

Observation du terrain de recherche

Nous présentons dans cette partie, le terrain de recherche sur lequel nous allons déployer notre expérimentation, avec pour objectif de traiter la problématique précédemment définie et finalement apporter une réponse à notre question de recherche.

Ces travaux de thèse de doctorat furent menés au sein du secteur aéronautique, dont nous allons préciser quelques caractéristiques. Celles-ci s'avèrent fondamentales pour appréhender les tenants et aboutissants ainsi que les limites de notre étude.

Plus précisément, nous axons notre recherche sur une activité de traitement de surface qui est soumise à une forte pression réglementaire environnementale : l'Oxydation Anodique Chromique (OAC), que les utilisateurs aéronautiques cherchent majoritairement à substituer. Nous présentons donc dans cette partie le contexte global des activités de traitement de surface et plus précisément celui de l'OAC.

3.1 Caractéristiques du secteur aéronautique

Il semble important de décrire le secteur aéronautique, notamment parce que ses caractéristiques propres peuvent constituer des facteurs influant le développement ou non des politiques environnementales. La prise en compte de ces spécificités est également prépondérante pour la rentabilité de ces dernières.

3.1.1 Généralités

3.1.1.1 Structure du secteur

Le secteur aéronautique fait face à un marché qui peut être qualifié de marché mondial en concentration. Le nombre d'acteurs réellement compétitifs est très faible et plutôt en voie de diminution²³⁸, qu'il s'agisse des firmes capables de concevoir et de réaliser les produits (ici avions de plus de cent places) ou les sous-ensembles de ces produits. (Systèmes de propulsion, équipements, éléments de structure, composants de base, etc.)

Le tissu industriel est vaste et se compose à la fois de PME-PMI et de grands industriels. Les acteurs de l'industrie aéronautique peuvent globalement être classés dans trois grands types d'activité (**Tableau 22**).

²³⁸ MICHOT, Y., Rapport sur l'industrie aéronautique et spatiale française, rapport pour le premier ministre M. Jean Pierre RAFFARIN, 2004.

CHAPITRE 2

	Avionneurs	Motoristes	Equipementiers
Exemples de grands groupes	AIRBUS, Boeing	General Electric, Pratt&Withney, Rolls Royce, Snecma SA	Thales Aerospace, Groupe Safran (Labinal, Messier-dowty, Turbomeca, etc.), Honeywell, Rockwellcollins, etc.
Exemples de produits commercialisés	Cellules d'aéronefs	Moteurs	Avionique, commandes de vol, trains d'atterrissage, système de communication, etc.

Tableau 22 – Exemples d'entreprises du secteur aéronautique

Les avionneurs capables de mettre sur le marché des appareils de plus de cent places ne sont aujourd'hui plus que deux au niveau mondial : AIRBUS et Boeing. Ultra dominateur pendant plusieurs décennies, en terme de ventes (nombre d'avions et chiffre d'affaires), le constructeur américain se voit aujourd'hui contraint à un statu-quo. Il est aujourd'hui difficile de préciser qui d'AIRBUS et de Boeing est aujourd'hui leader. Depuis 2003, AIRBUS est ainsi premier en terme de livraisons (nombre d'avions), cette position étant assurée pour quelque temps puisque l'avionneur européen a enregistré plus de commandes que son rival lors des dernières années. 2005 fut ainsi une année record pour AIRBUS à tous les niveaux (livraisons, commandes, bénéfiques). En revanche, l'année 2006 a vu la tendance s'inverser pour la première fois depuis 2000, Boeing ayant reçu 1044 commandes contre 790 pour l'avionneur européen.

Nous notons quelques caractéristiques du secteur aéronautique civil [Levet 2002] :

- Le produit est complexe et de très haute technologie.
- Le produit est différencié en sous-segments en fonction de la capacité et de la distance franchissable.
- L'industrie aéronautique possède des cycles longs, un programme pouvant durer jusqu'à quarante ans.
- Le produit possède également un cycle long, puisqu'une fois mis en service un aéronef a une durée de vie très longue (estimée à 25-30 ans).
- La structure de coûts des constructeurs de cellules d'aéronefs est particulière, puisque d'une part les coûts unitaires de production sont élevés et que d'autre part, les coûts de développement sont énormes. La rentabilité d'un programme est donc aléatoire et se fait à long terme.
- Les économies d'échelle²³⁹ réalisées sur les coûts de production sont importantes notamment du fait du niveau des coûts fixes (coût de développement), des économies d'envergure (possibilité d'utiliser les résultats de R&D pour différentes familles d'avion) et des économies d'apprentissage (la complexité des opérations rend la fabrication des premières unités très coûteuse).
- La demande d'avions dépend principalement de la demande de trafic aérien, elle-même liée à la croissance économique, aux tarifs pratiqués et au développement des réseaux.
- Les commandes d'aéronefs dépendent également du retrait des appareils arrivés en fin de cycle. Certaines normes environnementales (bruit) peuvent engendrer le retrait d'un grand nombre d'avions ne répondant plus aux normes.

²³⁹ Une économie d'échelle est une réduction du coût moyen de production lorsque les quantités produites augmentent.

Ces paramètres font de la construction aéronautique civile un secteur extrêmement concurrentiel, cette concurrence s'effectuant entre les firmes installées. La concurrence potentielle ne semble pour l'instant pas représenter une réelle menace en raison des barrières à l'entrée et à la sortie qui caractérisent ce secteur²⁴⁰.

Le chiffre d'affaires du secteur a augmenté très fortement au cours des quarante dernières années pour atteindre plus de 140 milliards d'euros de chiffre d'affaires en 2002²³⁸. Ce montant représente plus de 56% de la totalité des activités aéronautiques et spatiales. Cette proportion est encore plus marquée en France. (63%)

Le trafic aérien mondial a cru de 11% par an en moyenne dans les années 70 à 80, puis d'environ 6% par an de 1981 à 2001. Les attentats du 11 septembre 2001, la recrudescence de la crise terroriste, les craintes sanitaires mondiales et les croissances faibles de certaines économies ont récemment fortement impacté le transport aérien.

3.1.1.2 Perspective d'évolution

En ce qui concerne les évolutions, deux programmes symbolisent les enjeux actuels :

D'un côté le programme A380, qui de part son importance (plus de 10 milliards de dollars de Recherche et Développement) est à la fois un risque et une opportunité. Les risques sont bien évidemment d'ordres technique, commercial et donc financier. En cas de succès, l'avantage sur Boeing sera majeur, AIRBUS proposant alors le seul avion de très grande capacité et de très grand rayon d'action (Boeing développe cependant un programme de modernisation de son 747). Aujourd'hui, il est difficile de considérer ce programme comme étant assuré du succès, d'autant plus que les retards accumulés, principalement induits par d'énormes difficultés d'industrialisation, ont plongé l'avionneur européen dans une crise sans précédent. Cette dernière a conduit à une réorganisation profonde de l'entreprise à travers un plan de restructuration baptisé « power 8 ».

De l'autre, le 787 qui viendra concurrencer le haut de la famille des « Single Aisles »²⁴¹ (A321) et par le bas, la famille A330. L'impact peut être important, ces deux familles étant parmi les plus rentables d'AIRBUS. Les effets d'un éventuel succès de cet avion seront éventuellement compensés par le programme A350 développé par l'avionneur européen, mais pour l'instant le programme de Boeing présente tous les paramètres susceptibles d'en faire un succès commercial.

Plus globalement, le secteur aéronautique mondial est en forte croissance.

Le retour de la croissance au niveau mondial, de la confiance des investisseurs ainsi qu'une demande maîtrisée du transport à but touristique ont induit en 2004 un rebond du trafic aérien, plus important que ce qui était attendu. Pour la période 2004-2023, il est prévu que le trafic

²⁴⁰ Importance des coûts de développement, des économies d'échelle et d'apprentissage.

²⁴¹ La famille des « single Aisles » est composée des A318, A319, A320 et A321.

passager mondial augmente de 5,3 % par année. Cette augmentation, à laquelle il faut ajouter l'accroissement du transport de fret, conjuguée au renouvellement de la flotte requerra la construction de plus de 17000 nouveaux avions sur cette période²⁴². Ceci représente une délivrance moyenne de 850 avions annuellement. Le chiffre d'affaires accessible aux industriels français ne devrait donc pas croître énormément sur les 20 ans à venir.

Il est à noter que même si l'augmentation du prix du carburant entraîne un effet négatif (pas encore bien chiffré) sur la demande en terme de billets d'avion, celle-ci confère aux nouveaux avions une rentabilité bien supérieure aux anciens et accélère ainsi le renouvellement de la flotte mondiale²⁴³.

La concurrence sera en outre de plus en plus sévère. Elle s'exercera sans doute uniquement sur les firmes installées. Il est en effet peu probable qu'un nouvel acteur émerge dans ce secteur lors des deux décennies à venir. Les coûts de développement d'un avion étant, comme nous l'avons déjà vu, très élevés, le démarrage en production de nouveaux produits entraîne des besoins financiers importants. Il est à noter que les coûts de production, qui ne peuvent décroître que progressivement au début d'une série, restent, pendant un certain temps, supérieurs aux prix de vente qui sont les prix du marché.

La monnaie de référence du secteur est le dollar. Les politiques de couvertures de change sont donc une nécessité et le risque majeur que courent les avionneurs (AIRBUS notamment) est la conjugaison d'un point bas de cycle en terme de livraisons d'avions, de forts investissements matériels ou immatériels et de parité défavorable euro/dollar²⁴³. Il est en outre très probable qu'AIRBUS accentue dans le futur sa politique de sous-traitance, notamment dans des pays où les matières premières s'achètent en dollars.

3.1.2 Transport aérien et environnement

3.1.2.1 Le produit

Le poids donné à la prise en compte de l'environnement par les constructeurs aéronautiques (avionneurs, motoristes et équipementiers) ne cesse de croître depuis plus d'une quarantaine d'années. La journée de l'aviation civile internationale, célébrée tous les ans en décembre pour commémorer la création de l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI), avait d'ailleurs en 2005 pour thème la prise en compte de l'environnement.

L'OACI a adopté en 2004 trois grands objectifs environnementaux²⁴⁴ :

- Limiter ou réduire le nombre de personnes exposées à un niveau élevé de bruit des aéronefs.

²⁴² AIRBUS Global Market Forecast, 2005, Source <http://www.airbus.com>.

²⁴³ MICHOT, Y., Rapport sur l'industrie aéronautique et spatiale française, Op. Cit.

²⁴⁴ KOTAITE, A., Message du président du conseil de l'OACI, OACI, 2005.

- Limiter ou réduire l'incidence des émissions de l'aviation sur la qualité de l'air à l'échelon local.
- Limiter ou réduire l'incidence des émissions de gaz à effet de serre de l'aviation sur le climat mondial.

Ces objectifs résultent de ce qui est considéré comme étant le groupe des impacts environnementaux majeurs liés au produit avion.

Une stratégie ambitieuse a en outre été définie au niveau européen, par le conseil ACARE (Advisory Council for Aeronautics Research in Europe) : des objectifs de réductions de 50% et de 80% des émissions de CO₂ et de NO_x et de 50% du bruit perçu ont été fixés pour 2020 [ACARE, 2004].

Le bruit des avions est souvent ressenti comme étant la première nuisance causée par le trafic aérien. Ceci est particulièrement vrai en Europe où les aéroports sont généralement situés près de zones habitées. L'énergie sonore émise par un avion provient en premier lieu du moteur. D'importants efforts ont été faits, et continuent à être réalisés : en trente ans, le bruit des aéronefs a été réduit de 20 décibels. Le bruit aérodynamique de l'avion constitue l'autre source de nuisances sonores (cellule et train d'atterrissage).

La réglementation provient principalement des recommandations émises par l'OACI, reprises ensuite par les autorités de certification des différents pays : la FAA (Federal Aviation Administration) aux Etats-Unis et la JAA (Joint Aviation Authorities) en Europe. Il est tout de même à noter que des divergences « transatlantiques » importantes existent.

L'aéroport de Londres Heathrow est l'un des plus stricts au monde en matière de réglementation sur le bruit.

En ce qui concerne le changement climatique, les avions subsoniques, qui volent à des altitudes élevées (entre 9000 et 12000 m) et émettent par leur fonctionnement des gaz et particules, peuvent avoir un impact sur l'atmosphère. Les effluents majoritaires sont le dioxyde de carbone (CO₂) et la vapeur d'eau (H₂O). Ceux-ci contribuent à l'effet de serre, et ils sont émis en quantité proportionnelle à la consommation de carburant.

Il n'y a aujourd'hui pas de réglementation particulière visant les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) des aéronefs, mais une inclusion des émissions de CO₂ dans le système d'échange européen de quotas d'émission de gaz à effet de serre²⁴⁵, dès la période [2008-2012] est possible.

Les autres substances émises par les aéronefs (combustion) sont le monoxyde de carbone (CO), le carbone (C), les hydrocarbures imbrûlés (HC), le dioxyde de soufre (SO₂) et les oxydes d'azote (NO_x). Ces derniers font l'objet de nombreuses études, les effets des oxydes d'azote étant d'une part de contribuer à l'effet de serre, lorsqu'ils sont rejetés dans la partie basse de l'atmosphère, la troposphère, et d'autre part à l'appauvrissement de la couche d'ozone lorsqu'ils sont rejetés en altitude, dans la troposphère. Il semble cependant que les

²⁴⁵ Directive 2003/87/CE établissant un système d'échange de quotas de gaz à effet de serre dans la communauté.

répercussions des rejets émis au cours des vols subsoniques aient de faibles répercussions sur l'atmosphère²⁴⁶.

Hormis le bruit et les émissions des moteurs, un avion peut exercer des dommages sur l'environnement à travers les matériaux et produits utilisés pour sa construction. Cet aspect environnemental du produit avion constitue désormais un enjeu majeur : un produit qui fait l'objet de restriction, voire même d'interdiction, au niveau réglementaire du fait de sa dangerosité pour l'environnement ou pour la santé humaine, doit ou devra être substitué, des recherches devant alors être menées.

Les problèmes environnementaux peuvent également se poser au niveau de la maintenance des avions, les compagnies aériennes pouvant être amenées à utiliser des produits pour l'entretien des aéronefs (ces produits sont spécifiés dans les guides d'entretien établis par les constructeurs). Les compagnies peuvent exiger, du fait de la croissance des réglementations environnementales, la possibilité de recourir à des produits qui minimisent les impacts sur l'environnement.

3.1.2.2 Les sites de production

La construction d'avions, comme toute activité industrielle, génère des pollutions qui doivent être traitées ou prévenues. Ces dommages sur l'environnement proviennent principalement des matériaux utilisés et de leur processus de transformation [Levet, 2002].

Les principaux impacts environnementaux du secteur de la construction aéronautique sont les rejets atmosphériques, les rejets aqueux et la production de déchets.

Les sites de production sont soumis aux mêmes réglementations que tous sites industriels. Les lois-cadres, définies pour les grands domaines de l'environnement (eau, air, déchets, risques technologiques, etc.) leur sont donc applicables. Ils sont également soumis à la correction des externalités négatives qu'ils entraînent par l'application d'instruments réglementaires (normes d'émissions, de procédés, etc.) et économiques (taxes et redevances, permis d'émissions, etc.).

Les rejets atmosphériques issus de la construction d'aéronefs sont divers (COV, CO₂) et principalement issus des activités de peintures et de traitement de surface. Les émissions atmosphériques les plus importantes sont celles des COV. Ceux-ci favorisent en outre la création d'ozone troposphérique, dangereux pour la santé des populations et favorisant l'effet de serre. Les rejets de COV sont réglementés en Europe par la directive 99/13/CE.

Les rejets dans l'air sont principalement régis en France par la loi sur l'air (n°96-1236) de 1996 ainsi que par la loi n°76-663 de 1976 relative aux Installations Classées pour la Protection de l'Environnement. Le secteur de la construction aéronautique est également soumis à la taxe parafiscale sur les pollutions de l'air, intégrée aujourd'hui à la TGAP (COV, NO_x, SO₂ pour le secteur en question).

²⁴⁶ Chanin, M.L., Impact de la flotte aérienne sur l'environnement atmosphérique et le climat, Académie des sciences, Rapports n°40 (en collaboration avec l'Académie nationale de l'air et de l'espace), 1998.

Enfin les sites sont soumis au système d'échange européen de quotas d'émissions de gaz à effet de serre (qui ne concerne que le CO₂ aujourd'hui) au titre de leurs installations de combustion d'une puissance supérieure à 20 MW.

Différentes étapes de la fabrication d'un avion provoquent des rejets aqueux (mise en forme des matériaux, usinage chimique, traitement de surface, peinture, dégraissage). Les rejets sont principalement constitués de métaux lourds (chrome, cadmium, nickel, etc.), d'huiles, de solvants, de Matières En Suspension, etc.

En France, les industriels doivent en plus des spécificités locales (qui doivent transparaître dans les arrêtés préfectoraux d'exploitation) respecter les dispositions de la loi sur l'eau de 1992, en plus de celles inscrites dans celle de 1976 sur les installations classées. Des réglementations peuvent également s'appliquer spécifiquement à certaines activités industrielles (traitement de surface par exemple).

Les déchets générés par la construction aéronautique sont constitués de déchets dangereux (boues, solvants usagés, déchets de matériaux, etc.) et banals (copeaux, carton, plastique, etc.).

En France, la loi (n°75-633) de 1975 régit la notion de déchet et les responsabilités de leur élimination. La gestion des déchets dangereux est réglementée par de nombreuses dispositions légales.

3.1.2.3 L'impact de l'environnement sur la compétitivité

Dans ce contexte, il est intéressant de considérer l'impact des mesures environnementales adoptées par les constructeurs aéronautiques et plus précisément de se demander si le facteur environnement peut influencer sur la compétitivité des firmes.

Cette relation compétitivité - environnement doit bien entendu prendre en compte les facteurs structurels (du marché notamment) présentés précédemment. Le prix d'acquisition d'un appareil est ainsi, loin d'être le seul paramètre pris en compte par les compagnies lors de l'achat d'un appareil et les performances techniques et économiques (distance franchissable, capacité, dépense d'exploitation) sont par exemple, extrêmement importantes.

L'analyse de Levet [Levet, 2002] met en avant le fait que l'effort financier réalisé par les constructeurs pour respecter les exigences réglementaires au niveau des sites de production est relativement faible comparé aux investissements totaux ou au chiffre d'affaires. Ce montant est également faible en comparaison de ce que supportent certaines autres industries. La principale explication est l'impact limité qu'exercent les sites de productions aéronautiques sur l'environnement comparé à d'autres industries (chimie, énergie, pâtes et papier, etc.).

Dans cette analyse, les bénéfices potentiels induits par l'adoption de mesures environnementales sur les sites de production sont également mis en avant, même si aucune quantification n'est apportée. Des gains de productivité découlant de l'adoption de nouveaux procédés mis en oeuvre pour répondre à des exigences environnementales, des économies

liées à des diminutions des consommations (eau, énergie, matières premières) et des déchets sont notamment cités.

Il ressort donc que globalement, les coûts environnementaux supportés au niveau des sites de production ont un impact relativement faible sur les coûts de vente des avions. La concurrence environnementale s'effectue donc majoritairement, pour un constructeur aéronautique, au niveau des paramètres pris en compte lors de l'acquisition de l'appareil.

L'un des points principaux qui est la consommation de carburant est déjà totalement intégré aux stratégies des constructeurs puisqu'il constitue aujourd'hui un facteur influençant directement les coûts d'exploitation.

D'autres caractéristiques environnementales liées au produit peuvent constituer des facteurs de compétitivité. Ainsi, la capacité des appareils à respecter des normes environnementales futures peut engendrer un avantage sur le marché. Dans cette optique, le bruit des avions, les émissions (principalement lors des phases de décollage et d'atterrissage souvent proches de zones urbaines), ainsi que les produits dangereux contenus dans l'appareil sont les paramètres majeurs à prendre en compte.

Les conclusions de la revue des impacts potentiels de l'environnement sur la compétitivité dans le secteur aéronautique civil, effectuée par Levet [Levet, 2002], sont les suivantes :

- Les mesures environnementales prises au niveau des sites de production n'ont pas d'impact négatif sur la compétitivité-prix des constructeurs, ces derniers ayant même intérêt à mettre en place une politique active en matière d'environnement, afin de tirer parti des bénéfices pouvant être engendrés.
- Les dépenses effectuées au niveau du produit peuvent conférer à l'environnement un caractère compétitif stratégique, notamment lorsqu'il s'agit du respect de normes pouvant être amenées à devenir plus rigoureuses.
- Il reste que les dépenses de R&D en matière d'environnement, même si leurs niveaux peuvent être élevés, n'ont jusqu'à présent pas entravé la compétitivité des constructeurs aéronautiques.

3.2 Le traitement de surface et le procédé d'Oxydation Anodique Chromique

Nous resserrons la présentation de notre terrain de recherche, sur l'activité menée au sein du secteur de la construction aéronautique, que nous allons plus précisément considérer dans notre expérimentation.

3.2.1 Le traitement de surface

3.2.1.1 Les activités

Les caractéristiques que possède la surface d'un matériau, qu'elles soient physiques, chimiques ou électriques, peuvent être modifiées par une opération : le traitement de surface (SATS²⁴⁷), (Pignet, 1990²⁴⁸). Cette opération, qui peut être mécanique, chimique, électrolytique ou physique, a pour but de modifier la surface d'une pièce afin de lui conférer de nouvelles propriétés : résistance à la corrosion ou à l'usure, modification de l'aspect dans un but décoratif, etc. [Laforest, 1999].

Les propriétés recherchées pour les surfaces traitées sont principalement la protection contre la corrosion (45%) et contre l'usure (24%), l'aspect (11%), la conductibilité (8%), la réduction des frottements (8%), etc. [Laforest, 1999].

Les activités de traitement de surface sont, soit des ateliers intégrés à des unités de production, soit des ateliers indépendants travaillant en sous-traitance. Le secteur des traitements et revêtements des métaux (référence 28.5 A dans la nomenclature des activités françaises) comptait en 2003, 2018 entreprises représentant environ 28000 salariés²⁴⁹.

Le tableau suivant répertorie les cinq grandes familles de traitements de surface qui peuvent être distinguées (**Tableau 23**).

Familles	Techniques	Exemples
Revêtement métallique	Traitement par voie aqueuse	Dépôt électrolytique, Dépôt chimique
	Traitement par voie sèche	Projection thermique, Phase vapeur
Traitement de conversion	Electrolytique	Anodisation, Sulfuration
	Chimique	Phosphatation, Chromatation
Peintures		
Traitements thermochimiques		Cémentation, Chromisation
Traitements mécaniques		Grenailage, Galetage

Adapté de [Laforest, 1999] et [Brilaud, 2005]

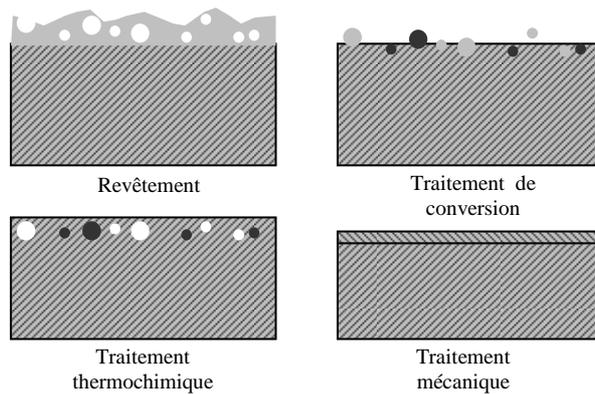
Tableau 23 – Familles de traitements de surface

Lors d'un traitement de revêtement, le matériau d'apport ne réagit pas ou peu avec le substrat, tandis que lors d'un traitement par conversion chimique, le matériau d'apport réagit superficiellement avec celui-ci. Lors d'un traitement thermochimique, le matériau d'apport diffuse dans le substrat et lors d'un traitement mécanique, la structure métallurgique superficielle est modifiée. Ces points sont illustrés dans le schéma suivant (**Figure 31**):

²⁴⁷ SATS Syndicat National des Entreprises d'Applications de Revêtements et Traitement de Surface, Rapport Les actions - Les métiers, non daté.

²⁴⁸ Pignet, C., Pelouin, C., Etat de la technique dans l'industrie du traitement de surface dans le bassin Rhin-Meuse, Synthèse bibliographique, Agence de l'eau Rhin Meuse, 47p, 1990.

²⁴⁹ Source : <http://www.industrie.gouv.fr/sessi/>



Adapté de [Laforest, 1999] et [Brilaud, 2005]

Figure 31 – Les procédés de TS

Dans la suite de cette partie nous nous concentrons sur les ateliers de traitement de surface mettant en œuvre des traitements par voie aqueuse qu'ils soient de revêtement ou de conversion.

Un atelier de traitement de surface est composé d'une suite de cuves formant une chaîne de production. Les cuves sont utilisées à des fins de traitement ou à des fins de rinçage et les pièces y sont successivement trempées. L'enchaînement nécessaire au traitement complet d'une pièce constitue une gamme de production.

Le passage d'un bain à un autre s'effectue à l'aide de différents systèmes de manipulation (barres, tonneaux ou paniers) dont le choix dépend de la taille et de la fragilité des pièces à traiter. Ces systèmes sont soit manipulés manuellement, soit par guidage automatique.

La transformation complète d'une pièce nécessite généralement l'utilisation de plusieurs types de bains de traitements. Il convient de distinguer les opérations de « nettoyage », visant à éliminer des éléments spécifiques, de celles qui en ajoutent, par dépôt ou conversion et qui sont généralement précédées des premières.

3.2.1.2 Enjeux sanitaires et environnementaux des traitements de surface

Les points suivants constituent les enjeux environnementaux majeurs des activités de traitement de surface [EC BREF, 2005] :

- Les traitements de surface sont traditionnellement associés à une utilisation importante de ressources en eau.
- Les composés chimiques utilisés présentent des dangers pour l'environnement, plus particulièrement pour les eaux de surface et souterraines, ainsi que pour le sol.
- Les métaux issus des effluents liquides constituent en bout de chaîne des déchets solides qui, tout comme certaines solutions usées, doivent être traités par l'intermédiaire de procédés spéciaux de récupération ou d'élimination.

- Cette industrie peut rejeter des vapeurs, des poussières et des polluants (atelier et atmosphère).
- Le secteur est également un consommateur important d'électricité et de ressources non renouvelables (métaux).

Les composés chimiques présentant des dangers pour l'environnement, ne doivent pas être dissociés de leurs aspects sanitaires lors d'une évaluation. Il est en outre clair que dangerosité pour l'environnement et pour l'homme sont intimement liés.

Finalement la recherche des objectifs suivants est cruciale dans le secteur du traitement de surface :

- Minimisation des consommations en matières premières, en énergie et en eau.
- Minimisation des émissions par le management des procédés et le contrôle des pollutions.
- Minimisation de la production de déchets.
- Amélioration de la sécurité en relation avec l'utilisation des produits chimiques et réduction des accidents environnementaux.

3.2.1.3 Les réglementations environnementales des traitements de surface

Nous ne nous y attardons pas pour le moment, mais il faut garder à l'esprit que les réglementations liées aux substances dangereuses peuvent engendrer des contraintes importantes sur les activités de traitement de surface, ces dernières utilisant souvent des produits considérés comme tels.

Les dispositions réglementaires sur l'étiquetage des produits et préparations, sur la transmission aux utilisateurs des renseignements nécessaires à la prévention et à la sécurité et sur le marquage des cuves de traitement de surface sont par exemple très importantes.

La réglementation REACH²⁵⁰ (Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals) est également d'une importance considérable pour la mise sur le marché et les modes d'utilisation des substances chimiques. L'impact de cette réglementation sur un secteur tel que celui des traitements de surface est donc non négligeable.

Enfin, nous précisons que dans le cadre sanitaire, des valeurs maximales admissibles peuvent exister pour la concentration de certaines substances dans l'atmosphère de travail²⁵¹.

Nous notons également, qu'un grand nombre de réglementations environnementales applicables à tout site industriel ont une influence sur les activités de traitement de surface.

Même si nous ne la présentons pas ici spécifiquement, il est nécessaire de garder à l'esprit que la réglementation européenne peut avoir un impact sur la réglementation environnementale applicable à une usine de traitement de surface²⁵².

²⁵⁰ Regulation EC 1907/2006 of the European Parliament and of the council of 18th December 2006 concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH).

²⁵¹ Il s'agit en France des VLE (Valeur Limite d'Emission) et VME (Valeur Moyenne d'Emission).

Au niveau national, deux principales réglementations, non spécifiques au secteur du traitement de surface, ont un impact sur ces activités. Il s'agit de la réglementation sur les Installations Classées pour la Protection de l'Environnement²⁵³ (ICPE) d'une part et de l'arrêté « SEVESO » du 10 mai 2000²⁵⁴ d'autre part. La nomenclature des installations classées, prévue par l'article L. 511-2 du code de l'environnement (fixée par le décret du 20 mai 1953) et modifiée par le décret n°2006-1454 du 24 novembre 2006 est également fondamentale.

Pour rappel, les Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (en abrégé « ICPE ») sont les usines, ateliers, et d'une manière plus générale les installations qui peuvent présenter des dangers ou des inconvénients pour l'environnement. Le contrôle et la surveillance des ICPE sont exercés, sous l'autorité du préfet, par les inspecteurs des installations classées rattachés à la DRIRE (Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement).

L'arrêté du 10 mai 2000, relatif à la prévention des accidents majeurs impliquant des substances ou préparations dangereuses présentes dans certaines catégories d'installations classées, vient en complément de la législation sur les ICPE. Une entreprise sera assujettie aux dispositions SEVESO si elle atteint les seuils de l'une des rubriques visées par l'annexe I de l'arrêté.

Pour plus de précisions concernant l'impact de l'arrêté du 10 mai 2000 sur les potentielles classifications SEVESO des ateliers de traitement de surface, il est conseillé de se reporter au document « *Guide de classement dans la nomenclature des installations classées, FIM, GIFAS, INERIS, SATS 2005* » [FIM ; GIFAS, 2005].

Nous dressons ici une liste non exhaustive des réglementations environnementales non spécifiques aux activités de traitements de surface, mais qui peuvent les impacter :

- Le code de l'environnement (articles L511-1 et suivants codifiant la loi ICPE de 1976 et son décret de 1977).
- Le décret du 20 mai 1953 sur la nomenclature des installations classées, modifié par le décret n°2006-1454 du 24 novembre 2006.
- La loi du 15 juillet 1975 modifiée le 13 juillet 1992 sur l'élimination des déchets et la récupération des matériaux.
- L'arrêté du 18 février 1994 relatif au stockage de certains déchets industriels spéciaux.
- L'arrêté du 2 février 1998 sur les prélèvements et la consommation d'eau ainsi que les émissions de toute nature des installations classées soumises à autorisation. Cet arrêté est appelé « arrêté intégré » car il tente d'intégrer tous les impacts environnementaux d'une installation soumise à autorisation (air, eau, bruit, déchets, sols).

²⁵² Nous citons par exemple la directive 76/464/CE de 1976, sur la pollution causée par certaines substances dangereuses, qui s'applique au secteur des traitements de surface, puisque des composés, tels les métaux et le cyanure pouvant y être utilisés, sont visés. Une directive de 1983 (directive 83/513/CE) fixe quant à elle les valeurs limites pour les rejets de cadmium provenant des industries ainsi que des objectifs de qualité du milieu aquatique récepteur.

²⁵³ Loi du 19 juillet 1976 et son arrêté d'application du 21 septembre 1977.

²⁵⁴ Application de la directive 96/82/CE concernant la maîtrise des dangers liés aux accidents majeurs impliquant des substances dangereuses, dite Seveso II, modifiée par la directive n°2003/105/CE du 16 décembre 2003.

- L'arrêté du 23 janvier 1997 relatif à la limitation des bruits émis dans l'environnement par les installations classées et, le cas échéant, selon la nature et l'importance de l'activité.
- L'arrêté du 28 janvier 1993 concernant la protection contre la foudre de certaines installations classées.
- L'arrêté « Seveso » du 10 mai 2000 relatif à la prévention des accidents majeurs impliquant des substances ou préparations dangereuses présentes dans certaines catégories d'installations classées.

Enfin, il existe en France, une réglementation spécifique aux activités de traitements de surface : l'arrêté du 26 septembre 1985 modifié (1990 et 2006).

Cet arrêté fixe le cadre réglementaire applicable au secteur du traitement de surface : les ateliers soumis à autorisation, mettant en œuvre des traitements et revêtements électrolytiques et chimiques, des traitements thermiques en bain de sel fondu et des bains de décapage, dégraissage et de préparation de surface sont concernés. L'objectif de cette réglementation est de limiter les pollutions, nuisances et risques liés à l'exploitation de ces installations en définissant un certain nombre de dispositions techniques et administratives à respecter.

Différents points sont abordés dans cet arrêté :

- La prévention de la pollution des eaux.
- La prévention de la pollution atmosphérique.
- La gestion des déchets.
- La gestion des pollutions accidentelles.
- La surveillance des rejets industriels.

En ce qui concerne la prévention de la pollution des eaux, en plus des modes de rejets possibles (passage par une station de traitement appropriée, rejets en eaux superficielles, interdiction du rejet en eau souterraine, etc.), des paramètres de rejets en sortie de l'installation sont définis :

- Les valeurs limites des teneurs en polluants dans les effluents doivent être respectés (**Tableau 24**).
- Le pH doit être compris entre 6,5 et 9.
- La température des rejets doit être inférieure à 30°C.
- Les rejets de cadmium sont en plus limités en terme de flux : 0,3 g de cadmium par kilogramme de cadmium utilisé.
- Le débit des effluents rejetés est également limité à 8 litres par m² de surface traitée et par fonction de rinçage (une fonction de rinçage étant l'ensemble des rinçages associés à un bain de traitement

La prévention de la pollution atmosphérique s'intéresse aux systèmes de captation des émissions au-dessus des baignoires et définit des valeurs limites de rejets (Tableau 24).

L'arrêté définit également des prescriptions en terme d'autocontrôle et impose à l'exploitant de s'assurer de la bonne élimination de tous les déchets de l'atelier y compris des résidus de traitement.

Il est finalement à noter que cet arrêté a été renforcé par une circulaire du 10 janvier 2000 (relative aux Installations Classées pour la Protection de l'Environnement : industrie de traitement de surface, rubrique n°2565), qui décrit les modalités de l'arrêté en distinguant les installations existantes des installations nouvelles et des modifications des installations existantes.

Type de rejet	Paramètre	Valeur limite	Unité
Aqueux	Cr VI	0,1	mg/L
	Cr III	3	
	Cd	0,2	
	Ni	5,0	
	(...)	(...)	
	Sn	2,0	
	Somme des métaux	15	
	MES	30,0	
	CN	0,1	
	F	15,0	
Atmosphérique	Nitrites	1,0	g/m ³
	(...)	(...)	
	Hydrocarbures totaux	5,0	
	Acidité totale exprimée en H ⁺	0,5	
	Cr total	5	
	Dont Cr(VI) (pour les ateliers de plus de 50 m ³ de baignoires)	0,1	
	CN	1	
Alcalins exprimés en OH ⁻	10		
NOX exprimés en NO ₂	100		

Tableau 24 – Valeurs limites des rejets aqueux et atmosphériques définis dans l'arrêté du 26 septembre 1985

Nous ne les précisons pas ici, mais il est à noter que des valeurs équivalentes, définies spécifiquement pour les activités de traitement de surface ou non, existent dans les différents pays européens²⁵⁵.

Il convient également de noter que les entreprises de traitement de surface peuvent être amenées à constituer des garanties financières (en cas de dommage).

3.2.2 Le procédé OAC (Oxydation Anodique Chromique)

3.2.2.1 L'Oxydation Anodique Chromique de l'aluminium, généralités

L'anodisation de l'aluminium et de ses alliages est un procédé très ancien. L'anodisation chromique fut développée par Benough et Stuart en 1923, postérieurement à l'anodisation sulfurique [Safrany, 1990].

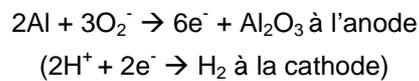
²⁵⁵ En ce qui concerne les rejets aqueux, ces valeurs sont définies par l'annexe 40 du « WasserHaushaltsGesetz (WHG) » (WHG – 23 septembre 1986) en Allemagne ; par l'arrêté du gouvernement Wallon du 16 janvier 2003 portant condition sectorielle relative à la mécanique, transformation à froid et traitement de surface en Belgique ; par les recommandations CUWVO de 1996 aux Pays-Bas, par l'arrêté n°152 du 11 mai 1999 en Italie et par l'ordonnance du 1er juillet 1997 sur la protection des eaux contre les liquides pouvant polluer en Suisse.

La protection de l'aluminium se fait par l'intermédiaire de son oxyde : une couche mince d'oxyde naturel (2 à 4 nm) permet une bonne tenue à la corrosion du métal. Cet oxyde se forme naturellement au contact de l'atmosphère mais peut être renforcé industriellement. Le métal précédemment transformé par diverses opérations nécessite une préparation destinée à en éliminer les impuretés et oxydes gênants (dégraissage, décapage).

Le mécanisme de formation des couches anodiques est alors le suivant :

Un courant est appliqué par l'intermédiaire d'une solution aqueuse acide et des gaz se forment à chacune des électrodes : de l'oxygène sur la pièce d'aluminium chargée positivement (anode) et de l'hydrogène sur les parois de la cuve chargées négativement (cathode). L'oxygène est cependant consommé par l'aluminium.

Une couche anodique se produit alors par combinaison entre l'aluminium dissout et l'oxygène :



Cette description n'est bien évidemment que partielle puisque des différences fondamentales de comportement sont observées lorsque l'électrolyte (la solution composant le bain) et les conditions opératoires sont modifiées [Safrany, 1990].

Dans le cas de l'Oxydation Anodique Chromique, l'électrolyte (la solution d'acide chromique²⁵⁶) possède une action dissolvante sur le métal et l'évolution de la couche anodique relève d'une compétition entre l'élaboration de l'oxyde sous l'action du courant électrique d'une part et la dissolution chimique de la couche d'autre part.

Dans ce type de procédé, caractérisé d'anodisation de type poreux, la couche obtenue est composée d'une partie barrière qui fait interface avec le métal et d'une partie poreuse. L'anodisation chromique fut développée parallèlement à l'anodisation sulfurique car les couches obtenues, tout en permettant la protection contre la corrosion du métal, possèdent des propriétés spécifiques [Safrany, 1990] :

- Leur épaisseur est moindre que les couches sulfuriques (minimisation des problèmes de tolérance sur les côtes).
- Leur incidence sur les caractéristiques mécaniques de la pièce traitée est moindre.
- Leur coefficient de frottement est meilleur ; en revanche leur résistance à l'abrasion est moindre.
- L'accrochage de revêtements organiques est possible (peintures et colles).

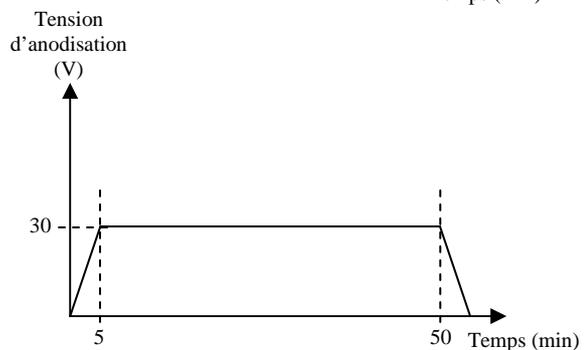
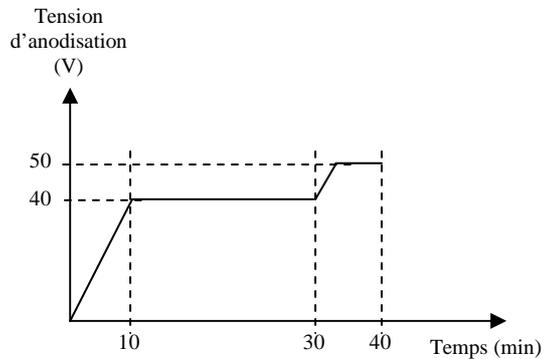
²⁵⁶ L'acide chromique composant le bain est obtenu en ajoutant dans l'eau de l'anhydride chromique (CrO₃). L'Anhydride chromique, également appelé trioxyde de chrome ou oxyde de chrome VI est un composé chromé hexavalent.

Les principales applications industrielles de l'Oxydation Anodique Chromique utilisent des paramètres dont les valeurs usuelles sont détaillées dans le tableau et les schémas qui suivent (Tableau 25 & Figure 32) :

Concentration du bain	Entre 30 et 50 g/L d'anhydride chromique (CrO ₃)
Température du bain	De 40 à 50 °C
Tension	Différents cycles possibles Tension autour de 40V
Epaisseur des couches obtenues	De 2 à 7 µm
Domaine de densité de courant	De 55 à 100 A/m ²

Adapté de [Safrany, 1990] & [Pegman et al, 1992]

Tableau 25 – Caractéristiques générales des procédés OAC



Adapté de [Safrany 1990]

Figure 32 – Exemples de cycles d'anodisation

Le procédé d'OAC est le plus souvent utilisé pour des alliages à hautes caractéristiques mécaniques.

L'oxydation anodique pour ces applications peut être colmatée, ce qui lui confère une bonne tenue à la corrosion ; cependant cela le fragilise en cas d'application d'une peinture. Lorsque le métal anodisé est susceptible d'être peint ou collé, le colmatage n'a pas lieu ou alors de manière réduite (semi-colmatage) afin d'obtenir un compromis entre protection contre la corrosion et adhérence. Le colmatage est, d'une manière générale, réalisé à l'eau bouillante, du bichromate de potassium pouvant éventuellement y être ajouté.

De ces informations peut être déduite une gamme type des opérations à effectuer dans une ligne de traitement de surface mettant en œuvre un procédé d'Oxydation Anodique Chromique. Cette gamme d'opérations mettra forcément en jeu les types d'opérations suivantes :

- Préparation de surface
- Anodisation
- Traitements consécutifs à l'anodisation

Le schéma suivant présente une gamme type d'Oxydation Anodique Chromique (Figure 33) :

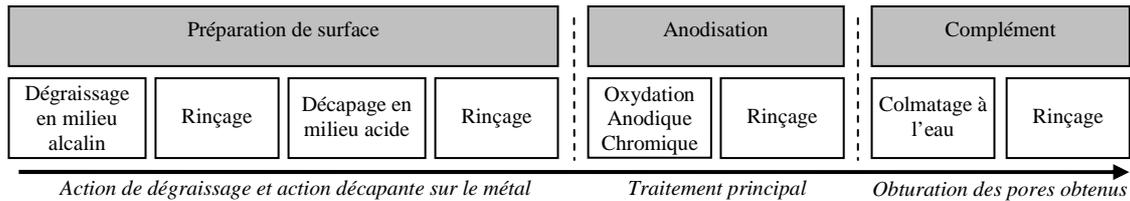


Figure 33 – Gammes types d’anodisation

Le contrôle de la qualité des bains est primordial. En plus de l’acidité du bain, il convient de mesurer d’autres paramètres. Ainsi, les ions chlorures sont à proscrire pour l’ensemble des procédés d’anodisation car ils sont susceptibles de générer des phénomènes de corrosion pendant le traitement lui-même. Les ions sulfates doivent également être contrôlés car leur influence est néfaste sur la durée de vie d’un bain.

Les contrôles sur pièces ont pour but de vérifier la présence effective d’une couche d’oxyde d’aluminium et la conformité de son épaisseur. Ce contrôle peut se faire visuellement par l’observation de la couleur ou par l’intermédiaire d’un ohmmètre.

3.2.2.2 Le procédé OAC et la réglementation environnementale

En ce qui concerne les réglementations spécifiques au secteur des traitements de surface, les procédés d’Oxydation Anodique Chromique et les chaînes d’opérations auxquels ils sont intégrés sont, comme nous l’avons déjà vu, soumis à l’arrêté du 26 septembre 1985.

Nous ne revenons pas sur les dispositions et obligations globales imposées par cette réglementation, mais nous précisons tout de même les points spécifiquement en relation avec l’utilisation de chrome hexavalent²⁵⁷.

Ainsi, si l’entreprise rejette des effluents aqueux après traitement, leurs concentrations en Cr(VI)²⁵⁸ et Cr(III)²⁵⁹, doivent respectivement être inférieures à 0,1 et 3 mg/L, sachant que la dilution des rejets est limitée par la valeur de débit maximale fixée pour ceux-ci à 8 L/m² traité. Enfin, en ce qui concerne les émissions atmosphériques, les valeurs limites de rejets à l’atmosphère (mesurées à la cheminée) sont de 0,1 g/m³ de Cr(VI) et 5 g/m³ de Cr total.

L’utilisation de chrome hexavalent dans un procédé industriel entraîne également des contraintes réglementaires plus générales.

En premier lieu, la prévention des maladies d’origine professionnelle demande que l’exposition des personnes aux polluants présents dans l’air des lieux de travail soit évitée ou réduite aux niveaux les plus faibles possibles. C’est pourquoi l’exposition des travailleurs, et à travers cela

²⁵⁷ Les formes les plus communes du chrome sont celles présentes sous les états d’oxydation +3 et +6, nommés chromes trivalents et hexavalents. Ainsi, même si le chrome peut présenter 8 états d’oxydation [-2, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6], seules les 3 espèces chimiques les plus fréquemment rencontrées en milieu industriel sont généralement prises en considération : le chrome élémentaire (Cr⁰), les cations trivalent (Cr³⁺) et hexavalent (Cr⁶⁺) [FIM ; GIFAS, 2005].

²⁵⁸ Les composés chromés hexavalents peuvent être notés Cr(VI).

²⁵⁹ Les composés chromés trivalents peuvent être notés Cr(III).

les risques toxiques, sont réglementés par le code du travail qui définit des valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) qui tiennent lieu de niveaux à ne pas dépasser. Ces valeurs peuvent être soit des valeurs limites admises (VL) à caractère incitatif dans le cas général, soit des valeurs limites réglementaires (VR), indicatives (VRI) ou contraignantes pour certains composés (VRC)²⁶⁰.

Deux types de valeurs limites sont utilisés à la fois au niveau européen et au niveau français. Les premières sont des valeurs limites de court terme (VLCT) ou VLE qui sont destinées à protéger des effets des pics d'exposition. Elles se rapportent, sauf indication contraire, à une durée de référence de 15 minutes. Les secondes sont des valeurs limites sur 8 heures, nommées valeur moyenne d'exposition (VME), et destinées à protéger les travailleurs sur des effets à terme. Elles sont mesurées ou estimées sur la durée de travail à un poste (8h).

En France, les valeurs limites d'exposition professionnelle pour le Cr(VI) sont des valeurs limites indicatives :

- La valeur moyenne (VME) est de 0,05 mg/m³.
- La valeur d'exposition à court terme (VLE) est de 0,1 mg/m³.

Ensuite, la classification de l'anhydride chromique²⁶¹, ainsi que celle de la préparation composant le bain (acide chromique à une certaine concentration), ont un impact direct sur la possible classification SEVESO de l'atelier les mettant en œuvre. En effet, de ces classifications dépendent les rubriques ICPE auxquelles appartiennent le bain et les stocks d'anhydride chromique, et donc les quantités-seuils auxquelles ils sont associés dans l'arrêté du 10 mai 2000. Nous rappelons que si ces seuils sont dépassés, directement ou par l'utilisation de la règle de cumul sur site, l'atelier est assujéti aux dispositions de l'arrêté en question.

Aujourd'hui, l'anhydride chromique est classé « très toxique » et à ce titre, cette substance est prise en compte dans l'arrêté du 10 mai 2000 à travers la rubrique ICPE 1111 (emploi ou stockage de substances et préparations très toxiques).

L'anhydride chromique mélangé à l'eau donne de l'acide chromique associé à diverses espèces du Cr(VI) ($\text{CrO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{CrO}_4 + \dots + \dots$). Le bain ainsi constitué est un mélange de réactifs : c'est une préparation contenant des composés du Cr(VI). A ce titre, la classification du bain est soumise aux règles fixées par la directive 99/45/CE²⁶². Deux méthodes sont alors applicables : il est d'une part possible d'utiliser les règles de dilution classiques et il est d'autre part envisageable de se référer à des tests de toxicité réels. Dans le cas où des tests de toxicité

²⁶⁰ Ces définitions sont issues de la directive 94/24/CE du 7 avril 1998 qui définit la notion de valeur limite niveau européen. Au niveau français, les valeurs limites indicatives sont fixées par arrêté en application de l'article R 232-5-5 du code du travail : l'arrêté du 30 juin 2004 modifié par l'arrêté du 9 février 2006 en donne une première liste. Les valeurs limites réglementaires contraignantes ont fait l'objet de décrets en Conseil d'Etat. Des points à contrôler, des méthodes à appliquer et des fréquences de mesurages sont alors définis.

²⁶¹ L'anhydride chromique (CrO_3) est un composé chromé hexavalent, également appelé trioxyde de chrome ou oxyde de chrome VI, qui lorsqu'il est mélangé à l'eau forme l'acide chromique.

²⁶² Directive du Parlement Européen et du Conseil n° 1999/45/CE du 31 mai 1999 relative au rapprochement des dispositions législatives, réglementaires et administratives des États membres relatives à la classification, à l'emballage et à l'étiquetage des préparations dangereuses.

ont été effectués, la classification selon les résultats obtenus prime sur la règle de dilution. Dans notre cas, la classification des bains d'OAC est déterminée par l'intermédiaire de tests de toxicité réels²⁶³ : ils sont donc classés comme étant « dangereux pour l'environnement » et ils sont donc associés à la rubrique ICPE 1173 (emploi ou stockage de substances et préparations toxiques pour les organismes aquatiques).

Pour plus de précisions, il est conseillé de se reporter au document « *Guide de classement dans la nomenclature des installations classées, FIM, GIFAS, INERIS, SATS, 2005* » [FIM ; GIFAS, 2005].

Pour finir, nous signalons que la réglementation REACH va avoir un impact très significatif sur l'utilisation de Cr(VI) dans les bains de traitement de surface du fait de la classification cancérigène de l'anhydride chromique. Nous reviendrons par la suite, en détail sur ce point (1.4.1.1 – p249).

3.3 Le terrain de recherche : une technologie propre du secteur aéronautique et des traitements de surface

Comme nous l'avons vu dans la partie précédente, l'objectif de notre étude est de confronter une démarche de comptabilité de gestion environnementale faisant appel à différents outils et méthodes, à une situation industrielle. Il convient donc, dans le cadre des activités de l'entreprise au sein de laquelle notre projet de recherche est mené, de déterminer le périmètre sur lequel nous allons déployer notre expérimentation. Ce périmètre devra, pour permettre un traitement des problématiques, être lié à des enjeux environnementaux importants pour lesquels des améliorations, notamment par des activités de prévention des pollutions, sont possibles. Enfin, les activités considérées sur le périmètre devront constituer un enjeu stratégique environnemental majeur pour l'entreprise.

3.3.1 Les chromates dans le secteur aéronautique

Les chromates sont utilisées dans de nombreux procédés industriels et se retrouvent parfois sur l'avion. Il s'agit, compte tenu des caractéristiques de ces substances, d'une préoccupation majeure.

3.3.1.1 Les chromates - généralités

Nous rappelons que les espèces chimiques les plus fréquemment rencontrées en milieu industriel sont le chrome élémentaire (Cr⁰) et les cations trivalent (Cr³⁺) et hexavalent (Cr⁶⁺).

Le chrome trivalent est la forme la plus stable de cet élément de par sa tendance forte à former dans l'eau des complexes à structures hexaédriques ou octaédriques, cinétiquement inertes

²⁶³ Test de toxicité effectué par l'INERIS : Lemazurier, E., Etude de la toxicité aiguë de bains de traitements de surface contenant de l'anhydride chromique administré par inhalation chez le rat, SET - 04-003 - juillet 2004. Le recours à un test effectif permet ici d'éviter d'avoir à utiliser la méthode conventionnelle de calcul de règle de dilution, décrite à l'annexe II de l'arrêté du 9 novembre 2004.

Les composés hexavalents sont des oxoacides²⁶⁴. Ils sont presque toujours liés à des atomes d'oxygène constituant ainsi de forts agents oxydants. Les oxoacides que sont l'acide chromique (H_2CrO_4) et l'acide dichromique ($\text{H}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) ont pour dérivés les chromates (CrO_4^{2-}) et les dichromates ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$). L'oxoanion chromate (CrO_4^{2-}) a une structure tétraédrique de même type que celle du sulfate (SO_4^{2-}) dont il conserve quelques caractéristiques géométriques. Sa structure va, par exemple, permettre à l'ion chromate de pénétrer dans une cellule biologique au niveau de sa membrane plasmique par la même voie de transport qu'un sulfate [FIM, GIFAS 2005].

Les structures chimiques des chromates et dichromates sont présentées dans le schéma suivant (Figure 34) :

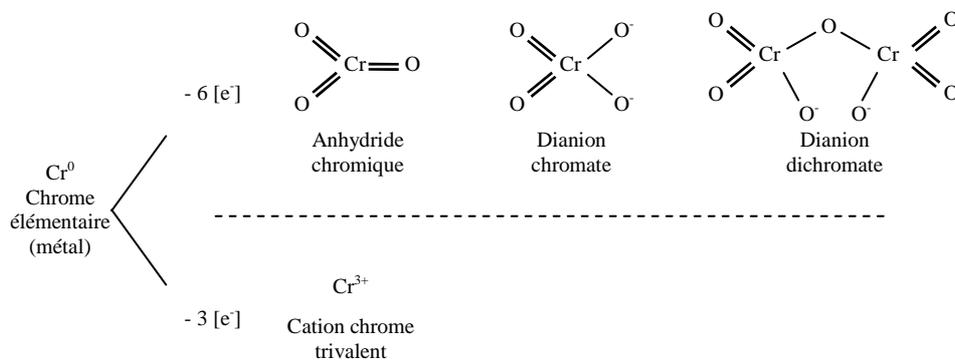


Figure 34 – Structure chimique des chromates

Dans l'environnement, le chrome VI est présent sous la forme de ses oxoanions ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) et (CrO_4^{2-}).

Enfin, il faut noter que le chrome VI est toxique pour les organismes aquatiques²⁶⁵ et que la substance généralement utilisée dans le milieu industriel (anhydride chromique, CrO_3) est classée comme « substance que l'on sait être cancérigène pour l'homme »²⁶⁶ et comme « substance devant être assimilée à une substance mutagène pour l'homme »²⁶⁶.

3.3.1.2 Les chromates – utilisation dans les procédés industriels

Depuis des décennies, les chromates furent considérés comme les seuls inhibiteurs disponibles permettant d'assurer une protection adéquate contre la corrosion de l'aluminium et de l'acier dans l'industrie aéronautique. Ceci est notamment lié à l'extrême importance que revêt la

²⁶⁴ Un oxoacide est un composé qui contient de l'oxygène, avec au minimum un autre élément, au moins un hydrogène lié à l'oxygène et qui produit aussi une base conjuguée par perte d'ion(s) hydrogène (hydron).

²⁶⁵ De nombreuses études ont testé la toxicité du chrome (VI) sur différents organismes aquatiques : les poissons d'eau douce, les crustacés d'eau douce, les coelentérés d'eau douce, les mollusques d'eau douce, les insectes d'eau douce, les invertébrés d'eau salée, les algues d'eau douce, les algues d'eau salée, les batraciens d'eau douce et les plantes d'eau douce.

²⁶⁶ Classification de l'Union Européenne.

protection contre la corrosion pour des pièces soumises à des conditions extrêmes, telles que des variations climatiques, comme c'est le cas dans l'industrie aéronautique.

Leur performance technique étant unique dans ce domaine, ils sont utilisés dans de nombreuses activités industrielles, lors de la construction d'un avion. Parmi les principales applications mettant en jeu des dérivés de chrome hexavalent, nous notons :

- Les applications de traitement de surface (bains) :
 - Anodisation chromique
 - Décapage
 - Revêtement
- Les applications de peinture et de liaisons :
 - Peintures extérieure et intérieure
 - Liaison primaire
 - Mastics
- Les autres applications
 - Applications électriques et électroniques
 - ...

3.3.1.3 Un projet global : la substitution des chromates

De nombreuses études mettent cependant en avant le fait que les composés chromés hexavalents, parmi lesquels les chromates et leurs dérivés, entraînent des effets nocifs, à la fois pour la santé humaine, et l'environnement ; ces effets dépendant grandement de leurs conditions d'utilisation.

C'est pourquoi, les chromates sont aujourd'hui des substances soumises à de fortes contraintes réglementaires.

Il est à noter que certains secteurs industriels n'ont d'ores et déjà plus le droit d'utiliser ces substances dans leurs applications. Aujourd'hui, les directives RoHS²⁶⁷ et VHU²⁶⁸ restreignent par exemple très fortement les possibilités d'utilisation de chrome hexavalent pour les industries automobiles, électriques et électroniques. Plus précisément, ces textes interdisent la présence de chrome hexavalent, de plomb, de cadmium et de mercure sur les objets mis en vente au grand public dont le cycle de fin de vie n'est pas maîtrisé. Les passivations sur aciers zingués et aluminium y sont d'ores et déjà interdites, puisqu'au cours du traitement il se forme des chromates à base de chrome hexavalent sur les pièces traitées.

Les réglementations environnementales qui engendrent, ou qui sont susceptibles d'engendrer, les contraintes les plus fortes sont la directive dite « Seveso II »²⁶⁹ (transcrite au

²⁶⁷ Directive 2002/95/CE du 27 janvier 2003, relative à la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques.

²⁶⁸ Directive 2000/53/CE, relative aux véhicules hors d'usage.

²⁶⁹ Directive 96/82/CE modifiée par la directive n° 20 03/105/CE du 16 décembre 2003.

niveau français par l'arrêté du 10 mai 2000) et la réglementation REACh²⁷⁰ (Registration, Evaluation, Authorisation and restriction of Chemicals).

Une classification d'une substance dangereuse, ou d'une préparation à base de substances dangereuses, devenant plus drastique, peut ainsi faire qu'un atelier de traitement de surface soit assujéti aux dispositions de la directive Seveso II. Ce dernier point est tout particulièrement vrai pour le Cr(VI) : l'anhydride chromique qui était par exemple classé Toxique (T) est depuis 2004 classé très Toxique (T+), du fait d'une Adaptation au Progrès Technique²⁷¹.

Les applications contenant des chromates seront quant à elles très certainement incluses dans la liste des substances soumises à autorisation (annexe XIV) de la réglementation REACh²⁷². A ce titre, il n'est pas possible d'exclure le risque que certaines soient interdites.

Pour les entreprises aéronautiques, la réponse la plus appropriée est de développer une approche proactive en phase avec la politique EHS développée au niveau européen²⁷³. Un projet visant à supprimer les dérivés du chrome dans toutes ses applications a donc été lancé. Cet objectif constitue un challenge très important, d'autant plus que la résistance à la corrosion doit être assurée pour au moins 30 ans, ce qui est la durée de vie minimale d'un avion.

3.3.2 Le cas des traitements de surface

3.3.2.1 La substitution des chromates dans tous les bains de traitement

Différents procédés de traitement de surface utilisent ou utilisaient du Cr(VI) :

- Les bains de décapages sulfochromiques chauds et froids (pour l'aluminium) étaient montés à partir d'acide sulfurique et d'anhydride chromique. Le Cr(VI) a d'ores et déjà été remplacé et les bains de décapage fonctionnent aujourd'hui sans chrome.
- L'électrolyte²⁷⁴ utilisé dans les bains de traitement de l'aluminium par Oxydation Anodique Chromique (OAC) est de l'acide chromique formé à partir de l'anhydride chromique (CrO₃). Le traitement par OAC peut avoir pour objectifs la protection des pièces contre la corrosion ou leur préparation avant collage. Des tests sont aujourd'hui en cours dans l'optique d'un remplacement du Cr(VI) par une autre substance pour l'activité de protection contre la corrosion. Des recherches d'un substitut pour l'activité de préparation avant collage sont également menées.
- Lorsque les pièces d'aluminium traitées contre la corrosion ne sont pas peintes, elles sont colmatées. Le colmatage bichromaté, induisant la présence de Cr(VI) est aujourd'hui remplacé par un colmatage à l'eau.

²⁷⁰ Règlement (CE) n°1907/2006 du Parlement européen et du Conseil du 18 décembre 2006 concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH), instituant une agence européenne des produits chimiques

²⁷¹ Directive CE 2003/74, 29eme ATP. La classification et l'étiquetage des substances sont modifiés régulièrement par le biais d'Adaptation au Progrès Technique (ATP).

²⁷² http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/fr/oj/2006/l_396/l_39620061230fr00010849.pdf

²⁷³ Celle-ci vise notamment à implémenter les solutions les plus innovantes afin d'améliorer la performance environnementale tout au long du cycle de vie du produit.

²⁷⁴ L'électrolyte est la solution composant le bain.

- Enfin certaines pièces subissent un traitement de conversion chimique appelé « chromatisation »²⁷⁵. Ce traitement s'effectue dans un bain contenant des sels de chrome hexavalent (anhydride chromique, chromate ou dichromate de potassium ou de sodium). Là encore des recherches en vue d'une substitution sont en cours.

Le champ des recherches menées dans l'optique d'une suppression de tous les chromates utilisés dans les applications de traitement de surface est donc très large. Les recherches de substituts pour les différentes applications présentent en outre des degrés d'avancement très variables, certains procédés sans chrome étant déjà utilisés, d'autres étant en phase de test alors que pour certaines applications, des substituts potentiels sont encore recherchés.

3.3.2.2 Le cas particulier de l'OAC

Parmi les différents volets de la suppression des chromates dans les applications de traitement de surface, nous nous penchons sur la substitution de l'anhydride chromique utilisé dans les bains d'OAC à des fins de protection contre la corrosion.

Ce procédé nous semble en effet primordial à plusieurs titres.

Tout d'abord, le procédé de traitement par Oxydation Anodique Chromique (OAC) de l'aluminium est l'un des procédés majeurs parmi les activités de traitement de surface mises en œuvre par les entreprises aéronautiques. Des gammes de traitement sont ainsi dimensionnées autour de l'OAC qui est le traitement central conférant à la pièce les propriétés requises. Ces propriétés sont en outre directement liées aux caractéristiques de la couche d'oxyde d'aluminium. Dans ce cadre, certains bains de traitement sont mis en œuvre en amont de l'OAC, constituant des opérations de prétraitement, et d'autres en aval qui sont considérées comme des opérations de complément. Tous ces bains, associés à leur rinçage, forment finalement la gamme d'Oxydation Anodique Chromique et il faut bien garder à l'esprit que les procédés de préparation ou de complément, n'existent que dans l'objectif de garantir l'efficacité et la pérennité du traitement par OAC. Les propriétés qu'ils engendrent pour l'aluminium sont donc moins fondamentales que celles de l'OAC.

Ceci est important lorsqu'on considère les défis techniques liés à la substitution des chromates dans les bains de traitement de surface. La suppression des composés chromés dans les traitements de décapage (sulfochromique) ou de colmatage (bichromaté), qui sont des opérations de prétraitement et de complément, n'ont ainsi pas présenté, ou ne présentent pas, le même niveau de challenge technique que celui consistant à obtenir les propriétés requises en terme de protection contre la corrosion.

Ensuite, la durée du traitement par anodisation étant généralement plus importante que celle des traitements complémentaires, les enjeux environnementaux seront logiquement plus marqués, notamment en terme d'émissions atmosphériques et de consommations d'énergie.

²⁷⁵ Ce traitement permet de former des couches complexes d'oxydes et de sels de chrome sur des revêtements électrolytiques de métaux communs.

Enfin, les propriétés issues du traitement de l'aluminium par OAC et par un éventuel procédé de substitution, doivent être considérées dans une optique élargie, en liaison avec le cycle de vie de la pièce traitée. En effet, une substitution de l'OAC aura par exemple un impact en terme de compatibilité avec la peinture des pièces après traitement. L'accroche de la peinture est en effet intimement liée aux caractéristiques des couches de protection formées par anodisation. Un changement de procédé pourra dès lors avoir un impact sur le type de peinture à utiliser par la suite, ce qui peut également engendrer des modifications en terme de maintenance pour les compagnies aériennes (le décapage des peintures aura-t-il lieu à la même fréquence, avec les mêmes procédures ?).

Tous ces points font que la substitution de l'OAC constitue une étude de cas intéressante dans notre contexte de recherche.

3.3.2.3 Les substituts de l'OAC existants

Différents substituts ont été brevetés pour les deux applications que remplit l'OAC : préparation des pièces d'aluminium avant collage et protection contre la corrosion.

Nous n'avons toutefois pas d'information précise sur leur réelle efficacité technique, même si une revue des brevets déposés nous a permis d'obtenir les informations suivantes, relatives aux substituts développés par l'entreprise Boeing.

	Phosphoric acid Anodizing	Sulfuric-Boric acid Anodizing	Fungus resistant Sulfuric-Boric acid Anodizing
Numéro de brevet (US patent)	4,085,012	4,894,127	6,149,795
Date	18 avril 1978	16 janvier 1990	21 Novembre 2000
Entreprise	Boeing	Boeing	Boeing
Fonction	Préparation de l'aluminium avant collage	Protection contre la corrosion	Protection contre la corrosion
Paramètres de traitement	<u>Concentration massique</u> : 10% d'acide phosphorique <u>Tension d'anodisation</u> : 20 V <u>Temps d'anodisation</u> : 20 minutes <u>Température du bain</u> : 24°C	<u>Concentration massique</u> : 5 % d'acide sulfurique & 1% d'acide borique <u>Tension d'anodisation</u> : 15 V <u>Densité de courant</u> : 14 A/m ² <u>Température du bain</u> : 24°C	<u>Concentration massique</u> : 5 % d'acide sulfurique & 1% d'acide borique & 1 ppm d'acide benzoïque <u>Tension d'anodisation</u> : 15 V <u>Densité de courant</u> : 14 A/m ² <u>Température du bain</u> : 24°C

Tableau 26 – les substituts déjà développés (OAC)

L'évolution apportée au procédé d'Oxydation Anodique Sulfurique-Borique semble traduire des problèmes de vieillissement des bains (champignon, mycète).

3.3.3 Caractérisation du terrain de recherche

Nous cherchons finalement dans cette partie à caractériser le périmètre sur lequel nous avons choisi de mener notre expérimentation.

Notre étude de cas est donc rattachée au projet de substitution du procédé d'Oxydation Anodique Chromique utilisé pour la protection de l'aluminium contre la corrosion.

3.3.3.1 Une activité clé des enjeux environnementaux

Comme toute activité de traitement de surface, l'exploitation d'une ligne d'OAC constitue un aspect environnemental significatif, identifié comme tel par le Système de Management de l'Environnement déployé dans l'entreprise. A ce titre, les impacts environnementaux qui doivent tout particulièrement être suivis sont les consommations en matières premières, en énergie et en eau ; les émissions et pollutions (effluents) générées ; la production de déchets et l'utilisation de produits chimiques dangereux.

Il conviendra donc de prendre en compte tous ces impacts environnementaux dans le cadre de notre étude.

Parmi ceux-ci, l'utilisation de produits chimiques dangereux est le point central du projet de substitution de l'anhydride chromique utilisé dans l'OAC. En effet, même si comme nous allons le voir par la suite (Figure 35 – p182), l'un des éléments déclencheurs du projet est la pression réglementaire, cette dernière est engendrée par la dangerosité intrinsèque de la substance. Les implications de l'utilisation des substances chimiques, notamment en terme de risque, feront donc l'objet d'une attention particulière.

3.3.3.2 Une technologie propre

Nous cherchons ici, à déterminer si la mise en place d'un nouveau procédé d'anodisation sans chrome hexavalent, peut de manière effective être considérée comme un recours à une « *technologie propre* ».

Comme nous l'avons déjà signalé (2.1.2.3 – p44), nous considérons qu'une technologie propre est une technologie qui peut être considérée comme une activité de « *prévention des pollutions* ». Or, nous avons également vu lors de nos réflexions, que la définition restrictive d'activité de prévention des pollutions ne comprend que la réduction à la source et le recyclage intégré au procédé (Figure 5 – p45). La substitution d'une substance chimique ne constituant en aucun cas une activité de recyclage, nous pouvons affirmer que celle-ci ne sera considérée comme une technologie propre que si elle engendre une réduction à la source.

Nous rappelons donc la définition que nous avons retenue pour la réduction à la source :

Ainsi, sera qualifiée de « *réduction à la source* », toute pratique qui « *réduit la quantité de substances dangereuses ou polluantes, contenues dans les flux de déchets ou relâchées dans l'environnement, sous n'importe quelles formes, avant recyclage, traitement ou émission* » ou qui « *réduit le danger, pour la société et l'environnement, associé au rejet de certaines substances, polluants ou contaminants* »

Cette définition permet d'affirmer que la substitution du chrome VI utilisé dans les procédés d'anodisation, qui engendre effectivement une réduction de la dangerosité du procédé, constitue une technologie propre. Il sera en revanche nécessaire, pour valider totalement cette

affirmation, de vérifier que les autres impacts environnementaux du procédé (consommations, déchets, etc.) ne sont pas détériorés.

3.3.3.3 L'analyse de la prise de décision

Pour finaliser la caractérisation de notre terrain de recherche « resserré », nous nous penchons sur la manière dont la décision de la substitution des chromates a été prise.

L'un des premiers points à noter est le caractère stratégique associé à ce projet. La décision finale fut, vu l'étendue du projet, évidemment prise au niveau le plus élevé de direction, mais ne fut cependant pas soumise à une analyse financière classique. Les enjeux sous-jacents ont donc été considérés comme suffisamment forts, en terme de risques et d'opportunités, pour franchir les barrières de la prise de décision sans que la rentabilité ne soit effectivement prouvée. Ce type de choix peut être rapproché de ceux effectués dans le cas où les investissements considérés sont obligatoires d'un point de vue réglementaire. Cela est par exemple le cas, lorsque des réglementations environnementales imposent qu'une action soit réalisée pour que l'activité principale puisse être poursuivie. Cependant, il est notable que dans notre cas, l'investissement n'est pas obligatoire, mais s'inscrit plus dans une démarche d'anticipation des réglementations.

Nous avons pu, dans le cadre de notre étude, déterminer quels sont les différents objectifs recherchés par l'entreprise. L'intégration dans le milieu industriel ainsi que la consultation de divers documents de management (notamment liés au lancement du projet) et d'acteurs participant au projet, nous a permis d'établir une liste d'objectifs prioritaires. Celle-ci fut ensuite validée par le responsable-environnement intégré au projet. Le classement de ces objectifs est présenté dans le schéma suivant (Figure 35).

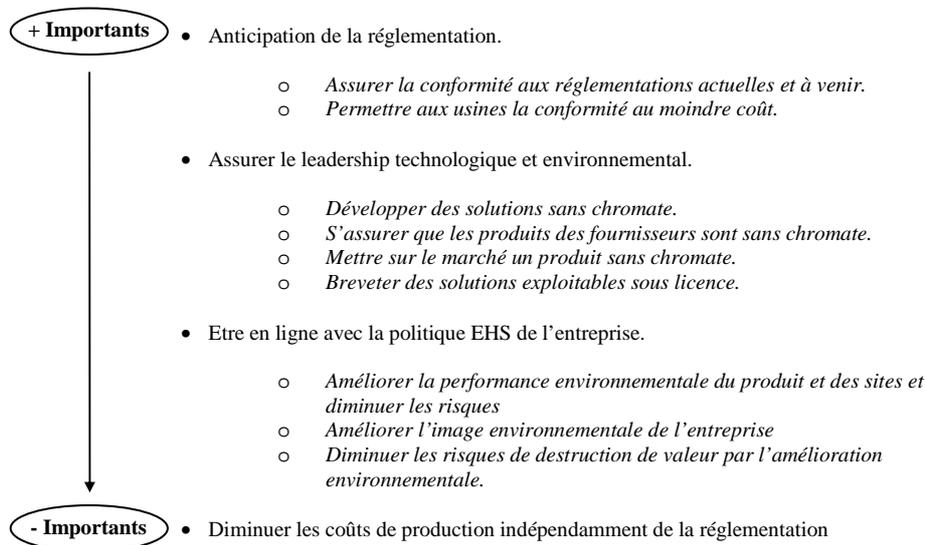


Figure 35 – Objectifs principaux de la substitution des chromates

Nous sommes donc dans le cas d'une décision environnementale dont l'objectif principal est l'anticipation de la réglementation. La notion d'anticipation est ici fondamentale, d'autant plus que l'entreprise ne possède aucune certitude quant à l'évolution qui aura effectivement lieu.

CHAPITRE 2

Des avantages sont donc attendus du fait de ce choix d'anticipation et ceux-ci s'inscrivent certainement dans une perspective de long terme. Or, lors de la prise de décision, ils n'ont pas été appréhendés par le biais d'une analyse financière classique. A travers notre démarche, nous cherchons notamment à voir s'il est possible d'intégrer ces paramètres sous une forme monétaire pour la prise de décision.