersyndical de sensibilisation à l'environnement (rise)

RIVEROS P.A. (1990), « Recovery of gallium from Bayer liquors with an amidoxine resin », in *Hydrometallurgy*, vol. 25, pp. 1-18, Amsterdam, Elsevier

ROSKILL (2011), *Gallium: Global Industry Markets and Outlook: Eighth edition*, Roskill Information Services, 108 p.

RUDOLPH P. et JURISCH M. (1999), « Bulk growth of GaAs An overview », in *Journal of Crystal Growth*, vol. 198-199, pp. 325–335, Elsevier

« Triethylgallium — TEGa », in *SAFC* <http://www.safcglobal.com/safc-hitech/en-us/home/overview/products/gallium/triethylgallium.html>, Consulté le 19 février, 2012

- « Lithium-chlorure de thionyle (Li-SOCl₂) », s.d., in *Saftbatteries*, http://www.saftbatteries.com/Technologies_Lithium_LiSOCl2_303/Language/fr-FR/Default.aspx, Consulté le 29 février, 2012
- SALLINGBOE Kimberley (2008), « Where does your mobile phone go to die?», in *Mobile Enterprise Magazine*, pp. 28-29
- « Gallium », s.d., in *Santedev*, <http://www.santedev.org/biblio/index.php?dossier=cimT56.8>, Consulté le 02 mars, 2012
- SCHELBENZUBER Wolfgang G. (2012), « Chapitre 2: Basic Concepts » in *GaN-Based Laser Diodes: Towards Longer Wavelength and Short Pulses*, Springer
- SCHLESINGER T. E. (2001), « Gallium Arsenide », in *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, pp. 3431–3435, Elsevier
- SEELEY Larry (2011), *Recycling Gallium, Rhenium, Indium 2010*, Neo Materials Technologies, March 23, 2011
- SELVI P. *et al* (2004), « Gallium Recovery from Bayer's Liquor Using Hydroxamic Acid Resin », in *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 92, pp. 847-855, Wiley Periodicals
- SemiconductorTODAY(2010), «84 Technology focus : MOCVD for LED manufacturing – Veeco - Accelerating the growth of the HD-LED industry », in *Compounds et Advanced Silicon*, vol.5, n°2
- SENGÜL Hatice *et al* (2008), « Toward Sustainable Nanoproducts: An Overview of Nanomanufacturing Methods », in *Journal of Industrial Ecology*, vol. 12, n°3, pp. 329-358
- SHAH R. P. (1995), « Upgradation of alumina refinery at Hindalco, Renukoot (India) », in *Light Metals*
- STURGILL J.A. *et al* (1999), « Pollution prevention in the semiconductor industry through recovery and recycling of gallium and arsenic from gaas solid waste », in *Clean Products and Processes*, vol.1, pp. 248-256, Springer-Verlag
- TAMAS Kekesi (2007), « Gallium extraction from synthetic Bayer liquors using Kelex 100-kerosene, the effect of loading and stripping conditions on selectivity », in *Hydrometallurgy*, vol. 88, pp. 170-179
- The GREENS/EFA GROUP in the EUROPEAN PARLIAMENT (2011), *Study on Rare Earths and Their Recycling*, rédigé par SCHÜLER Doris *et al* (Öko-Institut e.V.), 140 p.
- THOMPSON Alan G. (1997), « Materials Update: MOCVD technology for semiconductors », in *Materials Letters*, vol. 30, pp. 255-263, Elsevier
- TORRANCE Keith W. *et al* (2010), « Measurement of arsenic and gallium content of gallium arsenide semiconductor waste streams by ICP-MS », in *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, vol. 45, n°4, pp. 471-475
- UK, DEPARTMENT FOR ENVIRONMENT FOOD AND RURAL AFFAIRS (DEFRA) (2009), *Life Cycle Assessment of Ultra-Efficient Lamps*, rédigé par Navigant Consulting Europe (NCE)
- UK, ENVIRONMENT AGENCY UK GOVERNMENT (2011), *Study into the feasibility of protecting and recovering critical raw materials through infrastructure development in the south east of England: Annexes*, rédigé par Oakdene Hollins Ltd, European Pathway to Zero Waste (EP0W), 110 p.

UNITED NATION ENVIRONMENT PROGRAM (UNEP) (2005), *Environment Alert Bulletin: E-waste, the hidden side of IT equipment's manufacturing and use*, DEWA/GRID Europe

UNITED NATION ENVIRONMENT PROGRAM (UNEP) (2007), *E-waste Volume II: E-waste Management Manual*, International Environment Technology Centre

UNITED NATION ENVIRONMENT PROGRAM (UNEP) (2009), *Critical Metals for Future Sustainable Technologies and their Recycling Potential*, rédigé par BUCHERT Matthias, SCHÜLER Doris, BLEHER Daniel, Öko-Institut e.V., UNEP

UNITED NATION ENVIRONMENT PROGRAM (UNEP) (2010a), *Assessing the Environmental Impacts of Consumption and Production: Priority Products and Materials*, rédigé par HERTWICH, E. *et al*, The International Panel for Sustainable Resource Management, pp. 67-68

UNITED NATION ENVIRONMENT PROGRAM (UNEP) (2010b), *International panel for Sustainable Resource Management*, New York City, 13 May 2010

UNITED NATION ENVIRONMENT PROGRAM (UNEP) (2011), *Recycling of Metals: A Status Report*, International Resource Panel, 46 p.

UNIVERSITY of STUTTGART (2008), *(SENSE) Sustainability Evaluation of Solar Energy Systems: Life Cycle Assessment*, University of Stuttgart, 29 p.

URYU Tsutomu *et al* (2003), « Environmental fate of Gallium Arsenide Semiconductor Disposal: A case study of mobile phones », in *Journal of Industrial Ecology*, vol. 7, n°2, pp. 103-112

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (DOE) (2010), *Critical Materials Strategy*, DOE

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (DOE) (2011), *Critical Materials Strategy*, DOE

US Geological Survey (USGS) (1999), *1999 Minerals Yearbook: Gallium*, rédigé par KRAMER Deborah A., USGS, 6 p.

US Geological Survey (USGS) (2000), *2000 Minerals Yearbook: Gallium*, rédigé par KRAMER Deborah A., USGS, 11 p.

US Geological Survey (USGS) (2001), *2001 Minerals Yearbook: Gallium*, rédigé par KRAMER Deborah A., USGS, 9 p.

US Geological Survey (USGS) (2002), *2002 Minerals Yearbook: Gallium*, rédigé par KRAMER Deborah A., USGS, 11 p.

US Geological Survey (USGS) (2003a), *2003 Minerals Yearbook: Gallium*, rédigé par KRAMER Deborah A., USGS, 12 p.

US Geological Survey (USGS) (2003b), *Recycling-Metals*, USGS, 16 p.

US Geological Survey (USGS) (2004), *2004 Minerals Yearbook: Gallium*, rédigé par KRAMER Deborah A., USGS, 10 p.

U.S. Geological Survey (USGS) (2005), *Historical statistics for mineral and material commodities in the United States : Gallium end-use statistics*, rédigé par KELLY T.D. et MATOS G.R., U.S. Geological Survey Data Series 140 <http://pubs.usgs.gov/ds/2005/140>, Consulté le 15 juin, 2012

- US Geological Survey (USGS) (2006a), *Mineral Commodity Summaries: Gallium*, rédigé par KRAMER Deborah A., USGS, pp. 66-67
- US Geological Survey (USGS) (2006b), *2005 Minerals Yearbook: Gallium*, rédigé par KRAMER Deborah A., USGS, 10 p.
- US Geological Survey (USGS) (2007a), *Mineral Commodity Summaries: Gallium*, rédigé par KRAMER Deborah A., USGS, pp. 62-63
- US Geological Survey (USGS) (2007b), *2006 Minerals Yearbook: Gallium*, rédigé par KRAMER Deborah A., USGS, 11 p.
- US Geological Survey (USGS) (2008), *Mineral Commodity Summaries: Gallium*, rédigé par KRAMER Deborah A., USGS, pp. 64-65
- US Geological Survey (USGS) (2009a), *Mineral Commodity Summaries: Gallium*, rédigé par JASKULA Brian W., USGS, pp. 60-61
- US Geological Survey (USGS) (2009b), *2007 Minerals Yearbook: Gallium*, rédigé par JASKULA Brian W., USGS, 9 p.
- US Geological Survey (USGS) (2010a), *Mineral Commodity Summaries: Gallium*, rédigé par JASKULA Brian W., USGS, pp. 58-59
- US Geological Survey (USGS) (2010b), *Byproduct Mineral Commodities Used for the Production of Photovoltaic Cells*, rédigé par BLEIWAS Donald, Reston, USGS, 10 p.
- US Geological Survey (USGS) (2010c), *The Global Flow of Aluminium From 2006 Through 2025*, rédigé par MENZIE W.D. et al, Reston, USGS, 73 p.
- US Geological Survey (USGS) (2010d), *2008 Minerals Yearbook: Gallium*, rédigé par JASKULA Brian W., USGS, 10 p.
- US Geological Survey (USGS) (2011a), *Mineral Commodity Summaries: Gallium*, rédigé par JASKULA Brian W., pp. 58-59
- US Geological Survey (USGS) (2011b), *2009 Minerals Yearbook: Gallium*, rédigé par JASKULA Brian W., 8 p.
- US Geological Survey (USGS) (2012a), *Mineral Commodity Summaries: Gallium*, rédigé par JASKULA Brian W., USGS, pp. 58-59
- US Geological Survey (USGS) (2012b), *2010 Minerals Yearbook: Gallium*, rédigé par JASKULA Brian W., USGS, 7 p.
- US Geological Survey (USGS) (2012c), *Mineral Commodity Summaries: Bauxite and Alumina*, rédigé par BRAY E. Lee, pp. 26-27
- US Geological Survey (USGS) (2012d), *Mineral Commodity Summaries: Zinc*, rédigé par TOLCIN Amy C., pp. 188-189
- VAN DEN BROUK Kris (2010), *Metal Pages International - Minor Metals Conference: Exploring the challenges in the closing loop for special metals*, Xiamen, 19-20 Octobre 2010
- VAN DEN BROUK Kris (2011), *International Minor Metals Conference: Dealing with complexity in*

developing new recycling technologies – the case of the critical metals, Philadelphia, 4-6 May, 2011

VANNUCCI François (2011), « Les oscillations des neutrinos », in *futura-sciences*, http://www.futura-sciences.com/fr/doc/t/physique/d/les-oscillations-de-neutrinos_1052/c3/221/p3/, Consulté le 1 février, 2012

VULCAN Tom (2009), « Gallium: A Slippery Metal » in *MMTA*, http://www.mmta.co.uk/uploaded_files/Hard%20Assets.%20Gallium.pdf, Consulté le 18 octobre, 2011

« GaAs Gallium Arsenide » in *Wafer Technology*, <http://www.wafertech.co.uk/galliumarsenide.htm>, Consulté le 19 février, 2012

WEBB D.R. *et al* (1984), « In Vitro and in Vivo Toxicity of Gallium Arsenide », in *Toxicology and Applied Pharmacology*, vol. 76, pp. 96-104

« Gallite Mineral Data », in *webmineral*, <http://webmineral.com/data/Gallite.shtml>, Consulté le 31 mars, 2012

WEYERS Markus (s.d.), *Substrates for GaN Technology*, Ferdinand–Braun-Institut, Berlin

« Circuit intégré », s.d., in *Wikipedia*, http://fr.wikipedia.org/wiki/Circuit_int%C3%A9gr%C3%A9, Consulté le 3 février, 2012

WHITAKER Tim (2011a), « Industrial News: Osram Opto demonstrates 142 lm/W warm-white LED », in *LEDs Magazine*, <http://www.ledsmagazine.com/news/8/3/12>, Consulté le 01 mars, 2012

WHITAKER Tim (2011b), « Metal-organic precursors and other LED Materials », in *LEDs Magazine*, <http://www.ledsmagazine.com/news/8/2/2>, Consulté le 26 février, 2012

WILLIAMS Paul T. (2010), « Valorization of Printed Circuit Boards from Waste Electrical and Electronic Equipment by Pyrolysis », in *Waste Biomass Valor*, vol.1, pp. 107-120, Springer

WRIGHT Maury (2011), « Bridgelux hits 160 lm/W in lab with LEDs produced using GaN on silicon », in *LEDs Magazine*, <http://www.ledsmagazine.com/news/8/8/15>, Consulté le 01 mars, 2012

Wuppertal Institute (2009), *Light-Emitting Diodes for General Lighting: A Bright Idea*, Wuppertal: Wuppertal Institute

XIANG Dong *et al* (2007), « Printed circuit board recycling process and its environmental impact assessment », in *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 34, n° 9-10, pp. 1030-1036, SpringerLink

XU Ke *et al* (2007), « Study on the recovery of gallium from phosphorus flue dust by leaching with spent sulfuric acid solution and precipitation », in *Hydrometallurgy*, vol. 86, pp. 172-177, Elsevier

YU H-S et LIAO W-T (2011), « Gallium: Environmental pollution and health effects », in *Encyclopedia of Environmental Health*, pp. 829 -833, Elsevier

Bibliométrie

Selon la définition du Larousse, la bibliométrie est une partie de la bibliologie qui s'applique à l'étude quantitative de la production, de la distribution et de la consommation de livres, de périodiques et d'autres documents imprimés.

Une bibliométrie a été réalisée dans le cadre de ce travail pour mesurer l'importance de différents sujets relatifs au gallium et traités dans celui-ci. Cette bibliométrie a été faite via SciFinder. La période de dates couverte s'étend jusqu'à 2012. L'analyse est synthétisée dans le tableau et les figures ci-dessous. Notons que les recherches sont indépendantes les unes des autres.

Tableau 23 : Synthèse du nombre de documents produits par année pour les mots clés rentrés dans le moteur de recherche.

Mots rentrés pour la recherche	Titre de la query	Titre de la query	Titre de la query	Titre de la query	Titre de la query	Titre de la query
Année	Gallium recovery from bayer liquor # articles - 77	Gallium recovery from zinc # articles - 22	Gallium recovery & coal # articles - 47	Gallium recovery from SCRAP # articles - 54: 1 sans date	Gallium recovery & environmental impact # articles - 4	Gallium & Environmental impact & Life cycle # articles - 12
2012	1	1		1		1
2011	2			1		
2010					2	2
2009	1	2	1		2	2
2008	2		4	1		2
2007	2		1	1		
2006	2		1			
2005	2			3		
2004	2	1	1	3		
2003	1	1		2		
2002	2	1	1	3		
2001	1					
2000	1			3		1
1999	1		1	1		
1998	2	1		3		1
1997			1			
1996	5		1	1		
1995	1		1	3		
1994		1	3			1
1993	1		1			1
1992		1	1			
1991	3		1	2		
1990	3	1				
1989	5	1		4		
1988	6			12		
1987	1	1	1	1		
1986				2		
1985	2		2	2		
1984	2	2	1			
1983	2		2			
1982	1	2	1			
1981		1		1		
1980 et avant	23	5	21	3		1
Total	54	17	26	50	4	11

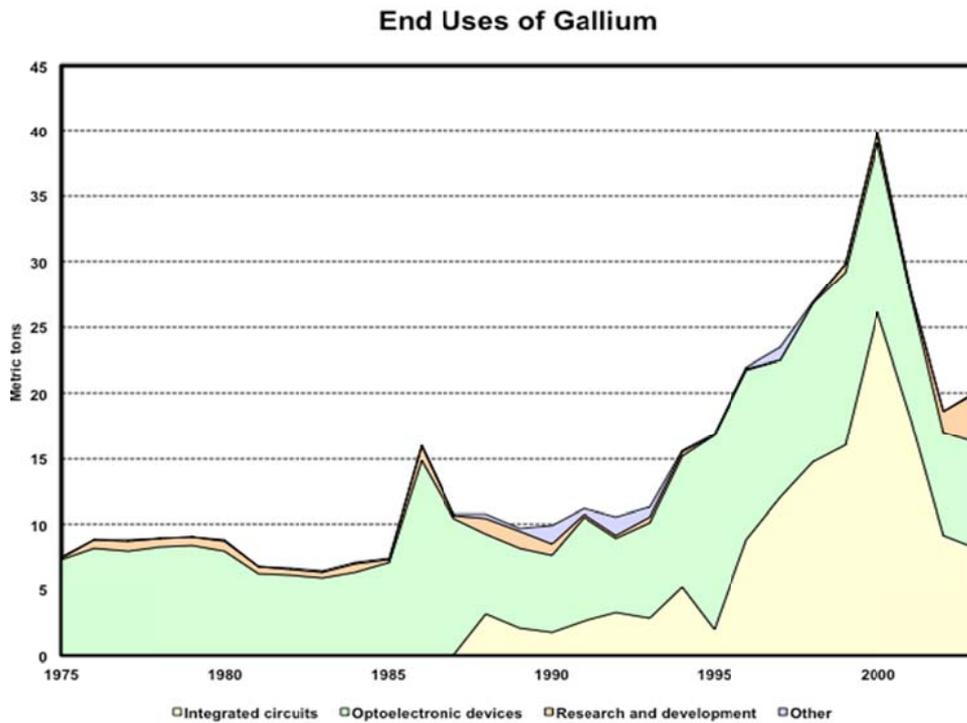
Source : SciFinder

De ce tableau, on peut faire plusieurs constatations :

- Les documents relatifs à la production primaire du gallium par extraction à partir des liqueurs Bayer sont relativement nombreux. Il en est de même pour le traitement et la valorisation des rebus (scraps) à partir de 1988.
- Il y a très peu de documents qui se rapportent aux impacts environnementaux et/ou aux analyses des cycles de vie. La majorité de ceux-ci ont été produits après 2005, ce qui montre que les préoccupations environnementales sont récentes et très faiblement considérées dans le secteur du gallium.
- 1988 est une année au cours de laquelle un grand nombre de documents ont été produits. Comme le montre la figure 35, 1988 correspond au début de la comptabilisation séparée du gallium consommé pour les circuits intégrés et les appareils optoélectroniques. Avant 1988, les données relatives aux circuits intégrés étaient incluses dans celles des appareils optoélectroniques, car la consommation de

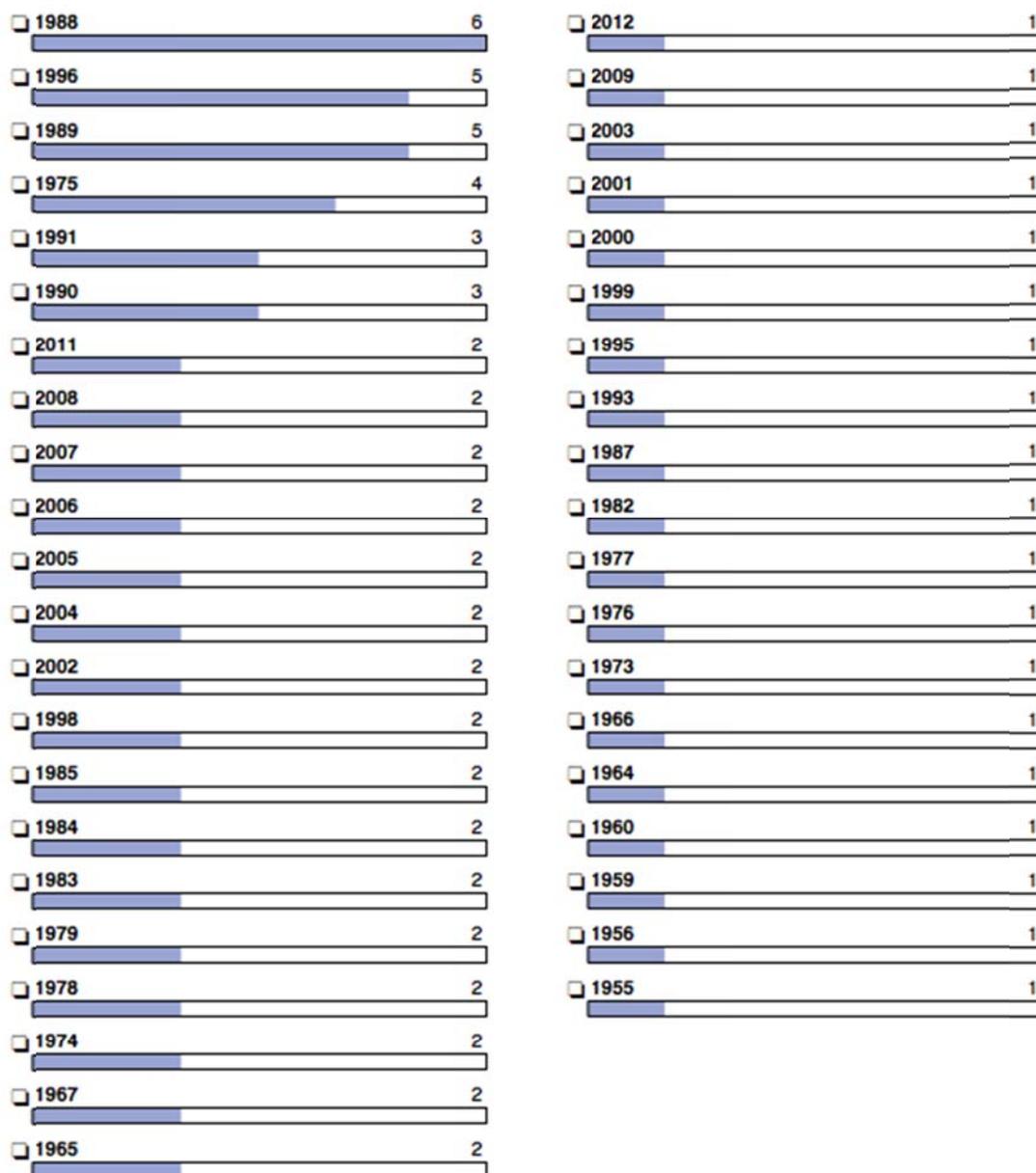
gallium pour les circuits intégrés était estimée comme étant trop petite (USGS, 2005). Le développement des circuits intégrés à base de gallium explique sans doute une littérature plus abondante sur la production primaire et secondaire de celui-ci, puisque les besoins ont commencé à être plus importants.

Figure 35 : Emploi du gallium aux USA de 1975 à 2003.



Source : USGS (2005)

Figure 36 : Nombre de documents relatifs à ‘Gallium recovery from liquor Bayer’ triés par année.



Source : SciFinder

La figure 36 nous renseigne que l'extraction du gallium à partir des liqueurs Bayer est un sujet sur lequel on écrit régulièrement. Cela démontre l'importance de la bauxite, dont on tire la liqueur Bayer, qui ensuite joue le rôle de source pour l'obtention du gallium.

Figure 37 : Nombre de documents relatifs à ‘Gallium recovery from liquor Bayer’ triés par auteur.

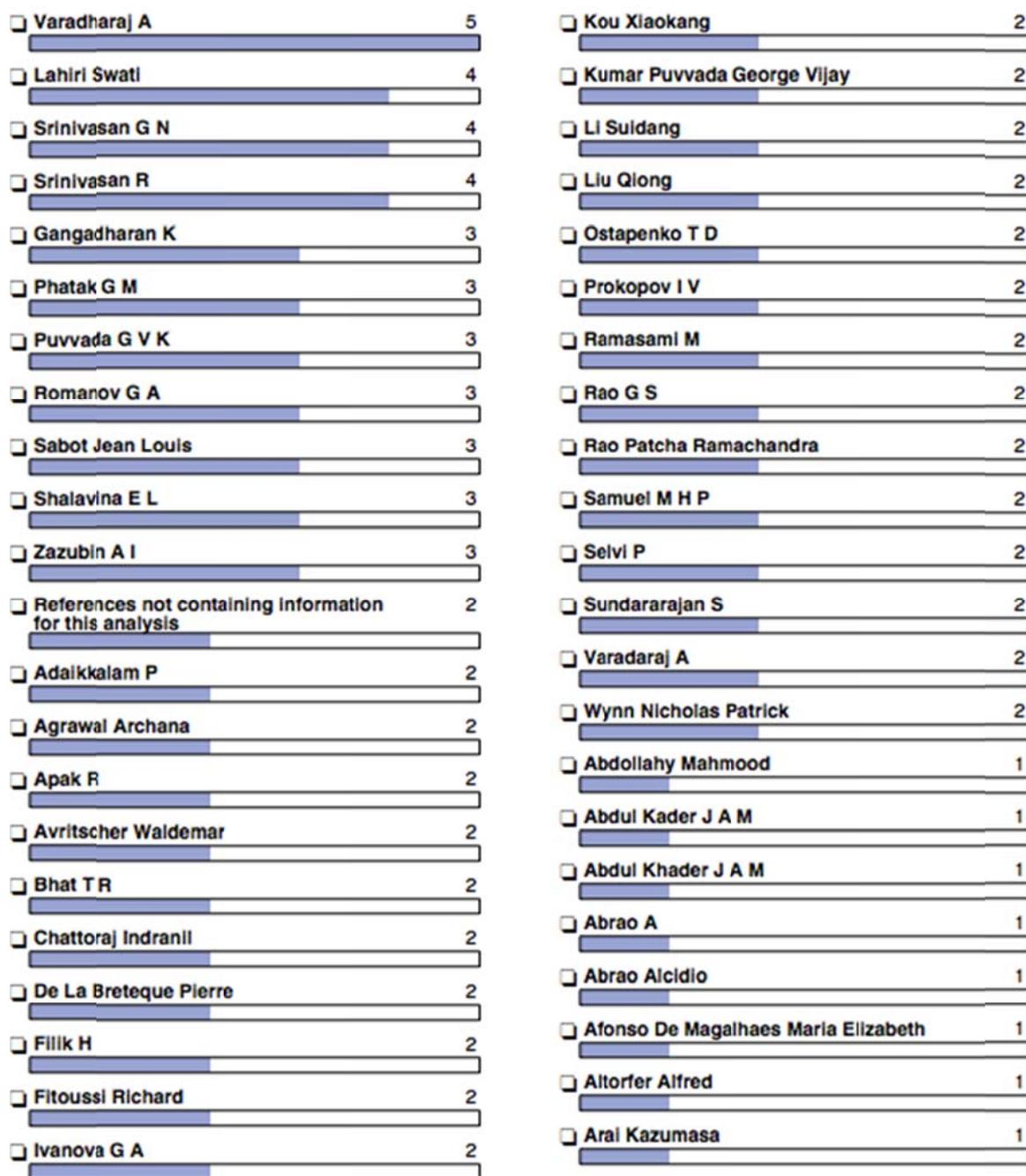
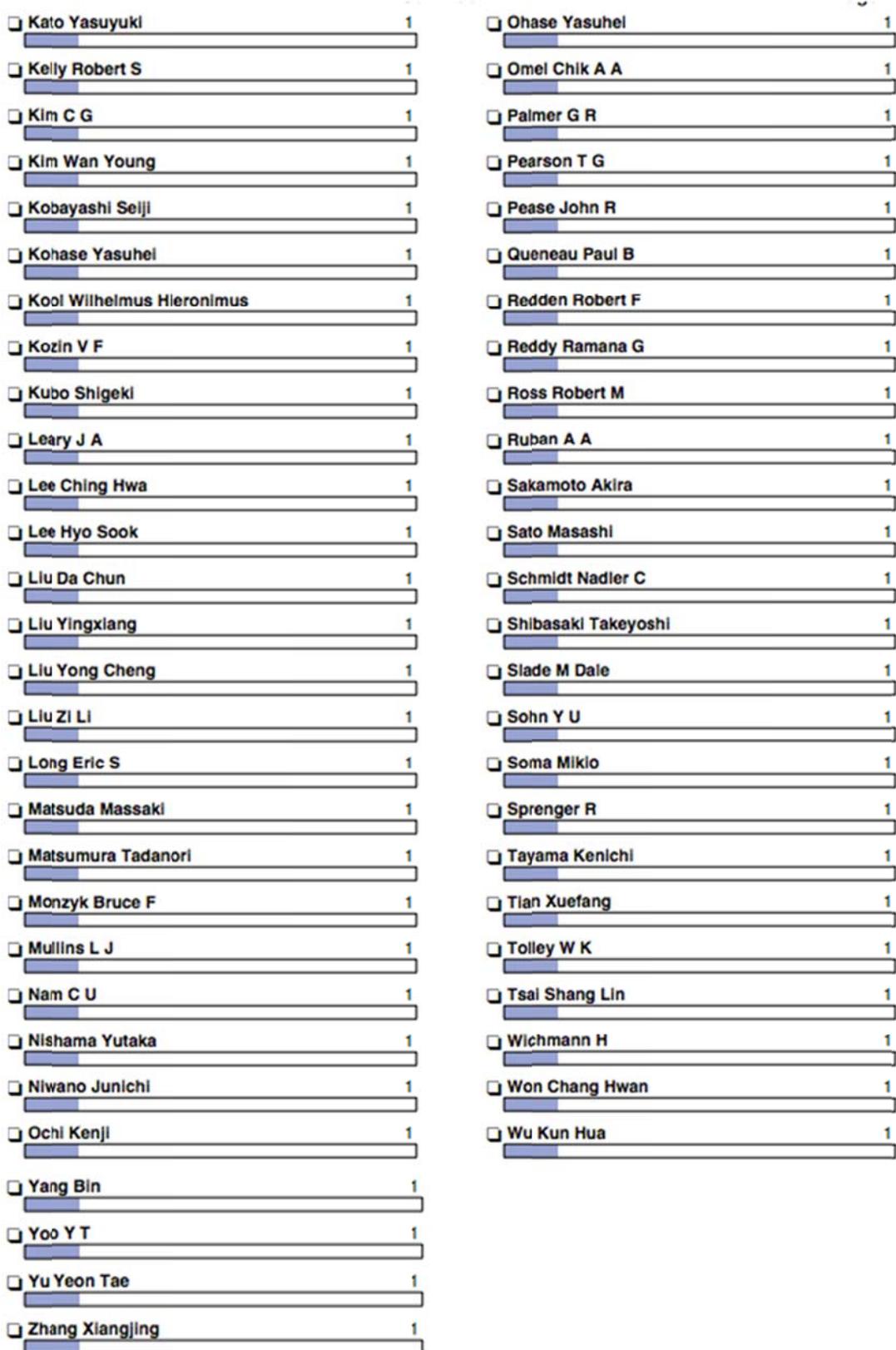


Figure 37 : Nombre de documents relatifs à ‘Gallium recovery from liquor Bayer’ triés par auteur.

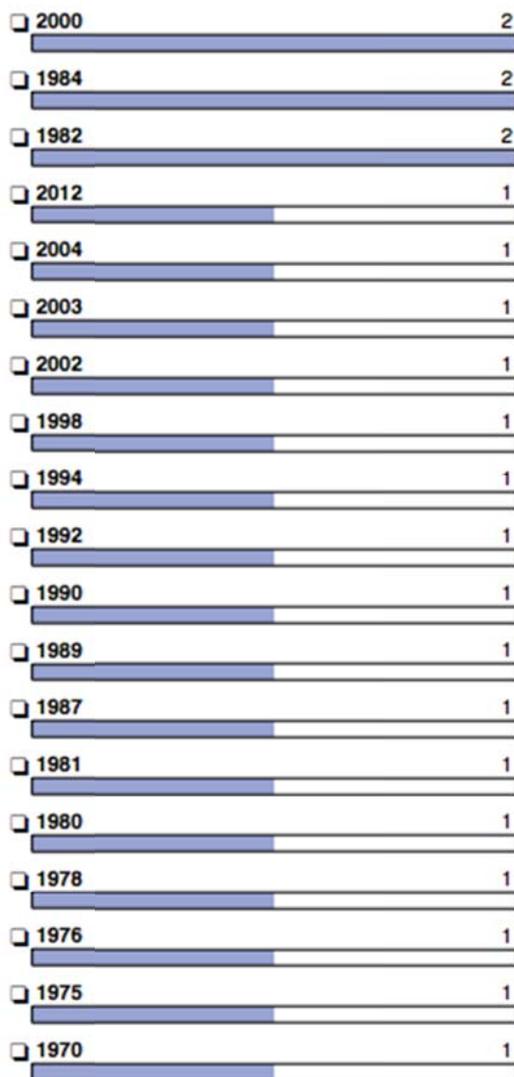


Source : SciFinder

D'après la figure 37, il est évident que les auteurs indiens ont beaucoup écrit sur l'extraction du gallium des liqueurs Bayer.

Notons encore que sur les 6 documents produits à partir de 2008, quatre ont été produits par des Chinois, un a été écrit en persan, et le dernier a été rédigé en anglais par des auteurs indiens. Cela confirme donc le monopole chinois en ce qui concerne la production primaire du gallium à partir de 2008.

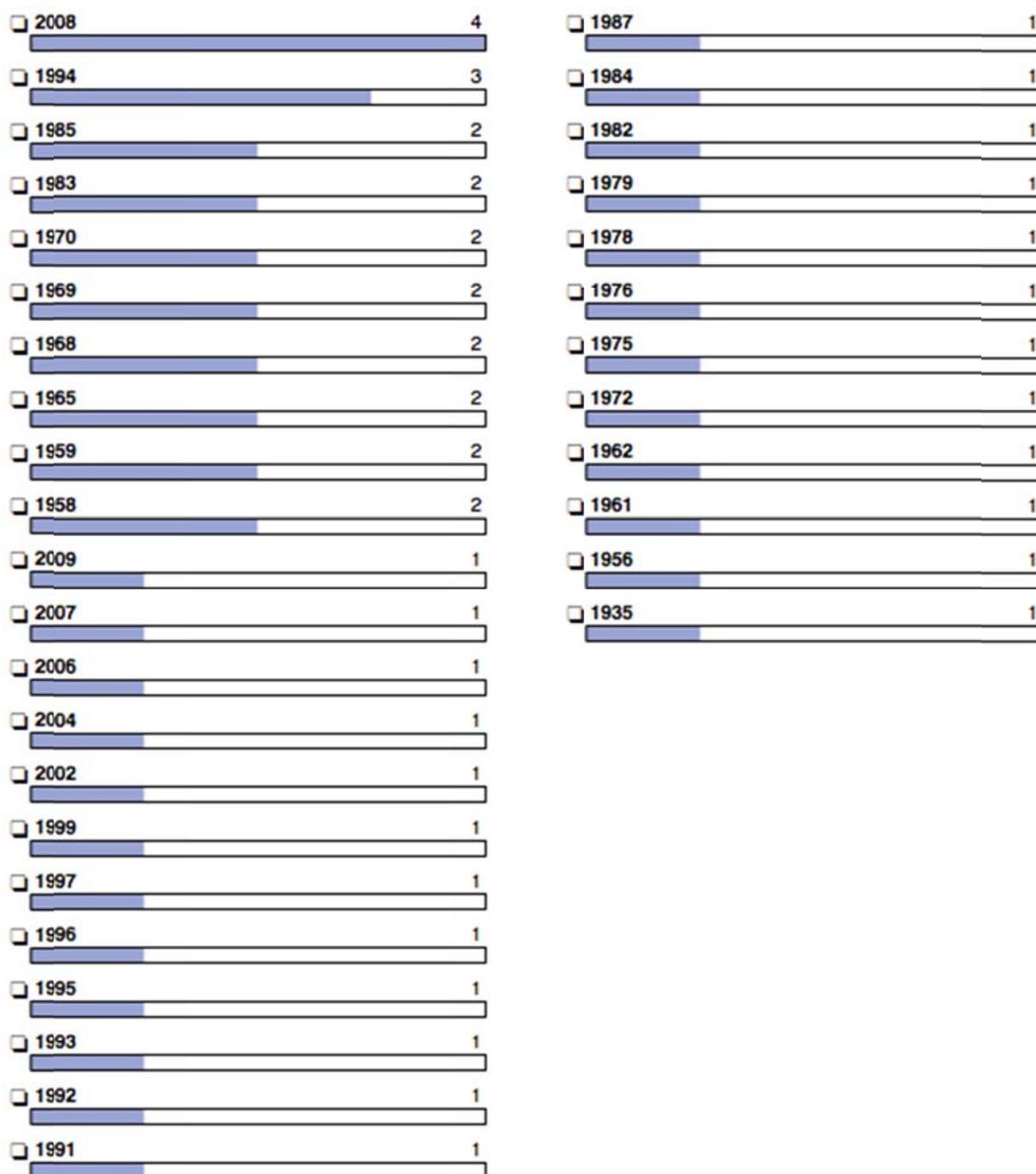
Figure 38 : Nombre de documents relatif à 'Gallium recovery & zinc' triés par année.



Source : SciFinder

L'extraction du gallium comme sous-produit du traitement du zinc est un sujet sur lequel il y a nettement moins de documents produits par comparaison avec le sujet précédent. C'est en corrélation avec les estimations des tonnages de gallium obtenus à partir résidus de lixiviation de l'oxyde de zinc et des scories de la pyrométallurgie.

Figure 39 : Nombre de documents relatif à 'Gallium recovery & coal' triés par année.



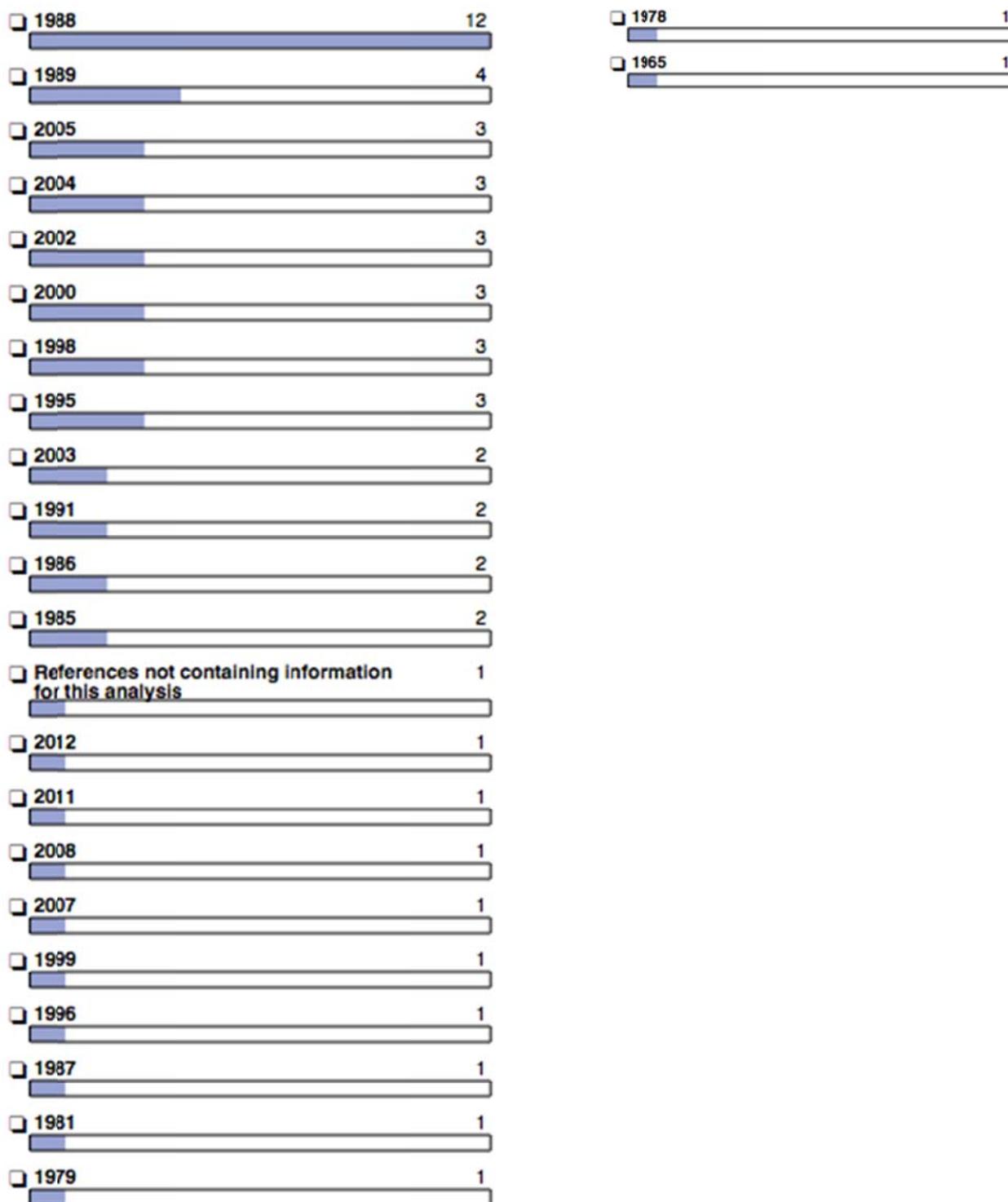
Source : SciFinder

Après avoir été d'actualité à la fin des années '50 et dans les années '60, il semble qu'il y ait eu un regain d'intérêt pour l'extraction du gallium à partir du charbon et de ses cendres en 2008. Ceci est peut-être dû à l'augmentation des besoins en gallium et donc, à la prévision de la nécessité de nouvelles sources de gallium.

Lorsque l'on regarde la nationalité des auteurs et la langue dans laquelle les documents sont rédigés, il est intéressant de constater qu'avant 1990, c'est la Russie qui dominait le sujet, suivie par Pologne.

Les années '90 voient l'apparition des auteurs japonais, mais ce qui est remarquable c'est que trois des quatre documents relevés pour 2008 sont écrits par des Chinois. Cela renforce davantage la preuve de l'implication de la Chine dans le secteur du gallium.

Figure 40 : Nombre de documents relatif à 'gallium recovery from scrap' par année.



Source : SciFinder

La figure 40 montre que la récupération du gallium à partir de restes ou de déchets de production ou post-consommation est un sujet régulièrement traité depuis 1988. Une proportion non négligeable

d'articles ont été produits à partir de 2000 (16 sur 53). Cela correspond au développement plus important de la production secondaire du gallium.

Un quart des articles datent de 1988. Comme déjà mentionné, cette année marque le début du développement plus important des circuits intégrés. Leur production engendre de nombreuses pertes de gallium aux différentes étapes de celle-ci comme expliqué au chapitre 3. Il est donc concevable que plusieurs études aient été réalisées pour les réduire et les valoriser.

Annexes

Annexe 1 – L'enquête: Investigation on the primary and secondary production of gallium & its compounds.

A. You can answer to the three following questions in the summary chart (p3).

1. What is your type of activity (ies) concerning the gallium?
2. Where is the site of the activity?
3. Which market(s) is (are) covered by the activity (European, American, Asian, etc.)?

Note:

If the answer is 'No' but the company has a R&D project on an activity related to gallium, may I ask you to fill the 'comment' column to explain:

- the project
- its objectives in terms of gallium use and/or recycling
- its objectives in terms of environment (limitation of the impacts, of the pollution)

Activity	Yes /No	Comment	Location	Market
Extraction and Primary production				
Refining				
Gallium compounds/alloys production	No			
Materials production using gallium compound/alloy	No			
Gallium recycling from production scrap	Yes			
Gallium recycling from end of life products	No			

B. Depending on your 'Yes' answer, go to the related section:

Activity	Section	Page
Extraction and Primary production	I	5
Refining	II	6
Gallium Compound/alloy production	III	7
Materials production using gallium compound/alloy	IV	8
Gallium recycling from scrap	V	9
Gallium recycling from end of life products	VII	10

I. Extraction and primary production

I.1 Characteristics

1. What are the input (Ex: Bauxite, scrap, tailing...) and the output of the process and the quantity?
2. Which quantity of energy is used to extract ores used for gallium production?
3. Which quantity of energy is used to produce the gallium and its origin (coal, electricity, etc.)?
4. Which process is used to recover gallium?
5. What is the degree of purity of the metal gallium?
6. Which part of the production is sold?
7. Where is it sold (location and name of the buyer) and the percentage by location?
8. What is the production's cost for one kg of gallium?
9. At which price is the gallium sold after the primary production?
10. What is the plant's capacity of production for gallium?
11. What are the critical points of the production process?
12. Is there recycling inside of the production process?

I.2 Environmental aspects

1. Do you have an idea of the CO₂ emission to produce 1kg of gallium?
2. Which emission(s) is (are) generated by the extraction?
3. Which emission(s) is (are) generated by production?
4. Is the extraction field restored at the end?
5. Does the extraction generate an important soil's pollution? If yes, what are the causes?
6. Apart from the emission, is there water pollution? By what and how much?
7. Are there measures to limit the emissions generated by the production? Which ones?
8. Are there measures to limit the water pollution? Which ones?

9. Is the production process acceptable from the environment's point of view or are there other better technologies?
10. Would it be feasible to adapt or to change the process?

II. Gallium Refining

II.1 Characteristics

1. What process is used to refine gallium?
2. What are the input and the output of the process and the quantity?
3. Which purity has the metal gallium in input and in output?
4. Are there losses in gallium and/or in other compound?
5. Are they recycled in the refining process or in another process?
6. Which quantity of energy is used to refine the gallium and its origin (coal, electricity, etc.)?
7. What is the refining's cost for one kg of gallium?
8. What is the refining's capacity?
9. What are the critical points of the refining process?
10. Where is the production sold (location and name of the buyer) and the percentage by location?
11. At which price is the refined gallium (ultra pure gallium) sold?

II.2 Environmental aspects

1. Which emissions are generated during the refining?
2. How are treated some residues (mercury, etc.) classified as dangerous?
3. Apart from emission, is there any other pollution (ex: water)
4. Are there measures to limit the emissions generated by the refining? Which ones?
5. Are there measures to limit the pollution?
6. Are there measures to limit the production of dangerous residues?

7. Is the refining process acceptable from the environment's point of view or are there other better technologies?
8. Would it be feasible to adapt or to change the process?

III. Gallium compound/alloy production

III.1 Characteristics

1. What type(s) of compound/alloy are produced (GaAs, GaN, other)?
2. How is the compound/alloy produced (process and steps)?
3. What are the input and the output of the process and the quantity?
4. Which purity of gallium is required?
5. Are there losses in gallium and/or in other input or material?
6. Are they recycled in the compound/alloy production process or in another process?
7. Which quantity of energy is used to produce the gallium compound and its origin (coal, electricity, etc.)?
8. For which application will the compound/alloy be used?
9. At which price is the compound/alloy sold?
10. To which enterprises is the compound/alloy sold?

III.2 Environmental aspects

1. Which residues are generated and what are the quantities?
2. How are some residues (As,...) classified as dangerous treated?
3. Are any of these residues recycled? If yes, how and how much?
4. Are the losses important?
5. Which emission(s) is (are) generated by the compound/alloy production?
6. Apart from emission, is there any other pollution (ex : water)
7. Are there measures to limit the emissions generated by the refining? Which ones?

8. Are there measures to limit the pollution?
9. Are there measures to limit the production of dangerous residues?
10. Is the process acceptable from the environment's point of view or are there other better technologies?
11. Would it be feasible to adapt or to change the process?

IV. Materials production using Gallium

IV.1 Characteristics

1. What types of materials are produced? (ex : CIGS (PV), LED,...)
2. What is the proportion of gallium in the material?
3. Which compound/alloy is used?

IV.2 Environmental aspects

1. Which quantity of scrap is generated?
2. Which is the proportion of gallium in the scrap?
3. Are the scraps recycled and how?
4. Which types of pollution are generated during the production?
5. Are there any measures to limit the pollution?
6. Is the process acceptable from the environment's point of view or are there other better technologies?
7. Would it be feasible to adapt or to change the process?

V. Gallium recycling from scrap

V.1 Characteristics

1. Is this recycling process integrated in a production process? If yes, which one?
2. What are the main steps of the recycling process?
3. Is this process complex? Why?
4. What are the input and the output of the recycling process and what are the quantities?

5. Which is the purity of the gallium recovered?
6. Where is the gallium then used? In which application?
7. If gallium is sold, at which price is it sold?
8. Is it valuable in comparison with the processing cost?

V.2 Environmental aspects

1. Which types of pollution are generated during the recycling process?
2. Are there measures to limit the pollution?
3. Is the process acceptable from the environment's point of view or are there other better technologies?
4. Would it be feasible to adapt or to change the process?

VI. Gallium recycling from end of life products

VI.1 Characteristics

1. What are the main steps of the recycling process?
2. Is this process complex? Why?
3. Is this process integrated within a recycling process from scrap?
4. What are the input and the output of the recycling process and what are the quantities?
5. Which is the purity of the gallium recovered?
6. Where is the gallium then used? In which application?
7. If gallium is sold, at which price is it sold?
8. Is it valuable in comparison with the processing cost?

VI.2 Environmental aspects

1. Which types of pollution are generated during the recycling process?
2. Are there measures to limit the pollution?

3. Is the process acceptable from the environment point of view or are there other better technologies?

4. Would it be feasible to adapt or to improve the process?

Annexe 2 : Acteurs interrogés et statut sur les réponses.

Société	Activité	Locatioon	Personne de contact	Profil	Statut sur les réponses
UMICORE	Récupération de métaux de base, précieux, spéciaux à partir de différents déchets et produits post-consommation; Ga est récupéré de déchets de production de PV CIGS	Hoboken (BE) Olen (BE) (3 unités dont R & D)	M.. Harald Oosterhof	Project leader Base Metals Hydrometallurgy Umicore Group R & D - Olen	A répondu à l'enquête.
UMICORE		Hanau (DE)	M.. Christian Hagelüken	Director EU Government Affairs	Pas de réponse à l'enquête. A fourni deux documents.
REVATECH SA	Traitement, de recyclage et de valorisation des déchets industriels dangereux et non dangereux.	Engis	Mme Angèle Abouou	Project Manager R & D Departement	Pas de réponse directe à l'enquête. A fourni des infors sur le projet RARETE et sur le Ga dans les PV.
COMET Traitements	Récupération et traitement de déchets divers.	Châtelet	M.. Pierre-François Bareel	Directeur R&D	Pas de réponse directe à l'enquête. A fourni un contact à Ulg pour le projet Phoenix.
Ulg - labo GeMMe (Génie minéral, matériaux et environnement)			M.. Grégory Lewis		A répondu à l'enquête. A fourni des infos sur le projet PHOENIX.
IMEC	Laboratoire mondial de recherche en nano-électronique. Fait le pont entre la recherche fondamentale universitaire et le développement électronique en industrie. A une expertise unique dans le développement de puces.	Leuven	M.. Alain Pardon	Manager Environmental, Safety, and Health (ESH)	A répondu à l'enquête.
5N Plus (a acquis le group MCP SA)	Chef de file dans la production de métaux et produits chimiques spéciaux.	-Stade (DE) (Production Ga 4N) -Wellingborough (GB) & Shenzen (CN) (Raffinage) -Wellingborough GB) & Fairfield (US) (Production de composés GaCl ₃ , Ga(OH) ₃ , Ga ₂ O ₃) -Wellingborough GB) (Recyclage de	M.. Serge Dallenogare	Directeur Général – Tilly	A répondu à l'enquête. A fourni beaucoup d'autres informations.

		déchets de GaAs) -Tilly (BE) (Fabrication produits chimiques)			
PPM Pure Metals (filiale du groupe Recyclex)	Production et raffinage de métaux de haute pureté et production de composés Pour le Ga : Raffinage, production de GaCl ₃ , Ga ₂ O ₃) et recyclage de différents déchets à base de Ga	Langelsheim (DE)	Gunter Daub	R&D Management	Pas de réponse à l'enquête. N'a pas donné d'autres infos que celles présentes sur le site internet.