

MÉDITERRANÉE

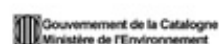
Alternatives de prévention
de la pollution dans le secteur du
Traitement de surfaces

produire
PROPRE

Centre d'Activités Régionales pour la Production Propre (CAR/PP)
Plan d'Action pour la Méditerranée



UNEP



Note : Cette publication peut être reproduite intégralement ou partiellement à des fins pédagogiques et non lucratives sans autorisation spéciale du Centre d'Activités Régionales pour la Production Propre (CAR/PP), à condition que sa source soit mentionnée. Le CAR/PP souhaiterait recevoir un exemplaire de toutes les publications ayant utilisé ce matériel comme source.

Cette publication ne peut être vendue ni utilisée à quelque fin commerciale que ce soit sans autorisation préalable du CAR/PP.

Si vous pensez que cette étude peut être perfectionnée ou si vous rencontrez des imprécisions, nous vous serions très reconnaissants de nous en informer.

Document achevé en novembre 1999

Publié en mai 2000

Révisé en mars 2002

Les demandes de copies supplémentaires ou d'informations peuvent être adressées à :

Centre d'Activités Régionales pour la Production Propre (CAR/PP)

C/ París, 184 – 3^a planta

08036 Barcelona (Espagne)

Tél : +34 93 415 11 12 – Fax : +34 93 237 02 86 – e-mail : cleanpro@cema-sa.org

Web : www.cema-sa.org

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	5
2. DESCRIPTION DES PROCÉDÉS DE TRAITEMENT DE SURFACES	7
2.1 LES BAINS DE PREPARATION DE LA SURFACE	7
2.1.1 <i>Prétraitement mécanique</i>	7
2.1.2 <i>Décapage mécanique</i>	8
2.1.3 <i>Dégraissage chimique</i>	8
2.1.4 <i>Dégraissage aux ultrasons</i>	9
2.1.5 <i>Dégraissage électrolytique</i>	9
2.1.6 <i>Activant acide/décapage</i>	10
2.2 LES PRINCIPAUX PROCÉDES DE GALVANOPLASTIE	10
2.2.1 <i>Zingage électrolytique et passivation</i>	11
2.2.2 <i>Sous-couches et finitions</i>	13
2.2.3 <i>Procédés de conversion de surface</i>	19
2.2.4 <i>Électropolissage</i>	22
2.3 LES LAVAGES	24
2.3.1 <i>Coûts découlant de la surconsommation de l'eau</i>	24
2.3.2 <i>Rapports entre la qualité du lavage et la quantité d'eau nécessaire</i>	25
2.3.3 <i>Lavages simples</i>	27
2.3.4 <i>Lavages par étapes</i>	28
2.3.5 <i>Lavages étanches de récupération</i>	29
2.4 CONDITIONNEMENT DES EAUX.....	31
2.4.1 <i>Traitement préalable au processus</i>	31
2.4.2 <i>Traitement postérieur au processus : épuration physico-chimique</i>	32
2.5 COURANTS RESIDUAIRES	36
2.5.1 <i>Introduction</i>	36
2.5.2 <i>Courants résiduaire</i> s générés	36
2.5.3 <i>Résumé des courants résiduaire</i> s générés.....	39
3. LES ALTERNATIVES DE PRÉVENTION DE LA POLLUTION.....	48
3.1 REDUCTION DE LA POLLUTION A LA SOURCE.....	49
3.1.1 <i>Substitution de matières premières et de procédés</i>	49
3.1.2 <i>Bonnes pratiques</i>	56
3.1.2.1 <i>Allongement de la durée de vie des bains</i>	56
3.1.2.2 <i>Réduction d'entraînements</i>	58
3.1.2.3 <i>Améliorations dans les rinçages et les lavages</i>	66
3.1.2.4 <i>Application des bonnes pratiques environnementales</i>	75
3.2 RECYCLAGE A LA SOURCE	85
3.2.1 <i>Récupération des matières premières</i>	86
3.2.1.1 <i>Dégraissage</i>	86
3.2.1.2 <i>Décapage</i>	87
3.2.1.3 <i>Produits d'apport</i>	90
3.2.2 <i>Réutilisation de l'eau</i>	91
3.2.2.1 <i>Technique de skip</i>	91
3.2.2.2 <i>Recyclage par échange ionique</i>	91
3.2.2.3 <i>Recyclage par osmose inverse</i>	93
3.2.3 <i>Récupération des entraînements</i>	94
3.2.3.1 <i>Électrolyse</i>	94
3.2.3.2 <i>Électrodialyse</i>	95
3.2.3.3 <i>Électro-électrodialyse</i>	96

3.2.3.4. <i>Osmose inverse</i>	97
3.2.3.5. <i>Ultrafiltration</i>	98
3.2.3.6. <i>Évaporation</i>	99
3.2.3.7. <i>Échange ionique</i>	100
3.2.3.8. <i>Autres mesures</i>	101
4. ALTERNATIVES DE TRAITEMENT	104
4.1 CASSURE DE COMPLEXES METALLIQUES.....	104
4.2 OXYDATION DES CYANURES.....	105
4.3 REDUCTION DU CHROME HEXAVALENT.....	106
4.4 COAGULATION.....	107
5. AUTRES ASPECTS À CONSIDÉRER	109
5.1. LOCALISATION DE MAGASINS DE PRODUITS.....	109
5.2. GESTION DU MAGASIN.....	109
5.3. CUVETTES DE RETENUES.....	109
5.4. ALIMENTATION D’EAU.....	110
5.5. PROTECTION DE CONDUITES.....	110
5.6. CONCEPTION DES LIGNES DE TRAITEMENT.....	110
5.7. TRANSVASEMENT D’EFFLUENTS.....	111
5.8. COLLECTE D’EFFLUENTS.....	112
5.9. AMBIANCE DE TRAVAIL.....	112
5.10 AUTOMATISATION ET PROGRAMMATION DES PROCESSUS.....	113
6. ANALYSE DE LA VIABILITÉ TECHNIQUE ET ÉCONOMIQUE DE QUELQUES ALTERNATIVES	114
7. CONCLUSIONS	142
8. QUELQUES EXEMPLES RÉELS DES ALTERNATIVES PROPOSÉES	145
9. REFERENCES PRINCIPALES	146
10. ENTITES ET PERSONNES QUI ONT COLLABORÉ À L’ÉLABORATION DE CE RAPPORT	147
11. PAGES WEB UTILES EN RAPPORT AVEC LE PROJET	148
12. PHOTOGRAPHIES SUR QUELQUES ALTERNATIVES DE MINIMISATION	149

1. INTRODUCTION

Le Centre d'Activités Régionales pour la Production Propre (CAR/PP) du Plan d'Action pour la Méditerranée a réalisé cette **Étude sur les Alternatives de Prévention de la Pollution dans le Secteur du Traitement de Surfaces** dans le but de présenter les possibilités de prévention de la pollution à la source qui pourraient être implantées dans les industries méditerranéennes de ce secteur.

Le secteur du traitement de surfaces est formé par des entreprises, surtout petites et moyennes, dédiées à la modification de la structure première d'une surface – métallique ou non – en vue de lui offrir certaines conditions de résistance aux agents externes, de finition décorative, etc. Il s'agit, pour l'essentiel, d'ateliers dont le niveau de technicité est, dans l'ensemble, moyen-bas. L'utilisation d'une grande diversité de composants chimiques, dont beaucoup peuvent être hautement toxiques et polluants, constitue une autre caractéristique du secteur.

La rationalisation des consommations et les améliorations dans les opérations internes visant la prévention de la pollution à la source et l'éco-efficacité apportent des avantages pour l'entreprise qui les exécute, avantages de type économique, environnemental et social, du fait de la réduction des impacts sur le milieu. De même, on réduit les courants résiduels générés et leur charge polluante, on économise de l'eau et des matières premières et l'image publique de l'entreprise en est améliorée. Tous ces avantages impliquent une valeur ajoutée pour l'entreprise qui réalise ces opérations, augmentant ainsi sa compétitivité.

Cette étude se divise en 5 chapitres et un point final de conclusions et de recommandations. Le premier chapitre¹ décrit les principaux procédés du secteur depuis les premiers bains de pré-traitement et de conditionnement, en passant par les principaux procédés de galvanoplastie et les lavages, point important du processus, puisque c'est dans celui-ci que l'on peut déceler les principales alternatives pour réduire le volume des effluents générés. On a également inclus une section décrivant les courants résiduels générés par les différentes activités liées aux processus galvaniques.

Le deuxième chapitre présente les alternatives de prévention de la pollution visant la réduction à la source : substitution des matières et application de bonnes pratiques environnementales et recyclage à la source : récupération de matières premières, réutilisation de l'eau et récupération des entraînements.

¹ Le premier chapitre correspond au chapitre 2 de cette étude et ainsi de suite pour le reste des chapitres.

Le troisième chapitre décrit le procédé classique de traitement des eaux résiduaires générées et les alternatives existantes pour le traitement en question.

Le quatrième chapitre décrit, via des exemples, un ensemble de recommandations variées visant à réduire le risque de pollution, que ce soit du lieu de travail ou de l'environnement. Enfin, le cinquième chapitre expose les aspects dont il faut tenir compte pour réaliser l'évaluation technique comme économique des alternatives existantes, afin de les appliquer à la réalité concrète de chaque entreprise.

Est également présent un volet final qui présente des exemples concrets d'entreprises ayant implantées des alternatives de prévention de la pollution ; ces exemples correspondent à des cas pratiques de fiches Med Clean publiées par le CAR/PP.

Cette étude s'adresse, principalement, à des professionnels et des industriels du secteur du traitement de surfaces dans le but de présenter des possibilités de prévention de la pollution à la source afin que, suivant la réalité de chaque entreprise, l'on réduise les frais superflus ainsi que les pratiques peu efficaces et l'on choisisse d'implanter des stratégies et des possibilités de prévention applicables à ce secteur.

2. DESCRIPTION DES PROCÉDÉS DE TRAITEMENT DE SURFACES

2.1 Les bains de préparation de la surface

Dans tout processus de galvanoplastie, avant de procéder au revêtement superficiel de la pièce, un traitement préalable de préparation de la surface est requis en vue d'éliminer tous les restes de graisse et d'oxydes que celle-ci contient. En général, ces restes viennent déjà avec la pièce et proviennent de leur traitement de formage mécanique.

De même, les pièces peuvent être soumises à un polissage mécanique en vue d'améliorer leur état superficiel, en éliminant aussi de cette façon la présence de graisse éventuelle.

Les systèmes de préparation de la pièce sont très variés, en fonction du matériau de base et de la nature des restes à éliminer. Parmi ceux-ci, voici les plus fréquents dans le secteur :

- prétraitement mécanique
- décapage mécanique
- dégraissage chimique
- dégraissage aux ultrasons
- dégraissage électrolytique
- activant acide/décapage

2.1.1 Prétraitement mécanique

Le prétraitement est la préparation des pièces pour leur processus de galvanoplastie ultérieur. Habituellement, le prétraitement se classe en deux groupes : préliminaire et final.

Le prétraitement préliminaire consiste à éliminer mécaniquement des éléments bruts et résiduaux présents à la surface des pièces, tels que des restes de pâtes à polir, poussières, graisse, gouttes d'huile, taches d'oxyde, etc. Encore que cette phase peut faire partie du processus de production lui-même, normalement on considère qu'il le précède.

Le prétraitement final n'élimine par des moyens mécaniques que le gros des restes d'huiles et de graisse, en conditionnant la pièce pour le processus de galvanoplastie proprement dit.

Dans n'importe quel cycle de prétraitement dans lequel les pièces à traiter présentent autant de reste d'huiles que d'oxyde, c'est une bonne pratique d'éliminer mécaniquement ces polluants,

avant d'introduire les pièces directement dans la ligne de traitement, celle-ci facilitant ultérieurement l'élimination d'une façon plus uniforme des huiles et des oxydes.

2.1.2 Décapage mécanique

Il consiste à projeter à grande vitesse, par air comprimé, un matériau agressif à l'état solide (sable de silice, scories, grenaille d'acier, etc.) sur la surface en question. Avec ce système, on élimine progressivement les couches d'impuretés adhérant à la surface à traiter. Le matériau agressif utilisé dépend de différents facteurs comme le rendement du produit, la possibilité de récupération, l'aspect désiré de la finition et du matériau de base de la pièce.

2.1.3 Dégraissage chimique

Dans ce cas, on procède à l'immersion de la surface à traiter dans une solution chimique, durant un temps préétabli, en employant des solvants, des détergents ou bien par électrolyse.

Dans le **dégraissage aux solvants**, ceux-ci sont utilisés autant dans la phase vapeur qu'à froid. Ils éliminent les graisses, les peintures et les vernis.

Dans la phase vapeur, on utilise normalement des solvants chlorés que l'on fait évaporer dans le bain pour produire les vapeurs dissolvantes.

À la suite, voici les solvants les plus utilisés à l'heure actuelle pour effectuer le dégraissage:

- trichloroéthane, trichloroéthylène et perchloroéthylène,
- chlorure de méthylène,
- trichlorofluoréthane,
- chloroforme, en tant que bases.

Dans le cas du dégraissage avec des solvants à froid, on fait servir les mêmes composés mais en les appliquant par immersion.

Dans le **dégraissage chimique aux détergents** (commerciaux), on arrive à éliminer toute graisse de quelque nature qu'elle soit grâce à la présence d'éléments tensioactifs qui diminuent la tension superficielle du bain et qui sont ajoutés à une solution alcaline.

Dans les milieux alcalins employés pour dégraisser les pièces, voici la formulation suivante :

- soude caustique..... 40 g/l
- carbonate de sodium..... 25 g/l
- phosphate trisodique 12·H₂O..... 10 g/l
- métasilicate de sodium 5·H₂O..... 10 g/l
- agents mouillants..... 2-5 g/l

Dans ce milieu, les conditions optimales de travail sont les suivantes :

- pH..... 12-14
- température..... 60-90 °C

D'autre part, pour favoriser l'effet mécanique du lavage, on utilise normalement un quelconque mécanisme d'agitation du milieu, par exemple: l'air.

2.1.4 Dégraissage aux ultrasons

Ce système consiste en un moyen chimique comme le précédent auquel on ajoute un mécanisme générateur d'ultrasons qui crée un effet d'impact sur la surface de la pièce en collaborant au lavage mécanique de celle-ci.

2.1.5 Dégraissage électrolytique

Un des systèmes les plus utilisés est le dégraissage électrolytique consistant à soumettre les pièces, agissant comme cathodes, à l'action d'une solution alcaline. Les graisses saponifiables sont attaquées et saponifiées sous l'action de la solution alcaline, et l'hydrogène résultant de l'électrolyse sur la cathode favorise la libération des graisses de la pièce. Avec ce système, les oxydes métalliques se dégagent aussi du fait de leur réduction à travers l'hydrogène.

La formule de base du moyen est la suivante :

- soude caustique..... 50-60 g/l
- phosphate trisodique 12·H₂O..... 10-20 g/l
- gluconate de sodium..... 10-30 g/l

Dans ce cas, les conditions de travail les plus fréquentes sont les suivantes :

- pH..... 12-14
- température..... 80 °C
- densité de courant..... 5-10 Amp/dm²

2.1.6 Activant acide/décapage

Dans cette opération, on élimine surtout les oxydes métalliques de la surface à recouvrir.

En fonction du type d'oxyde à éliminer, on utilise des bains acides à froid ou à chaud.

Parmi les principaux composés, on peut distinguer les suivants :

- acide chlorhydrique
- acide sulfurique
- agents inhibiteurs

On a aussi observé l'utilisation des deux acides mélangés, encore que quelques activateurs spéciaux de métaux utilisent le bifluorure d'ammonium ($F_2H_2NH_4$), comme substance d'activation.

Après le décapage, la surface contient des produits chimiques résultant de l'action des acides sur les oxydes. Ensuite, ces produits sont donc éliminés en procédant à leur neutralisation et en les nettoyant à l'eau courante.

2.2 Les principaux procédés de galvanoplastie

Après avoir éliminé complètement de la surface à recouvrir toute graisse ou tout oxyde métallique, on la soumet à un processus d'électrodéposition avec une matière qui lui procure les propriétés anticorrosion et décoratives souhaitées.

En fonction du matériau à recouvrir et des caractéristiques finales que l'on prétend donner au revêtement, on utilise différentes techniques et matériaux. Nous verrons, à la suite, les principaux procédés de traitement qui sont réalisés.

Dans le cas des revêtements électrolytiques, le mécanisme de revêtement consiste à immerger la surface à recouvrir, préalablement nettoyée suivant l'un des procédés mentionnés auparavant, dans un électrolyte approprié, qui possède les ions du métal à déposer; la pièce à recouvrir constitue le cathode de la cuve électrolytique. D'un autre côté, l'anode est formée par des barres d'une grande pureté du métal de dépôt, dont la mission est de maintenir constante la concentration des ions métalliques de l'électrolyte.

L'épaisseur du revêtement est réglée par les changements d'intensité du courant employé et du temps de durée du processus. Il faut indiquer également la présence de divers agents - agents mouillants, brillants à métaux, complexants, etc. - qui, ayant diverses fonctions, font également partie du bain.

Dans le secteur des industries de finition de surfaces on peut rencontrer, principalement, les procédés industriels que l'on décrit ci-après.

2.2.1 Zingage électrolytique et passivation

Ce type de processus est un des plus répandus parmi les entreprises de traitement de surfaces et, probablement, deviendra un des revêtements les plus utilisés pour la protection du fer, étant donné ses caractéristiques anticorrosion et décoratives.

Il existe dans l'actualité trois façons essentielles de déposer le zinc par voie électrolytique :

- zinc acide
- zinc alcalin
- zinc cyanuré

Le processus de **zinc acide** n'est pas, de nos jours, le processus de zincage le plus employé. Ce métal est chimiquement actif et est attaqué par les acides dilués, encore que cela se fasse lentement lorsque l'acide est concentré. Parfois, cela entraîne une difficulté au moment de contrôler les paramètres du bain de processus. La solution acide est formée principalement par du sulfate ou du chlorure de zinc, du chlorure sodique ou potassique et de l'acide borique.

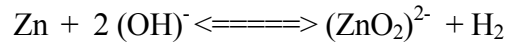
Ainsi, les formulations acides sont comme suit :

- chlorure de zinc..... 62-85 g/l
- chlorure potassique..... 186-255 g/l
- acide borique..... 30-38 g/l
- agents mouillants..... 60-90 g/l
- brillants à métaux..... 0,5-1 g/l

Les conditions de travail dans cette formulation sont les suivantes:

- Température..... 21-35 °C
- Densité de courant..... 1- 4 Amp/dm²
- Tension..... 1-18 V
- pH..... 4,8-5,4

La **solution de zinc alcaline** est plus utilisée que la solution antérieure. Dans ce cas, le zinc réagit avec les alcalis en donnant des zingages solubles, selon la réaction suivante, dans laquelle aussi est libéré de l'hydrogène :



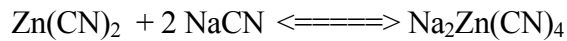
Dans ce cas, la formulation de base la plus souvent rencontrée est la suivante :

- oxyde de zinc..... 9,5 g/l
- hydroxyde sodique..... 90-120 g/l
- brillants à métaux..... 10-50 ml/l

Les conditions de travail dans ce cas sont:

- Température..... 20-30 °C
- Densité de courant cathodique... 2-4 Amp/dm²
- Voltage..... 2-15 V

Le dernier type de zingage, plus utilisé que le zingage acide et alcalin, est le **zingage cyanuré**, sous sa forme alcaline, dont la base est la réaction suivante :



Les formulations de base dépendent fondamentalement de la concentration de cyanure sodique, présentant les variations suivantes:

Types de bain	Teneur élevée	Teneur moyenne	Teneur basse
Cyanure de zinc	60	30	10
Cyanure sodique	42	20	7.5
Soude caustique	80	75	65
Polysulfure sodique	2	2	-
Brillants à métaux	1-3	1-4	1-5

Tableau 1

valeurs en g/l

Quant aux conditions de travail, les plus habituelles sont les suivantes :

- Température..... 20-30 °C
- Densité de courant cathodique..... 2-6 Amp/dm²
- Voltage..... 2-15 V

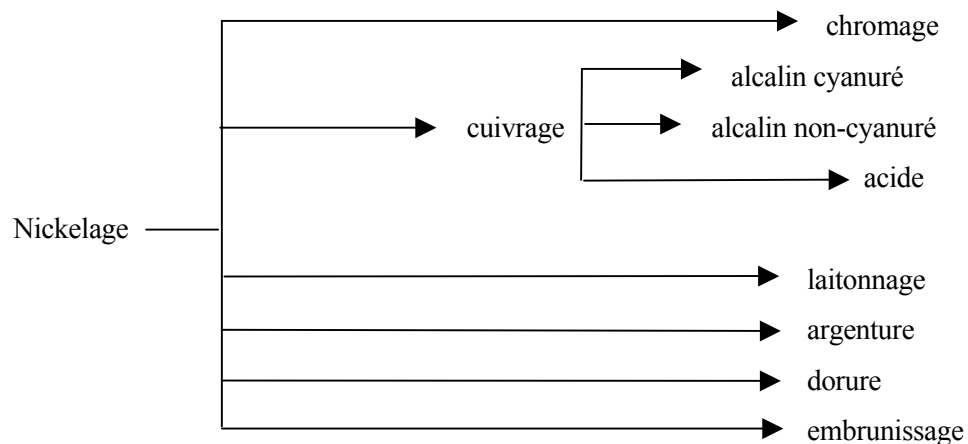
Une fois que le processus de zincage des pièces est effectué, on les soumet à un **processus de passivation chromique ou chromatisation**. Cette passivation peut être de quatre types :

- passivation bleue (résistance à un niveau de corrosion réduit)
- passivation verte (haute résistance à la corrosion)
- passivation jaune (résistance à la corrosion similaire à la précédente)
- passivation noire (résistance de type moyen)

Jusqu'à présent on continue à utiliser le chrome hexavalent dans les formulations pour la passivation.

2.2.2 Sous-couches et finitions

Le secteur du traitement de surfaces met en place de multiples finitions anticorrosives et décoratives. Dans de nombreux cas, avant la finition finale, on observe la présence d'une sous-couche de nickel qui favorise la résistance à la corrosion et à l'électrodéposition postérieure du métal, occasionnée par la finition finale. Le schéma suivant présente un résumé des principaux bains de sous-couches et de finitions.



En conséquence, comme nous pouvons le voir, le nickelage électrolytique s'utilise dans un grand nombre de cas comme base pour recouvrir avec d'autres métaux, comme les suivants :

- chrome
- or
- argent
- laiton, entre autres...

Ce type de processus est ce que l'on appelle un processus général.

Le processus de **nickelage** s'utilise normalement comme sous-couche pour traiter les métaux suivants :

- fer
- aluminium et ses alliages
- laiton
- cuivre
- zinc et ses alliages

Dans quelques cas particuliers, les pièces sont achevées avec un revêtement de nickel chimique aux caractéristiques spécifiques (dureté, lubrification, etc.).

Etant donné que les réactions qui se produisent lors du nickelage chimique sont catalytiques, c'est-à-dire qu'elles sont déclenchées par le propre matériau à recouvrir, il est de toute importance, dans ce type de revêtement, d'obtenir une bonne adhérence et, donc, de bien nettoyer les pièces à traiter.

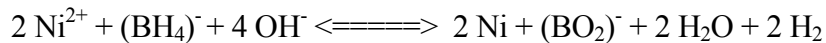
La formulation de base trouvée est :

- sulfate de nickel $7 \cdot H_2O$ 250-350 g/l
- chlorure de nickel $6 \cdot H_2O$ 60-90 g/l
- acide borique..... 30-60 g/l
- brillants à métaux..... 20-30 g/l
- agents mouillants..... 2-5 g/l

Avec ces matières premières, les conditions requises de travail sont les suivantes :

- température..... 50-65 °C
- densité de courant..... 1-10 Amp/dm²
- pH..... 4-5
- tension..... 1-16 V

La réaction générale qui a lieu pour la dépôt du nickel est la suivante :



Comme on l'a déjà dit, le nickelage électrolytique s'emploie dans bien des cas comme base pour favoriser la dépôt d'un autre métal (le chrome, principalement).

Dans les **bains de chrome** étudiés, on peut distinguer comme matières premières dont l'emploi est le plus généralisé :

- trioxyde de chrome..... 150 - 400 g/l
- acide sulfurique..... 2,5-4 g/l
- catalyseurs..... 0,5-1 g/l

Les conditions de travail suivies sont :

- température..... 40-50 °C
- densité de courant..... 5-55 Amp/dm²
- anodes insolubles..... 93% Pb, 7% Sn

Le bain de **cuivrage** est aussi assez utilisé dans le secteur. La formulation du bain est variée et peut être classée comme suit :

- cuivre alcalin cyanuré
- cuivre alcalin sans cyanures
- cuivre acide avec acide sulfurique
- cuivre acide avec acide borique

Pour le cuivre alcalin cyanuré, la composition est la suivante :

- cyanure de cuivre..... 22,5 g/l
- cyanure de sodium..... 34,0 g/l
- carbonate de sodium..... 15,0 g/l
- hydroxyde de sodium..... contrôle de pH

Quant aux conditions de travail, elles sont les suivantes :

- température..... 32-43 °C
- densité de courant..... 10-15 Amp/dm²
- pH..... 12-12,6
- anodes..... cuivre et acier

Il est utilisé pour des épaisseurs fines sur toutes sortes de métaux de base, faisant office de couche de base pour de nouvelles couches d'autres types de bain de cuivre. Pour cette raison, son emploi est très étendu. Il existe aussi une version haute concentration qui atteint 120 g/l de cyanure de cuivre et 135 g/l de cyanure de sodium.

Le bain de cuivre alcalin sans cyanures a la composition suivante :

- pyrophosphate de cuivre..... 345,0 g/l
- hydroxyde de potassium..... 18,0 g/l
- ammonium (29%)..... 1 ml/l

Quant aux conditions de travail du bain, elles sont les suivantes :

- température..... 43-60 °C
- pH..... 8,2-9,2
- densité de courant..... 1-7,5 Amp/dm²
- anodes..... cuivre

C'est une sous-couche pour bains de nickel brillant et de chrome. Elle s'applique sur n'importe quel métal présentant une couche de cuivre. Elle est également employée dans les circuits imprimés.

Dans le cas du cuivre acide avec acide sulfurique, le bain est composé de :

- Sulfate de cuivre..... 195-248 g/l
- Acide sulfurique..... 30-75 g/l

Quant aux conditions de travail, elles sont les suivantes :

- température..... 21-49 °C
- densité de courant..... 2-10 Amp/dm²
- anodes..... cuivre

C'est un bain applicable sur n'importe quel métal ferreux avec une base préalable de cuivre ; il peut aussi être utilisé comme revêtement sous des bains de nickel-chrome, afin d'offrir une meilleure résistance à la corrosion. Il est très utilisé dans la fabrication de circuits imprimés, les couches de revêtement obtenues étant très fines, bien qu'il permette aussi des revêtements épais.

Quant au bain de cuivre acide avec acide borique, la composition est la suivante :

- fluoborate de cuivre..... 225,0 g/l
- acide fluoborique..... contrôle du pH

Conditions de travail :

- pH..... 0,8-1,7
- température..... 27-77 °C
- densité de courant..... 7,5-12,5 Amp/dm²
- anodes..... cuivre

Il s'agit d'un processus qui peut procurer n'importe quel type d'épaisseur aux pièces ayant une base de cuivre, quel que soit leur métal. Utilisé aussi dans la confection de circuits imprimés.

Un autre type de revêtement qui utilise le nickel comme base est celui du **bain de laiton**. Dans ce cas, la formulation la plus employée est la suivante :

- cyanure de cuivre..... 60-75 g/l
- cyanure de zinc 8-30 g/l

- cyanure de sodium..... 130-150 g/l
- soude caustique..... 3-4 g/l
- ammoniacque..... 1-5 g/l
- brillants à métaux..... 1-10 g/l

Dans ce processus, les conditions de travail sont :

- température..... 40-60 °C
- pH..... 9,5-11,5
- densité de courant..... 0,5-2 Amp/dm²
- anodes Cu-Zn..... 80% Cu, 20% Zn

Un autre bain qui demande un premier traitement au nickel **est le bain d'argent**. La formulation dans ce processus est la suivante :

- cyanure d'argent..... 30-40 g/l
- cyanure de potassium..... 160-200 g/l
- brillants à métaux..... 0,1-10 g/l

Les conditions de travail étant :

- température..... 22-30 °C
- densité de courant..... 0,5-2 Amp/dm²
- anodes..... argent (99,99 %)

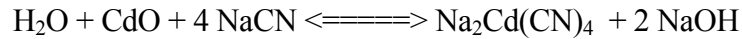
Finalement, un dernier processus, très commun, qui demande aussi une première couche de nickel est celui du **bain d'or**. Dans ce cas, la formulation employée est la suivante :

- cyanure double d'or et de potassium..... 0,5-2 g/l
- phosphate disodique..... 10-20 g/l
- brillants à métaux..... 1-5 g/l

Les conditions de travail les plus utilisées sont les suivantes :

- température..... 50-70 °C
- pH..... 11-12
- densité de courant..... 0,2-0,6 Amp/dm²
- anodes..... titane platiné (inertes)

Bien que ce processus ne soit pas aussi courant que les précédents, il faut citer le **cadmiage électrolytique**, dans lequel interviennent aussi les cyanures (cyanure de sodium, principalement) et l'oxyde de cadmium. La réaction qui a lieu est la suivante :



La stabilité du complexe de cadmium formé est favorisée par un excès de cyanure libre dans la solution.

Parmi ces types de traitements généraux, il faut mentionner le processus de revêtement à l'**étain par bain électrolytique** dans lequel interviennent le stannate de sodium, l'acétate de sodium, la soude caustique, le perborate de sodium et l'eau. La température de travail est de 70 °C. Fondamentalement, le processus a lieu parce que le perborate de sodium oxyde l'ion stannate vers l'ion stannique.

2.2.3 Procédés de conversion de surface

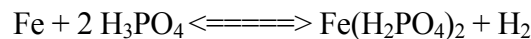
Dans ce groupe de procédés de revêtement, une réaction chimique se produit avec le métal de base.

Les procédés industriels les plus importants sont au nombre de deux :

- **phosphatation et embrunissage**, dans le cas du fer et de l'acier.
- **éloxalage de l'aluminium** et des alliages.

La **phosphatation** consiste en la formation de couches de phosphates sur la surface du métal à traiter. En plus de protéger contre la corrosion, ce processus facilite le travail mécanique des métaux traités.

Le processus de phosphatation s'effectue en introduisant la pièce à recouvrir dans une solution diluée d'acide phosphorique, lequel réagit avec le fer, selon la réaction :



D'autre part, l'**embrunissage** consiste, en essence, en l'oxydation de la surface en contrôlant le processus de manière qu'il se forme de l'oxyde ferrique qui, étant donné sa compacité, protège le fer.

Cette oxydation s'obtient de diverses manières :

- électrolytiquement (oxydation anodique), avec une solution d'eau et d'hyposulfite.

- chimiquement (oxydation alcaline), en utilisant de l'hydroxyde de sodium et du nitrate de sodium ou de potassium.
- chimiquement aussi (bains de sels), avec un bain formé par un mélange de nitrates de sodium et de potassium auquel on ajoute du dioxyde de manganèse.

D'autre part, il existe aussi le processus d'**éloxage de l'aluminium**. L'oxydation anodique de l'aluminium peut être considérée comme un processus de passivation accélérée par le passage du courant continu. En réalité, il s'agit de son oxydation par électrolyse en faisant agir la pièce à traiter comme une anode. C'est une application très importante qui, dans la plupart des cas, sert à protéger des pièces d'aluminium destinées à la construction.

Le mécanisme qui a lieu est le suivant : lorsque le courant électrique passe à travers l'électrolyte, où les pièces de l'aluminium à oxyder font office d'anode, il se forme une couche d'oxyde d'aluminium (alumine) qui croît peu à peu jusqu'au point de former des épaisseurs de l'ordre de 25-60 microns.

Au cours de ce processus d'oxydation, l'oxygène qui se forme dans l'anode est celui qui oxyde progressivement l'aluminium. Du fait de la chaleur excessive dégagée durant l'oxydation, celui-ci se déshydrate et forme l'oxyde d'aluminium (couche d'alumine).

Dans ce cas, à la différence des autres procédés, le traitement qu'il faut donner à l'aluminium est le suivant :

- | | |
|--------------------------------|-------------------------------|
| 1. dégraissage chimique | 7. éloxage d'acide sulfurique |
| 2. lavage | 8. lavage |
| 3. satinage aluminium (alcali) | 9. coloration |
| 4. lavage | 10. lavage |
| 5. décapage acide nitrique | 11. scellage à l'eau chaude |
| 6. lavage | |

Pour faire le dégraissage chimique, la formulation la plus employée est la suivante :

- carbonate de sodium..... 40 g/l
- métasilicate de sodium..... 20 g/l
- gluconate de sodium..... 10 g/l
- phosphate disodique..... 20 g/l
- agents mouillants..... 1-5 g/l

Pour procéder au satinage de l'aluminium, la formulation de base est :

- soude caustique..... 50-60 g/l
- gluconate de sodium..... 20-30 g/l
- agents mouillants..... 1-5 g/l

Dans le décapage à l'acide nitrique, la formulation est :

- acide nitrique..... 500 ml
- eau..... 500 ml

La température de travail dans ce cas est la température ambiante.

Quant au processus d'élovalage proprement dit, différents types d'électrolytes sont utilisés dans l'oxydation anodique, bien que le plus important est l'acide sulfurique à raison de 20 % en poids.

Les conditions de travail rencontrées sont :

- température..... 21-23 °C
- densité de courant anodique..... 0,5-1,5 Amp/dm²

Étant donné que lors du traitement anodique de l'aluminium, l'acide sulfurique attaque sa surface en la dissolvant partiellement, lorsque la concentration d'aluminium dans le milieu arrive à une valeur concrète, il faut procéder à la dilution de l'électrolyte.

Dans certains cas, il faut procéder à la coloration de l'aluminium en utilisant des colorants appropriés, aussi bien organiques qu'inorganiques. La concentration de chaque colorant dépend de chaque cas.

Les conditions de travail dépendent aussi de chaque colorant concret, ainsi que du degré d'intensité d'absorption demandé.

Finalement, lors du processus de scellage, on emploie de l'eau distillée à 98°C, afin d'hydrater la couche d'alumine.

En conclusion de l'étude des procédés de galvanoplastie réalisés, voici à la suite la description du processus d'électropolissage.

2.2.4 Électropolissage

Le polissage électrolytique consiste à dissoudre, préférentiellement, une toute petite partie de la pièce, afin d'obtenir un acier inoxydable ayant l'éclat d'un miroir.

La pièce agit comme un anode dans une cuve contenant des acides concentrés chauds.

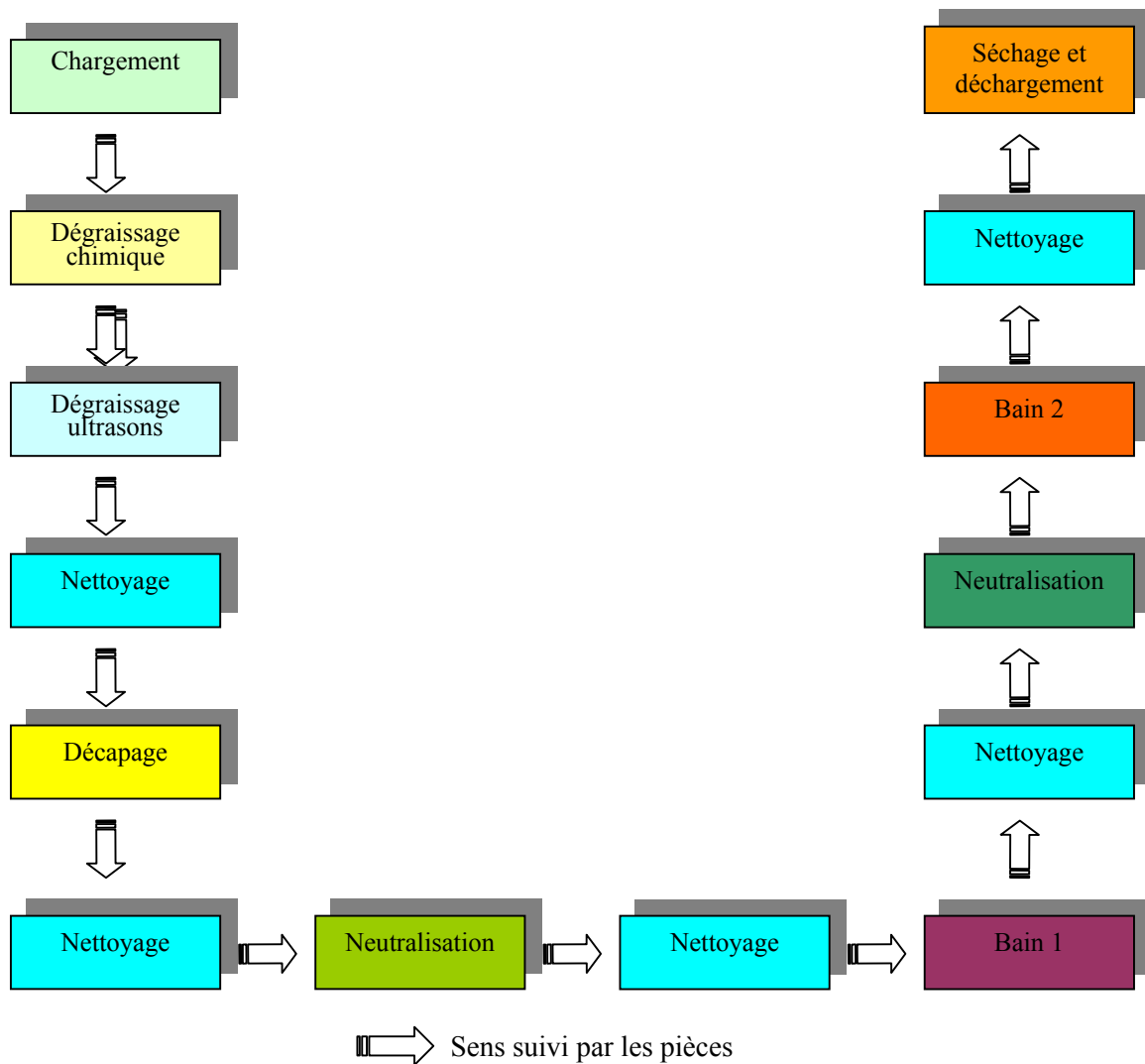
Dans ce cas, la composition de l'électrolyte est la suivante :

- acide phosphorique..... 90 % (poids)
- acide sulfurique..... 10 % (poids)
- glycérine..... 1 % (poids)

Ainsi, les conditions de travail sont celles-ci :

- température..... 80-90 °C
- temps..... 2-3 minutes
- densité du courant anodique..... 10-50 Amp/dm²

Une fois que les principaux procédés qui forment une ligne de galvanoplastie sont décrits, dans le tableau suivant on montre la séquence d'une ligne théorique :



2.3 Les lavages

L'opération de lavage est fondamentale dans les procédés de revêtements de galvanoplastie. Le débit d'eau nécessaire pour faire correctement le lavage des surfaces traitées est un paramètre qui, normalement, détermine les dimensions des systèmes de gestion et de traitement postérieurs.

Ce débit dépend de beaucoup de facteurs et, en fonction de la manière dont a été conçue l'unité de galvanisation, il peut être bien supérieur au minimum nécessaire. Ceci est, malheureusement, un cas très habituel.

Il est donc capital que le système de lavage choisi permette d'obtenir la qualité de lavage nécessaire avec une consommation d'eau minimale, fait qui, d'un autre côté, implique aussi une réduction du débit des eaux résiduaires.

Un des facteurs qui ont le plus d'influence sur les débits de lavage est l'entraînement. Celui-ci, de son côté, peut être conditionné par la forme et la rugosité superficielle de la pièce, par la viscosité de la solution de processus, etc.

2.3.1. Coûts découlant de la surconsommation de l'eau

Dans quelques pays de la Méditerranée, l'industriel doit tenir compte du fait que d'autres coûts peuvent venir s'ajouter au prix du coût de l'eau en fonction des nécessités d'adapter le déversement d'eaux résiduaires à la réglementation applicable. Parmi ces coûts, les plus significatifs sont les suivants :

1. Impôts (canons et taxes). Par ailleurs, il faut tenir compte du fait que nombre d'entre eux sont progressifs, c'est-à-dire que plus la consommation d'eau est élevée plus les charges sont importantes.
2. Dépenses de distribution au sein de l'usine.
3. Coût d'entretien des installations de fourniture.
4. Énergie des pompes et des supprimeurs pour la transvaser ou l'agiter.
5. Investissement en traitements de conditionnement de ses caractéristiques (désalinisateurs, décalcificateurs, etc.).
6. Investissement en collecte d'effluents contaminés.
7. Coût d'entretien des installations d'évacuation.
8. Investissement en traitements de dépollution (épuration physico-chimique).
9. Coûts opérationnels de dépollution (personnel, énergie, réactifs, rechanges, gestion de boues, etc.).

Réduire la consommation d'eau conduit à diminuer tout ou partie des différents coûts de l'entreprise.

L'expérience montre que la rationalisation de la gestion de l'eau - et par extension des matières - dans l'atelier de galvanoplastie mène simultanément à améliorer les circuits de production, à limiter les temps morts, à réduire la détérioration de l'ambiance de travail et le manque d'intérêt des ouvriers, et à améliorer, conséquemment, la qualité du produit et la productivité de l'entreprise.

De cette manière, en ce qui concerne la consommation d'eau, on peut établir pour le secteur les objectifs suivants :

1. Dans quelques pays du bassin méditerranéen, on considère acceptable une consommation maximale d'eau, en fonction de la surface traitée, d'environ 8 l/m^2 pour chaque position de lavage.
2. Réduire, de façon optimale, la consommation d'eau pour un même raison de dilution, ou améliorer la qualité du lavage sans augmenter la consommation d'eau.

2.3.2. Rapports entre la qualité du lavage et la quantité d'eau nécessaire

Lorsque l'ouvrier d'un atelier de galvanoplastie sort une pièce d'une cuve de la ligne de traitement, la pièce autant que son support emportent avec eux une partie de la solution aqueuse où ils étaient immergés : en sortant mouillés, ils sont recouverts d'une fine pellicule du liquide de la cuve. Ce volume de liquide est ce que l'on appelle **entraînement** qui correspond à un débit (q), habituellement, en litres par heure (l/h). De cette façon, on transfère d'une cuve à une autre une partie du liquide de la cuve antérieure, "en la contaminant".

Afin d'éviter des contaminations croisées entre cuves de processus, il faut laver la pièce et son support. À ce stade, on trouve un autre concept fondamental dans le secteur - et souvent oublié ou inconnu de l'industriel lui-même - qui est la **raison de dilution** (Rd). Ce concept mesure la qualité du lavage en question et, par définition, doit être établi cas par cas.

Soit les paramètres suivants :

Co = concentration initiale du bain

Cr = concentration moyenne du bain dans l'eau de lavage

q = entraînement (l/h)

Q = débit d'eau de lavage (l/h)

Rd = Raison de dilution (qualité du lavage)

Les relations existantes entre eux sont les suivantes :

$$\mathbf{Rd = Co / Cr = Q / q}$$

De cette façon, une fois la qualité du lavage en question établie (Rd) et connaissant l'entraînement (q) découlant de sa production, l'industriel pourra déterminer le débit d'eau de lavage nécessaire pour chaque position de lavage².

La question de base est que l'entraînement doit être éliminé par un débit d'eau de lavage évitant la concentration en sels du lavage. Par conséquent, si l'on sait que q est le débit d'entraînement et que Q est le débit de lavage:

- **q Co** est la quantité de produits incorporés au lavage et,
- **Q Cr** est la quantité évacuée du lavage.

Par conséquent, l'on sait que :

$$\mathbf{q Co = Q Cr}$$

C'est-à-dire :

$$\mathbf{Q = q Co / Cr = q Rd}$$

$$\mathbf{Q (débit de lavage) = q (entraînement produit) Rd (raison de dilution ou qualité du lavage)}$$

La conséquence qui découle de tout cela est que le fait d'*augmenter le débit de lavage n'est pas le seul moyen disponible pour améliorer la qualité de lavage*. On peut atteindre un haut niveau de qualité de lavage (Rd haut) par :

- diminution du débit d'entraînement (q) ;
- diminution du débit de lavage avec la modification de la structure du lavage.

Quelques exemples standard de qualité de lavage (Rd) extraits de la bibliographie sont détaillés dans le tableau suivant :

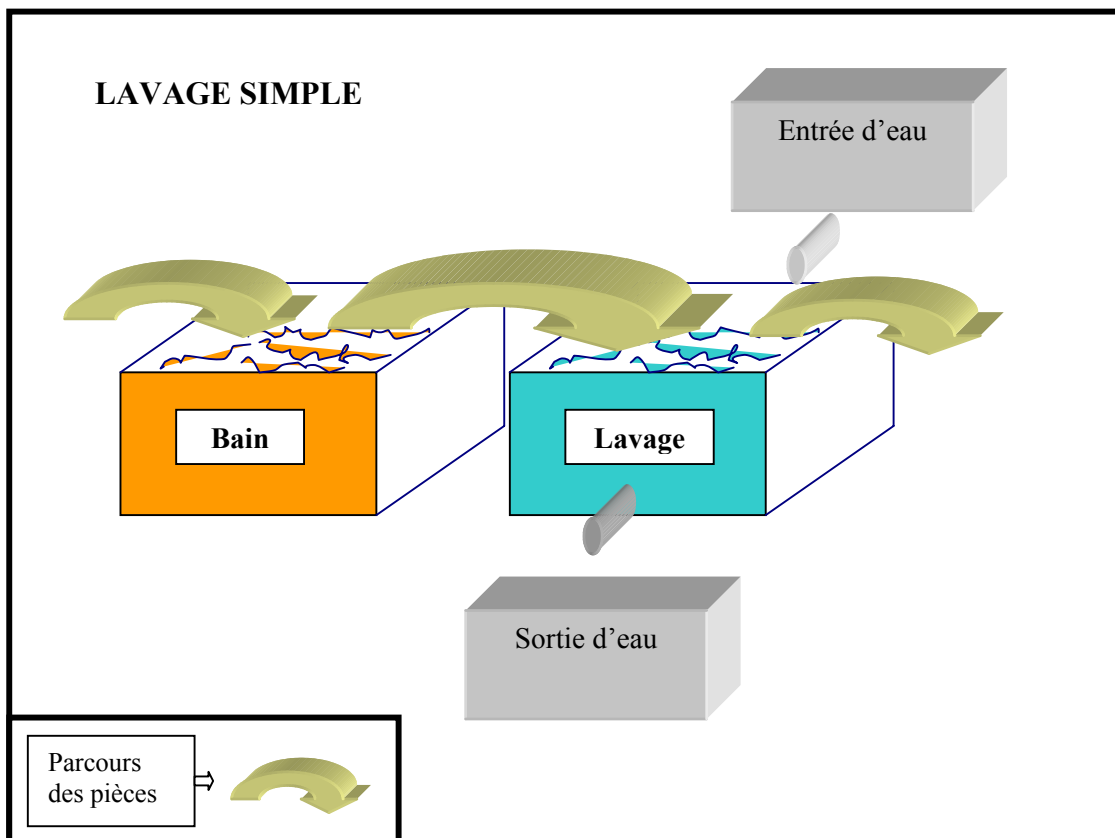
² Pour déterminer la concentration maximale permise de l'eau de la cuve de lavage, on peut prendre la concentration d'un quelconque élément pouvant mettre en danger la qualité du lavage ; par exemple, dans un lavage final, il serait suffisant de déterminer la concentration en Cl⁻ ou, souvent, on prend comme référence le produit caractéristique du bain (Ni, Zn, CN⁻, etc.).

Types de processus	Rd = Co/Cr
Préparation (dégraissage, décapage)	500-5.000
Finitions multicouche (Cu, Ni, Cr...) et la plupart des bains de dépôt	5.000-10.000
Passivation chromique hexavalent	1.000-2.000
Phosphatation fer, éloxalage aluminium	2.000-5.000
Lavages finsaux critiques	> 10.000

Comme structures ou systèmes de lavage utilisés dans le secteur, on trouve les suivants :

2.3.3 Lavages simples

C'est le système le plus répandu parmi l'immense majorité d'entreprises du secteur de la galvanoplastie.



Dans ce cas, on trouve uniquement une seule cuve de lavage, avec de l'eau courante, après le bain de traitement.

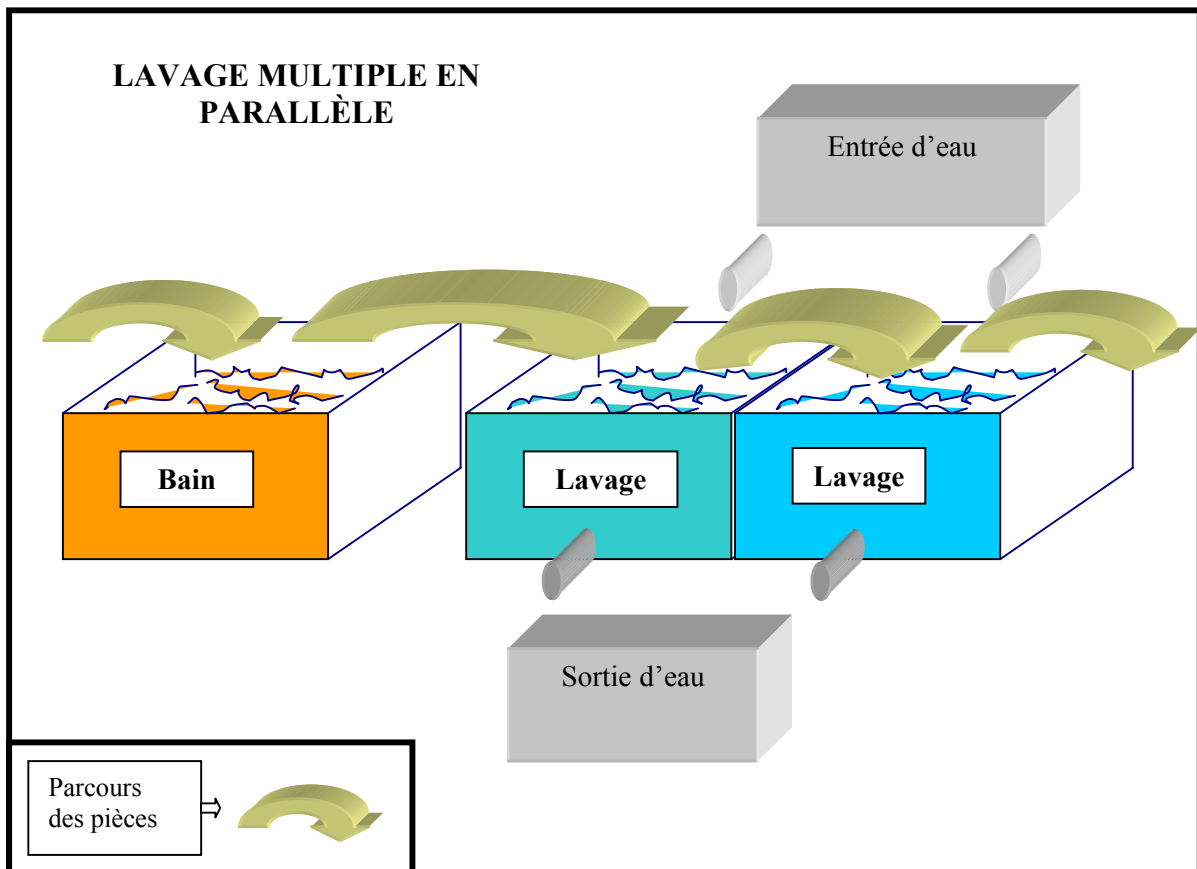
Généralement, le débit d'eau nécessaire pour garantir une dilution suffisante est très élevé.

2.3.4. Lavages par étapes

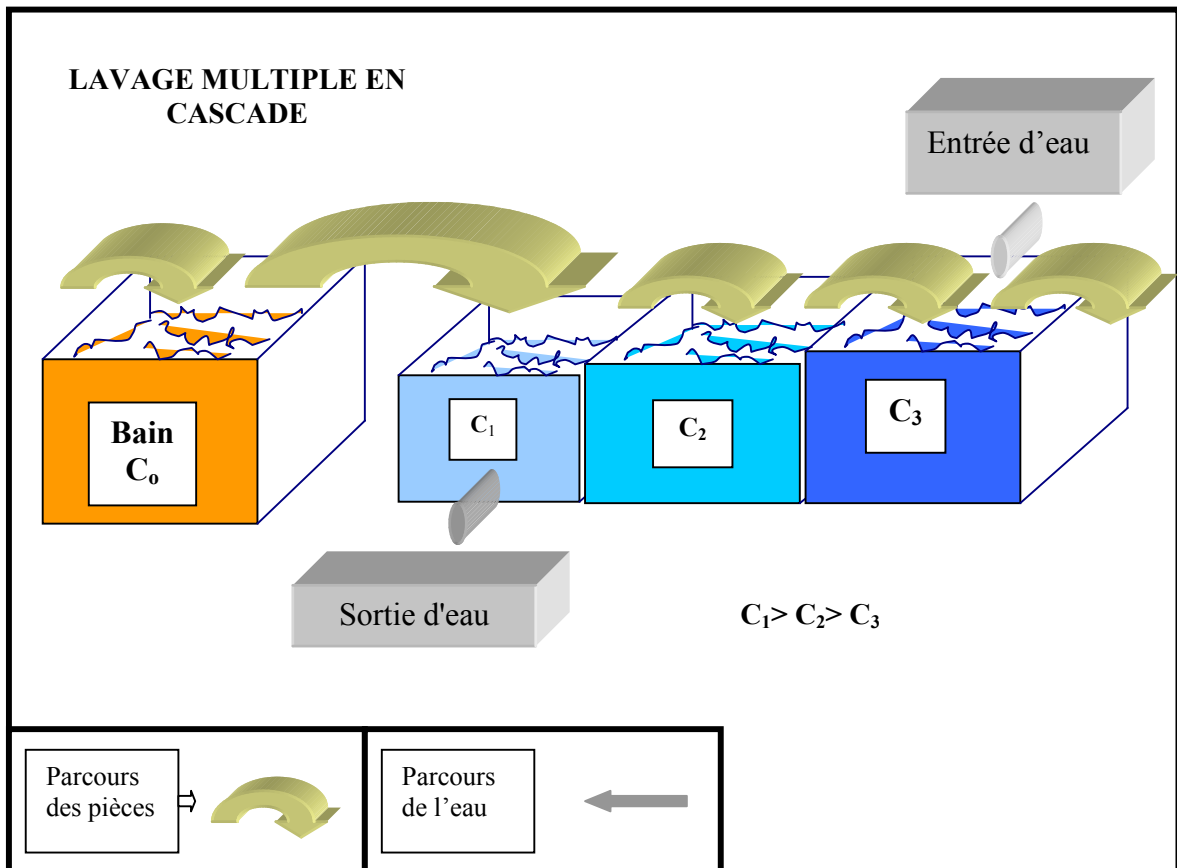
Également dénommés lavages multiples et, habituellement, il s'agit de lavages doubles (avec deux cuves). Ce système de lavage peut être de deux sortes :

- **Lavage multiple en parallèle** : C'est une bonne alternative pour réduire considérablement la consommation d'eau.

Il s'agit d'un lavage quand il existe diverses cuves de lavage où chacune d'elles est alimentée, séparément, par une entrée d'eau (en parallèle).



- **Lavage multiple en cascade (en série)** : C'est généralement le système le plus recommandé (dans la mesure où l'unité de traitement dispose d'espace suffisant).



Une simple étude économique dévoile un fait indiscutable : l'investissement que représente l'installation de ce système est minimal si on le compare à l'économie d'eau obtenue.

Dans ce cas, l'eau propre s'introduit par la dernière cuve de lavage et passe (en cascade) jusqu'à la première. Le système fonctionne donc à contre-courant (la circulation d'eau s'effectue dans le sens contraire à celui de la pièce travaillée). Ainsi, les pièces se trouvent toujours dans une eau chaque fois plus propre.

On peut démontrer, comme il apparaît clairement à la sous-section 3.1.2 de cette étude, que le débit d'eau nécessaire pour un système de lavage multiple, est radicalement inférieure dont nous avons besoin dans un système simple.

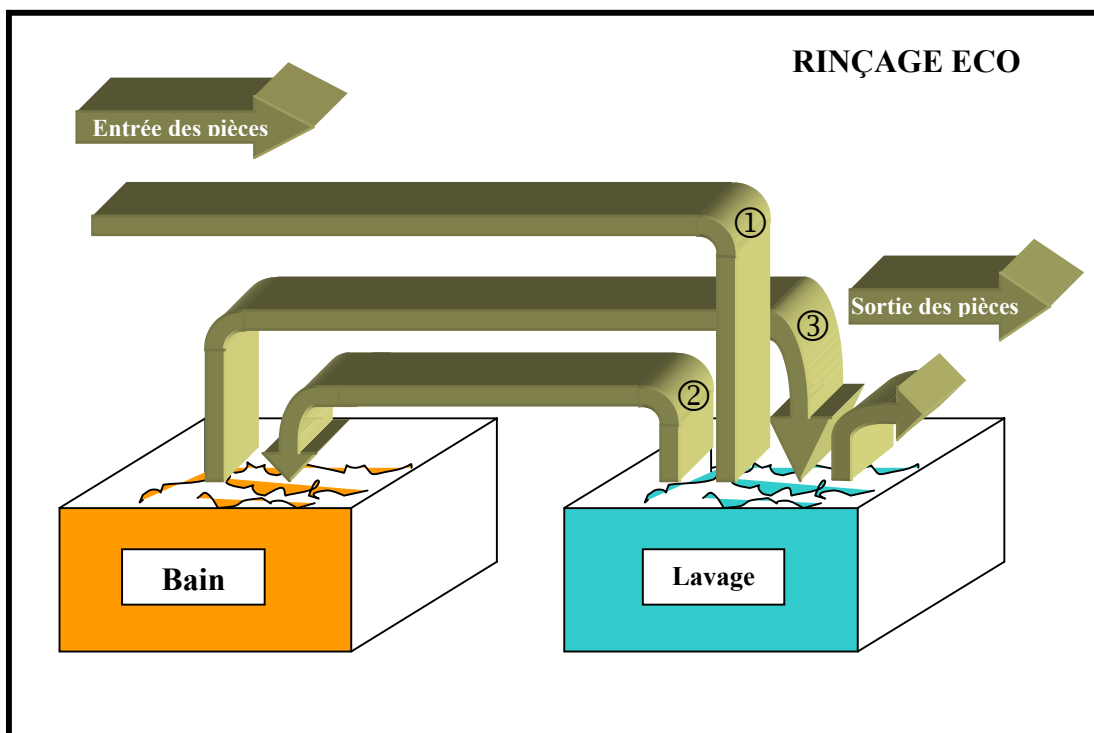
2.3.5. Lavages étanches de récupération

Il s'agit d'un pré-lavage qui sert à retenir une partie des entraînements provenant du bain de traitement et, par conséquent, il contribue à économiser des matières premières.

Comme son nom l'indique, il n'est alimenté par aucun débit d'eau continue, mais renouvelé complètement d'une façon périodique. Outre la fonction précédente, l'emploi des rinçages de récupération permet de réduire la contamination du liquide entraîné par les pièces et, par conséquent, réduit les besoins en eau des lavages postérieurs.

Il se peut que ces lavages de récupération soient placés tout de suite après une solution de processus qui opère à chaud. Dans ce cas, on peut les utiliser pour compenser les pertes que subira le bain précédent, par évaporation.

Pour certains bains qui opèrent à température ambiante, on peut faire, dans la propre cuve de récupération, un rinçage préalable et un rinçage postérieur de façon que l'entraînement d'entrée dans le bain de processus provienne du propre système de récupération. Le résultat est une récupération partielle sur un processus dans lequel il n'y a pas d'évaporation. Ce type de rinçage reçoit le nom d'ECO.



2.4 Conditionnement des eaux

2.4.1 Traitement préalable au processus

Dans les revêtements de surface, de la qualité de l'eau dépend la qualité de la fabrication. Bien souvent l'eau d'entrée n'est pas apte à être utilisée directement dans les bains de processus et peut même contenir tellement d'impuretés qu'elle peut poser des problèmes lors des étapes de lavage – en particulier s'il s'agit d'étapes finales - et finir par saturer rapidement les équipements de récupération de cet élément.

En règle générale, il convient de commencer par procéder à son analyse chimique, en déterminant la présence, entre autres, de fer, calcium, magnésium, manganèse et chlorures, ceux-ci pouvant entraîner des problèmes lors du processus d'électrodéposition. De plus, il faut tenir compte de la possible stationnarité de la qualité de l'eau (par exemple, il est habituel à beaucoup d'endroits d'augmenter la concentration saline pendant la période estivale). Malgré tout, il est difficile de fixer des valeurs optimales, car la qualité de l'eau est fonction des conditions particulières de son utilisation. De toutes façons, on accepte qu'une eau avec un TH³ de 15-20 °F et un TAC⁴ de 10-15 °F va bien pour la préparation de la plupart des bains de processus et pour leurs lavages.

Ce qui est clair, c'est qu'utiliser de l'eau d'entrée contaminée écourte la durée de vie des bains, leur efficacité, rend difficile la récupération de l'eau de lavage, est à l'origine du rebut de pièces et contribue à la charge polluante à épurer.

Pour ce qui est de la qualité chimique de l'eau d'entrée, l'industriel de galvanoplastie doit tenir compte des recommandations générales suivantes :

- Bains alcalins et leurs lavages : en général, pour éviter les dépôts et les taches, il vaut mieux de l'eau douce.
- Bains chauds : l'eau la plus recommandable est l'eau déminéralisée (ou l'eau décarbonatée) afin d'éviter la minéralisation du bain du fait d'une concentration progressive en sels.
- Lavages finaux : il convient de contrôler rigoureusement leur qualité afin d'éviter la formation de taches (présence de sels) et la corrosion ultérieure de la surface finie (présence de chlorures).

Parmi les éléments utilisés pour la modification de l'eau d'entrée, on peut souligner les suivants :

³ Titre hydrotimétrique correspond à la totalité des sels Ca et Mg instables (bicarbonates) et stables (carbonates, chlorures, sulfates, etc.).

⁴ Titre alcalimétrique complet correspond à la concentration en Ca et Mg liée aux bicarbonates.

- décalcificateurs,
- déminéraliseurs avec échangeur ionique,
- osmose inverse.

2.4.2 Traitement postérieur au processus : épuration physico-chimique

Au niveau des recommandations générales, l'industriel doit tenir compte des aspects ci-dessous avant d'opter pour tel ou tel système de traitement :

1. Réalisation d'une étude exhaustive de toutes les eaux résiduelles générées aux divers points de la ligne galvanique.
2. Adoption de toutes les mesures de réduction à la source adaptées à sa problématique, (modifications de l'équipement, des processus et des pratiques en place).
3. Analyse et, enfin, implantation des options destinées à récupérer les courants résiduelles.
4. Enfin, choix des systèmes de traitement les plus adéquats, en tenant compte de l'obtention d'un niveau de dépollution satisfaisant, qui minimise la quantité et la toxicité des déchets générés dans le processus de traitement.

Comme nous l'avons vu auparavant, les procédés habituels de traitement des eaux résiduelles dans le secteur des recouvrements de surface consistent à éliminer les métaux via la formation et la précipitation d'hydroxydes métalliques relativement insolubles. Voici les seules exigences chimiques de ce processus : les métaux doivent être libres dans l'effluent et le pH doit être adapté afin de garantir la précipitation optimale avec les hydroxydes.

L'exigence des métaux sous forme libre est extrêmement difficile à satisfaire dans le cas d'eaux chargées en cyanures, EDTA, NTA, brillants, agents mouillants, etc., lorsque les composés complexants sont introduits dans des bains de processus bien précis précisément pour réguler la quantité de métal libre – sous forme ionique – dans l'électrolyte. Un exemple très représentatif est celui des bains cyanurés de cuivre. L'expérience montre qu'une bonne partie des usines de traitement des eaux résiduelles ne prend pas en compte ces aspects.

Il est recommandé, et en fait cela se fait déjà dans certains pays du bassin méditerranéen, que les eaux résiduelles générées dans les ateliers de traitement de surfaces soient regroupées dans divers courants différents (d'après leurs caractéristiques chimiques) et traitées séparément ; il est également recommandé de suivre le même critère pour les déchargements des concentrés épuisés produits régulièrement.

Il est préférable que l'emplacement des unités de traitement se trouve en dessous du niveau des salles de dépeçage, car de cette manière les effluents arrivent sous l'effet de la pesanteur jusqu'aux réacteurs de traitement, où l'on procède à leur épuration et, une fois qu'ils ont perdu leur agressivité chimique, ils peuvent être pompés jusqu'à leur point de destination.

L'épuration s'effectue chimiquement et le dosage des réactifs est contrôlé automatiquement. Il s'agit là de la méthode la plus courante, quoiqu'elle ne permette aucun type de récupération des matériaux de valeur perdus.

Pour bien comprendre le fonctionnement d'une installation de traitement des eaux résiduaires, il s'avère nécessaire de commenter les différents mécanismes des réactions chimiques qui ont lieu lors des opérations d'épuration.

Toutes les formes de traitement peuvent se regrouper en opérations de destruction ou de transformation des composants des eaux résiduaires ou bien de leur séparation de celles-ci.

En ce qui concerne les effluents issus des industries de finitions de surfaces, les composants les plus importants sont de type organique, tels que les métaux lourds ou les anions, comme les cyanures ou les chromés. Dans bien des cas sont présentes des huiles et des graisses qu'il est parfois nécessaire de séparer. Par contre, la pollution de type bactériologique n'est pas un problème dans ce secteur industriel et, par conséquent, ne sera pas prise en considération.

** Traitement des cyanures*

Le cyanure est un composant très courant dans les courants résiduaires produits par les industries de traitement de surfaces. En effet, comme on l'a vu, ceux-ci se servent beaucoup des bains de déposition électrolytique de métaux ayant une teneur élevée en cyanure de potassium ou de sodium. On le trouve aussi dans les eaux des installations de trempe de fer ou d'acier, où sont utilisés les sels cyanurés fondus ou très concentrés. Les concentrations de cyanure libre que l'on peut rencontrer dans ces effluents oscillent entre 20 et 100 mg/l, voire davantage dans certains cas.

Il faut faire une distinction entre les cyanures simples, comme ceux de sodium ou de potassium, et les cyanures complexes de métaux lourds, comme le cuivre, le nickel, le zinc et d'autres. Les effluents résiduaires de la galvanotechnie contiennent des cyanures des deux types, et bien que les toxicités sont différentes et dépendent de l'espèce chimique, leur épuration est indispensable.

Le processus habituel consiste en l'oxydation de l'ion cyanure au moyen d'un agent oxydant. Le plus courant est l'hypochlorite de sodium, bien que l'on utilise aussi le chlore gazeux.

Les cyanures simples sont facilement oxydés par ces agents oxydants. Par contre les complexes métalliques présentent des réactivités différents en fonction du métal qu'ils contiennent. Les complexes de zinc ou de cadmium s'oxydent assez rapidement. Par contre, les complexes d'argent ou de nickel réagissent très lentement. Le complexe de cuivre se trouve entre les deux. Le temps de réaction dépendra donc des métaux présents dans les effluents. S'il n'en était pas ainsi, on courrait le risque que la réaction fût incomplète. De même, si les conditions de réaction ne sont pas complètement adéquates, la génération de cyanures métalliques insolubles peut se produire. Ces derniers peuvent se décanter et échapper ainsi à l'épuration.

Les complexes cyanurés de nickel nécessitent pour leur destruction des temps de réaction extrêmement longs, de l'ordre de 10 à 20 heures (impossible à atteindre dans la pratique). Étant donné que ces cyanures ne se forment que lorsque des eaux cyanurées et des eaux contenant du nickel se mélangent, il est très important de maintenir séparés ces deux types d'effluents.

La destruction du cyanure se fait par oxydation, en se transformant en cyanate (CNO). Les cyanates, en présence d'un excès d'oxydant, s'oxydent en donnant du dioxyde de carbone et de l'azote. Normalement, on considère que le cyanate ne présente pas trop de toxicité, celle-ci étant environ 1.000 fois plus petite que celle de l'ion cyanure. Le cyanate peut être hydrolysé en milieu acide en formant de l'ammonium et du carbonate. L'ammonium est plus toxique que le cyanate lui-même et, par conséquent, cette possibilité doit être évitée.

Si l'oxydation se fait avec de l'hypochlorite, il faut s'assurer que les conditions (pH, excès de réactifs, etc.) soient celles qui conviennent afin d'empêcher la libération dans l'atmosphère de chlorure de cyanogène, gaz volatil et aussi toxique que l'acide cyanhydrique.

L'épuration des cyanures complexes de métaux lourds se produit à des vitesses variables et, aussi, en plusieurs étapes. Ainsi, par exemple, dans le cas du cyanure complexe de cuivre et de potassium ($K_3Cu(CN)_4$) trois groupes de cyanure se détruisent relativement rapidement, alors que le quatrième est très résistant. Les cyanures complexes de fer ne sont pratiquement pas attaqués par l'hypochlorite et, de ce fait, on doit employer d'autres procédés comme le processus par précipitation en y ajoutant un sel de Fer(II), sous forme de "bleu de Prusse" (hexacyanoferrate(III) de fer(II)). Néanmoins, la toxicité de ces complexes d'hexacyanoferrate est réduite, par exemple, 200 mg/l de complexe correspondent à 0,1 mg/l de cyanure.

** Traitement de l'acide chromique*

L'acide chromique est un des composés les plus toxiques et dangereux des eaux résiduaires. En plus, son coût relatif est élevé par comparaison à d'autres produits utilisés en galvanoplastie et, à cause de cela, il existe un intérêt spécial pour sa récupération.

Le processus d'épuration le plus employé de nos jours consiste dans la réduction, en milieu acide, du chrome hexavalent en chrome trivalent, que l'on peut faire précipiter sous forme d'hydroxyde à l'étape de la neutralisation.

Pour la réduction d'un kilogramme d'acide chromique, théoriquement on a besoin de 156 kg de bisulfite de sodium et de 74 kg d'acide sulfurique. En réalité, la consommation de réactifs est très supérieure et peut atteindre jusqu'à 300% de la consommation théorique.

La précipitation du chrome trivalent se fait, normalement, après avoir réuni toutes les eaux résiduaires contenant des métaux lourds. À ce moment-là, on y ajoute un alcali, tel que la soude ou le lait de chaux, et c'est alors que se produit la précipitation des hydroxydes métalliques. La précipitation de l'hydroxyde de chrome se fait à un pH compris entre 7,8 et 8,5. À des pH supérieurs, il existe un danger de redissolution par formation de chromites dans le cas où la neutralisation se fait avec la soude. Ce risque est considérablement inférieur dans le cas de neutralisation au moyen du lait de chaux.

** Précipitation et séparation d'hydroxydes métalliques*

La séparation des métaux toxiques en dissolution par précipitation sous forme d'hydroxydes est une technique largement développée dans l'épuration. Ce processus s'effectue simultanément à la neutralisation de l'effluent, la marge des valeurs admises pour le pH de déversement étant approprié pour assurer la précipitation de la plupart des métaux communs.

La conception de cette phase du traitement demande une analyse préalable fort approfondie prenant en compte des concepts tels que la solubilité du métal suivant le réactif, le pH, la température, l'emploi d'agents coagulants et floculants, la précipitation d'espèces celantes, l'alcali à utiliser pour la précipitation, etc.

2.5 Courants résiduaire

2.5.1 Introduction

Le secteur des bains galvaniques génère des courants résiduaire qui procèdent essentiellement des pertes de matières premières issues de ses activités. Une partie de ces pertes de matières est délibérée, ce qui est le cas par exemple du vidage d'un bain de dégraissage qui n'agit plus, trop pollué par les huiles ; son remplacement par un nouveau bain génère une solution résiduaire, c'est-à-dire un courant résiduaire. Cependant, on obtient également des pertes de matières involontairement, ce qui est le cas avec les pertes dues à l'entraînement (la fine pellicule de liquide qui, après l'extraction des pièces hors du bain, mouille celles-ci et est entraînée avec elles). Dans ce cas, la nécessité de laver les pièces pour nettoyer l'entraînement génère des eaux résiduaire polluées par la matière perdue elle-même.

Nous vous présentons ci-dessous les courants résiduaire les plus significatifs du secteur.

2.5.2 Courants résiduaire générés

Voici à présent les courants résiduaire générique produits par les diverses activités liées aux procédés des bains galvaniques :

a) Stockage des matières premières :

- déchets générés par les matières détériorées dans le dépôt,
- pertes de produits chimiques au cours des opérations de manipulation et de transvasement par versement, fuites de produits dues à la rupture des bidons ou aux pertes dans les robinets,
- pertes de produit qui adhère aux parois des récipients et des bidons dans les opérations de vidage des récipients,
- récipients et bidons eux-mêmes, qui contiennent des restes de produit.

b) Opérations de processus :

- particules et poussières issues des opérations de pré-traitement mécanique,
- émission de solvants dans les opérations de dégraissage,
- bains de dégraissage impurs (huiles, graisses, pâtes à polir, etc.),
- bains de décapage pollués par le métal de base des pièces traitées,
- bains épuisés inactifs mais renfermant toujours des produits d'apport, bisulfite, anodisé, phosphatation, chromage, etc.,
- eaux résiduaire polluées par l'entraînement de liquide lors de l'extraction des pièces des divers bains de processus,
- émissions diffuses issues des bains opérant à une certaine température (>50°C),

- émission de gaz de combustion pour le chauffage des bains ou le séchage des pièces,
- égouttement du liquide des bains sur le sol, entre les cuves de processus ou en traversant un couloir dans les installations manuelles.

c) Activités auxiliaires :

- matériel absorbant sale et schlamms issues de l'entretien des bains,
- solutions concentrées issues de la régénération d'équipement de résines d'échange ionique ou d'osmose inverse,
- solutions concentrées et matériel sale de l'épuration des bains,
- solutions concentrées de l'épuration des émissions dans l'atmosphère,
- schlamms contenant des hydroxydes métalliques d'épuration des eaux résiduaires,
- solutions concentrées issues de la démétallisation des châssis,
- schlamms, etc., du nettoyage des conduites, des pompes, etc.,
- matériel filtrant pour le traitement des eaux usées ou impures, des résines, des filtres, etc.

Voici ce que nous obtenons en englobant et en classant l'ensemble de ces courants résiduaires en fonction des vecteurs de pollution communément acceptés :

Eaux résiduaires

- Éludation de la régénération des résines ou osmose
- Effluents dilués du lavage des pièces
- Solutions de bains concentrées épuisées ou polluées
- Solutions polluées de l'équipement de lavage des fumées.

Déchets industriels

- Bains de préparation des surfaces usées : dégraissages et décapages
- Bains de processus pollués ou épuisés : anodisés, neutralisations au bisulfite, bains de chromate pollués par des métaux lourds et du chrome trivalent
- Solutions de démétallisation
- Solutions et filtres de traitement des émissions dans l'atmosphère
- Bidons et récipients vides
- schlamms issus de l'épuration des effluents
- Matériel filtrant et absorbant divers : filtres, charbon actif, matériaux absorbants, chiffons sales, etc.
- Matériel utilisé pour le traitement de l'eau : résines d'échange ionique usées, filtres d'osmose inverse, etc.

Émissions dans l'atmosphère

- Émission de poussières et de particules issues des opérations de pré-traitement mécanique (grenailage, polissage, etc.).
- Émissions diffuses procédant des bains (pré-traitements et processus), essentiellement constituées de vapeur d'eau issue des solutions opérant à une certaine température (>50 °C)
- Émissions de composés organiques volatiles des bains de pré-traitement des pièces.
- Vapeurs issues du chromage des pièces renfermant de l'acide chromique
- Gaz polluants issus des chaudières de combustion utilisées pour chauffer les bains ou sécher les pièces.

Le tableau suivant donne des informations sur l'importance relative des trois vecteurs analysés en fonction de leur problématique environnementale et donc sur les efforts qui doivent être fournis par le secteur industriel :

Courants résiduaire	Importance Relative (%)
Eaux résiduaire industrielle	50
Déchets industriels	40
Émission dans l'atmosphère	10

Tableau 3 : Source : Auteur

2.5.3 Résumé des courants résiduaux générés

DESCRIPTION DU COURANT RÉSIDUAIRE	SOURCE	DESCRIPTION
VECTEUR : Eaux		
Effluents dilués	Lavage des pièces	Liquides et bains de traitement et revêtement des métaux (galvanisation, anodisation, phosphatation, décapage)
Solutions concentrées de processus (si traitées par l'entreprise en interne)	Bains de processus épuisés ou pollués	Liquides et bains de traitement et revêtement des métaux (galvanisation, anodisation, phosphatation, décapage)
Éludations de régénération	Solutions concentrées de la régénération des résines d'échange ionique et d'osmose inverse	Éludations de la régénération des résines d'échange ionique
Solutions concentrées des émissions dans l'atmosphère	Eaux polluées des systèmes d'épurations des gaz et des vapeurs	Liquides et bains non-cyanurés chromiques Liquides et bains non-cyanurés non-chromiques
VECTEUR : Déchets		
Solvants halogénés sales	Solvants halogénés (trichloroéthane, perchloroéthylène, etc.) sales contenant des huiles, des graisses, etc.	Solvants, mélanges bruts renfermant des solvants et des liquides organiques halogénés
Solutions concentrées de pré-traitements (en cas de gestion externe)	Bains de préparation épuisés ou pollués (dégraissages alcalins et décapages acides) contenant des huiles et des métaux	Liquides et bains non-cyanurés non-chromiques Solutions acides décapantes, de passivation, dégraissants sans acide chromique Solutions alcalines décapantes, de passivation, dégraissants. Autres solutions décapantes, de passivation, dégraissants.
Solutions concentrées de processus	Bains galvaniques épuisés ou pollués (anodisation, phosphatation, chromage, bisulfite, etc.).	Liquides et bains non-cyanurés chromiques Liquides et bains non-cyanurés non-chromiques Solutions acides décapantes, de passivation
Solutions alcalines avec tensioactifs	Solutions alcalines avec tensioactifs sales renfermant des graisses, des huiles, etc. (dégraissage chimique)	Solutions alcalines décapantes, de passivation, dégraissants
Solutions concentrées pour entretien des installations	Solutions utilisées pour la démétallisation des châssis	Liquides et bains non-cyanurés chromiques Liquides et bains non-cyanurés non-chromiques Autres solutions décapantes, de passivation, dégraissants
Matériel absorbant pour le traitement des émissions dans l'atmosphère	Matériel de filtration des COV Matériel de filtration des émissions dans l'atmosphère avec métaux lourds	Matériaux absorbants, matériel de filtration, chiffons de nettoyage et vêtements de protection pollués par des métaux lourds
Bidons et récipients vides	Bidons en plastiques et récipients métalliques ayant contenu du matériel	Récipients et emballages en plastique Récipients et emballages métalliques
Schlamms issus du traitement des effluents	Schlamms issus du traitement physico-chimique des eaux résiduaux	Boues de traitement des effluents (pré-traitements et épurateurs)

DESCRIPTION DU COURANT RÉSIDUAIRE	SOURCE	DESCRIPTION
Boues de traitement des effluents	Issues de la sédimentation, de la décantation, de la filtration, de la compression	Boues de traitement des effluents (Issus de l'épuration des eaux résiduaires générées avant tout traitement chimique et séparées et traitées de façon adéquate)
Matériel filtrant usé (traitement de l'eau)	Charbon actif et résines d'échange ionique usés	Résines d'échange ionique Charbon actif
Matériel filtrant et absorbant (divers)	Matériel de la filtration et de l'entretien des bains : filtres, chiffons, etc.	Déchets inorganiques contenant des métaux non-spécifiés précédemment Matériaux adsorbants, matériel de filtration, chiffons de nettoyage et vêtements de protection pollués par des métaux lourds
Particules des pré-traitements mécaniques. Sables	Grenailage, polissage mécanique, etc.	Grenaille, limailles, déchets et particules métalliques.
VECTEUR : Émissions dans l'atmosphère		
Vapeurs d'eau de processus	Vapeurs des cuves opérant à une certaine température (>45-50 °C)	
Vapeurs contenant de l'acide chromique	Vapeurs contenant des gouttes d'acide chromique issu du chromage	
Gaz polluants des sources de combustion	Gaz issus de la combustion dans le chauffage des bains ou le séchage des pièces.	

Tableau 4

Nous allons à présent détailler les divers courants résiduaire décrits pour les différents procédés de production.

Pré-traitement mécanique

Las opérations de grenailage, de polissage mécanique et similaires produisent principalement une émission de poussières et de particules métalliques dans l'atmosphère ; ces matières sont la plupart du temps recueillies via des systèmes de filtrage, et on obtient un déchet industriel. D'autre part, le matériel abrasif utilisé, une fois usé par friction avec les pièces métalliques, se transforme également en déchet industriel, qu'il faut alors gérer.

Dégraissage des pièces

Le courant résiduaire généré change selon le type de dégraissage utilisé. On distingue essentiellement, en raison de leur degré d'implantation, deux types de dégraissage majoritaires : le dégraissage via solvants halogénés (TRI, PER, etc.) et le dégraissage aqueux en milieu alcalin.

Les solvants halogénés sont pollués par les huiles, les graisses, les pâtes de polissage, etc. dont sont couvertes les pièces avant le processus galvanique. S'ils ne sont pas récupérés via la distillation, ces solvants sales se transforment en déchet hautement polluant généré avec une certaine périodicité. De même, l'utilisation de ces solvants génère une émission de composés volatiles organiques (COV) dans l'atmosphère.

En ce qui concerne les dégraissages aqueux en milieu basique, à part la pollution mentionnée due aux huiles et aux graisses, les composés polluants les plus courants sont les sels sodiques (hydroxydes, carbonates, phosphates et métasilicates) ainsi que les tensioactifs et les complexants (EDTA, NTA, etc.) de nature organique. Auparavant – mais c'est encore parfois le cas aujourd'hui – on ajoutait également au bain du cyanure sodique afin de renforcer son pouvoir dégraissant ; grâce aux améliorations technologiques au niveau de la formulation de ces bains, cette pratique n'a aujourd'hui presque plus cours. Si le déchet concerné est généré avec une plus grande périodicité que les solvants halogénés, l'industriel peut par contre l'épurer dans son usine d'épuration (si l'installation le permet), car sa gestion est beaucoup plus économique. Un bain chaud générera également une émission diffuse de vapeur d'eau. Il existe différents systèmes de quantification de ces pertes diffuses d'eau par évaporation : nous vous proposons dans ce cas précis d'utiliser le tableau suivant, qui présente quelques valeurs d'évaporation par mètre carré et par heure en fonction de la température de la solution de travail et de sa densité. Pour les données qui ne correspondent pas, il est possible de procéder à une extrapolation.

Densité de la solution	Exemple de solution	Température (°C)	Valeur d'évaporation (l.m ² /h)
1	Eau	50	1
		70	9
		90	23
1,2	Bain de nickel	50	0,8
		70	7
		90	20
1,4	Bain de chrome dur	50	0
		70	2
		90	5

Tableau 5

Si l'installation possède un système d'aspiration de gaz ou d'agitation par air de la solution, il faut augmenter ces valeurs d'évaporation de 50%.

Décapage

La grande majorité des décapages consiste en des dilutions – plus ou moins concentrées, même si la concentration à 30% est prédominante – d'un acide dans l'eau : acides chlorhydriques et sulfuriques comme substances principales, et acides nitriques, phosphoriques ou fluorhydriques comme substances secondaires.

Le déchet est généré - par charges – lorsque, en attaquant le métal de base en train d'être décapé, une partie de celui-ci se dissout dans l'acide, le pollue, et donc lui fait perdre sa fonction décapante. C'est à ce moment qu'est généré le déchet qui, en raison de ses caractéristiques, peut être traité par l'industriel lui-même dans des usines d'épuration de type physico-chimique. Sa génération est plus sporadique que celle qui correspond aux dégraissages aqueux alcalins.

Processus galvaniques

Les polluants générés dépendent du type de processus, de la composition et de la concentration, etc. Nous pouvons classer les polluants des processus galvaniques selon les principales catégories ci-dessous :

- pour les solutions opérant à plus de 50°C, émissions diffuses de vapeur d'eau dans l'atmosphère et particules de chrome dans les bains de chromage,

- émissions de gaz de combustion issus des chaudières utilisées pour chauffer les bains de processus et/ou sécher les pièces.
- bains de type acide : nickelage, zingage acide, cuivre acide étamé, aluminium anodisé, phosphatation de fer, passivation blanche, entre autres ;
- bains de type alcalin : zingage alcalin exempt de cyanures, cuivre alcalin exempt de cyanures, embrunissage comme principaux ;
- bains de type alcalin cyanuré : zingage cyanuré, cuivre cyanuré doré, argenture, etc.;
- bains de type acide chromique : chromage et passivation jaunes, comme plus étendus.

On trouvera en fonction de la composition du bain le métal lourd correspondant à celui-ci (Ni, Cu, Zn, Fe, Al, Sn, Au, Ag, etc.), avec les anions qui l'accompagnent sous forme de sel (Cl-, SO₂+4, PO₃+4, CO₃+2; OH-, etc.). Dans le cas des bains cyanurés, on trouvera en plus du métal correspondant et des divers sels la forme CN-, dans ses différentes expressions d'équilibre dynamique. On trouvera Cr⁶⁺ dans la majorité des bains de chromate.

Cette forme chimique de classification des courants résiduels générés dans le processus galvanique possède une correspondance physique qui consiste en les courants suivants :

- dilués
- concentrés

Si les dilués se réfèrent essentiellement aux eaux de lavage entre les processus de traitement, les concentrés correspondent au bain lui-même ou à un lavage étanche concentré que l'entreprise a besoin de rénover.

Les dilués sont généralement générés en continu, tout au long de l'activité de recouvrement, pendant le lavage des pièces entre les divers bains de processus, alors que les concentrés sont produits par charges, en fin de durée de vie utile du bain ou lorsque le lavage étanche atteint la concentration admissible maximum.

Stockage de matières premières

Comme nous l'avons vu, une bonne partie des courants résiduels générés dans cette zone de l'entreprise le sont en raison de conditions de stockage et/ou de fonctionnement relativement peu adéquates, c'est-à-dire, dans la majorité des cas, en raison de pratiques environnementales peu conseillées. Parmi ces pratiques, soulignons la mauvaise gestion des stocks, des systèmes déficients de stockage et/ou de transvasement de matériel, une formation médiocre du personnel responsable du dépôt et des informations rares, etc. Il y a en conséquence génération de produits périmés, de

décharges accidentelles corrigées de façon non-adéquate, de pertes lors des transvasements, de récipients vides mal égouttés contenant des restes de produit, etc. Tous ces éléments se transforment en un courant résiduaire qu'il faut gérer de manière adéquate.

Activités auxiliaires

Soulignons, au sein des opérations auxiliaires, les plus significatives concernant la génération de courants résiduaires :

- épuration des eaux résiduaires : produit une quantité de schlamms, sous forme d'hydroxydes métalliques, qui peut être très importante selon les cas (c'est le cas de l'aluminium anodisé). L'entreprise gère habituellement au sein du traitement lui-même une bonne partie des courants résiduaires – sous forme liquide – qu'elle a généré dans le processus galvanique, c'est-à-dire des eaux de lavage diluées et des solutions ou bains épuisés concentrés. En fonction du type de bain dont dispose l'entreprise, on trouve également des cyanates et des hydroxydes de chrome.
- opérations de nettoyage et entretien des bains : on obtient ici un matériel filtrant sale mais également une matière filtrée sous forme de boues, sédiment ou matière adsorbante polluée ;
- démétallisation des châssis : opération très polluante car les solutions généralement utilisées renferment des produits complexants, cyanurés ou des acides difficiles à traiter par la suite – ce qui est par exemple le cas de l'acide nitrique - ; en outre, la situation est encore compliquée par le fait que le métal extrait du châssis est fortement concentré.
- d'autres types de matières provenant de l'équipement de traitement de eaux - résines d'échange ionique, osmose inverse, etc. – génèrent de façon très occasionnelle des déchets solides exigeant un traitement postérieur : résines usées, charbon actif pollué, matériel filtrant (par exemple les membranes), etc.

Les pages suivantes présentent quelques schémas résumant les informations fournies dans ce chapitre.

DIAGRAMME DE FLUX. STOCKAGE DE MATIÈRES

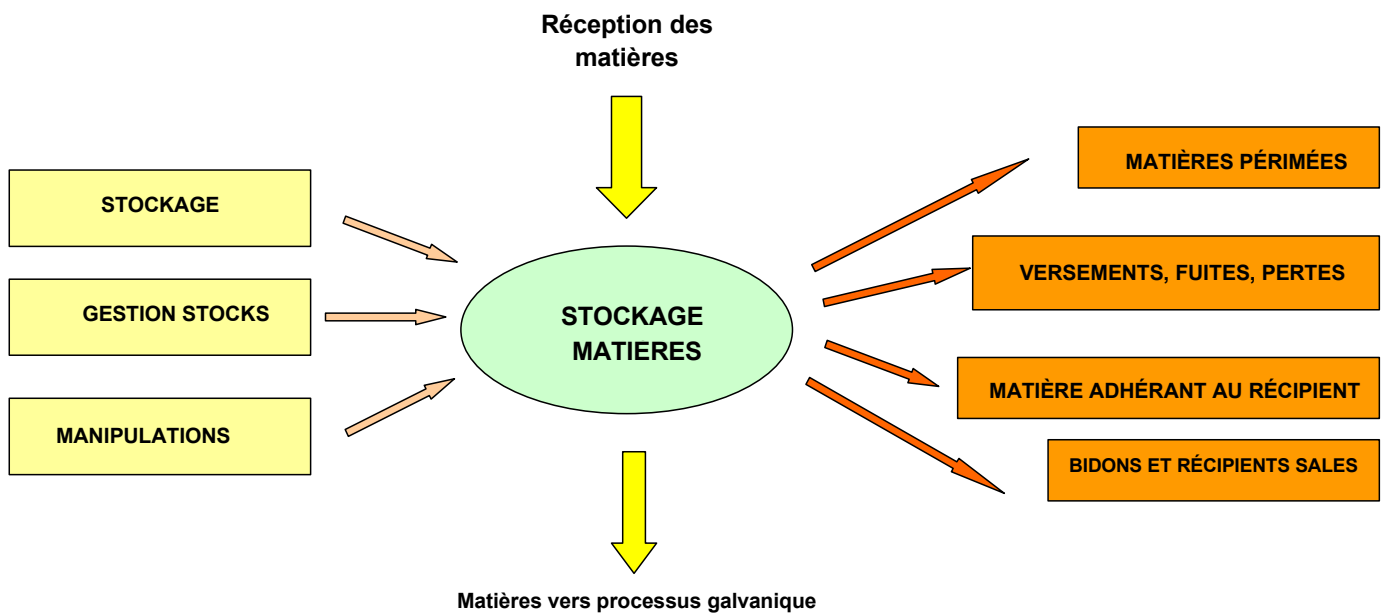


DIAGRAMME DE FLUX. PROCESSUS GALVANIQUE

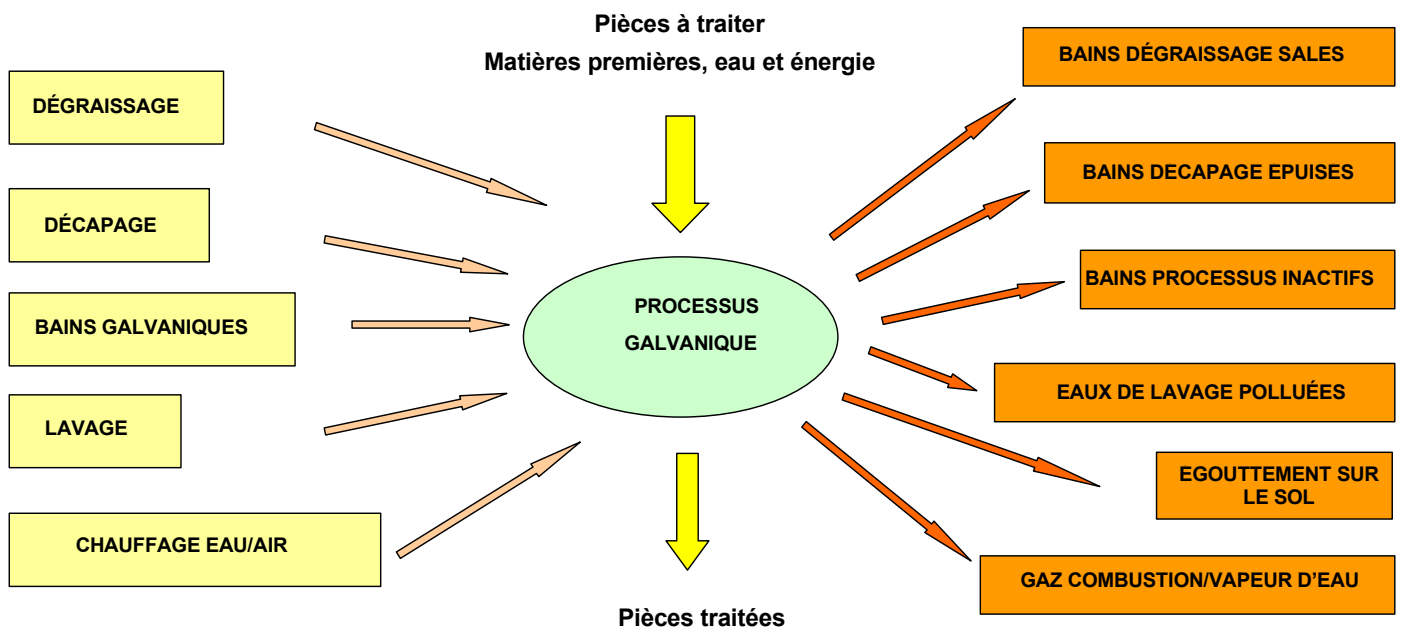
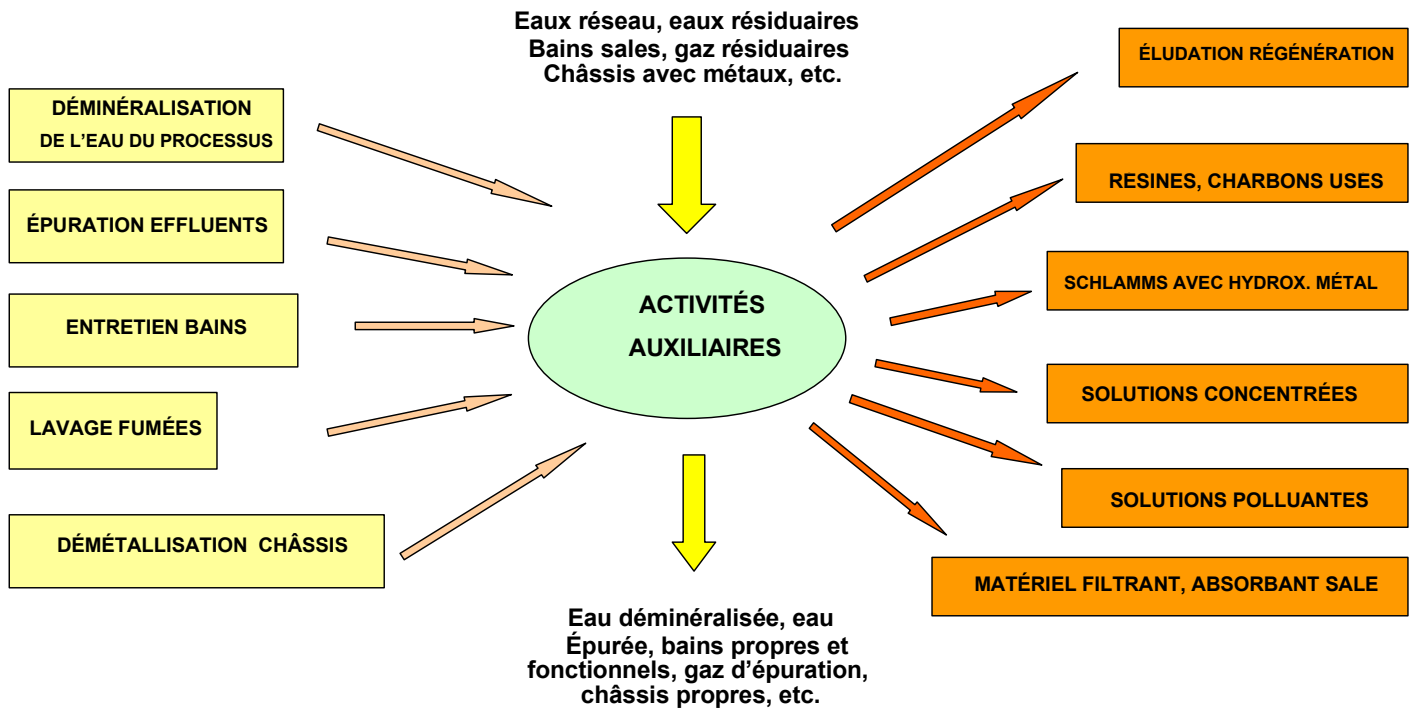


DIAGRAMME DE FLUX. ACTIVITÉS AUXILIAIRES



3. LES ALTERNATIVES DE PRÉVENTION DE LA POLLUTION

La *prévention* de la pollution à la source signifie avant tout éviter la génération de celle-ci. Mis à part les améliorations environnementales, l'implantation d'une politique de prévention de la pollution se traduit par une diminution du coût de la gestion de l'environnement, une conception des installations de traitement des courants résiduaire dotée d'un dimensionnement correct, l'amélioration de l'image de l'entreprise et l'apport d'un niveau de protection supérieur des personnes et de l'environnement.

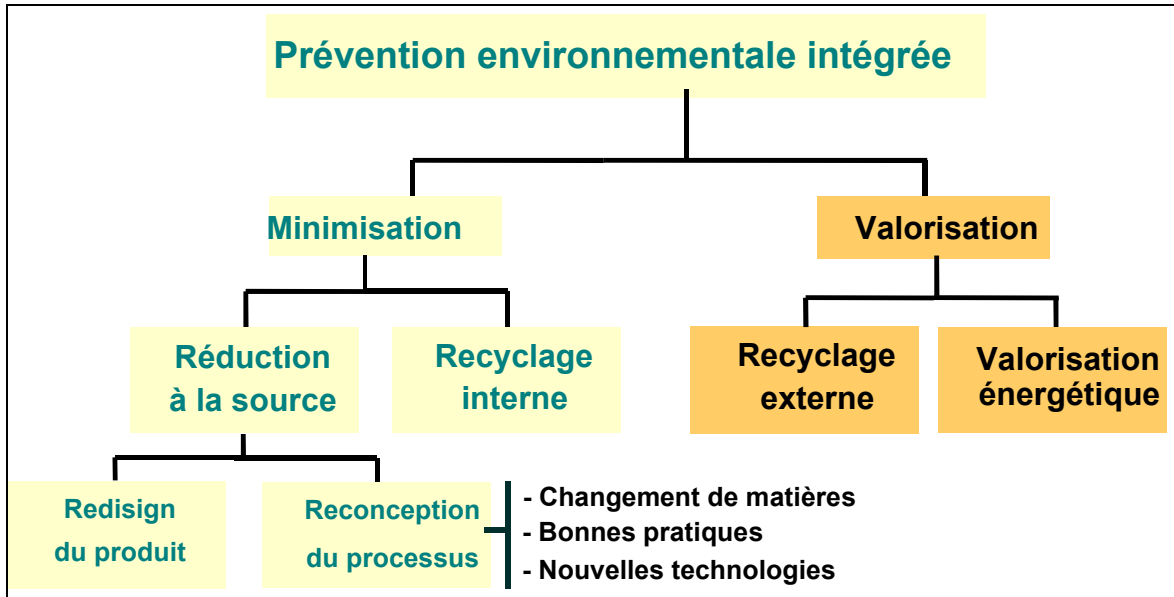
La *minimisation* des déchets, des eaux résiduaire et des émissions polluantes dans l'atmosphère est un concept similaire à celui de la prévention de la pollution à la source, qui peut être défini comme la combinaison de la réduction et du recyclage à la source.

La *réduction à la source* consiste à éviter ou à diminuer les courants résiduaire (ou leur degré de dangerosité pour l'environnement) avant leur génération, au moyen de modifications dans le processus de fabrication, de l'application de bonnes pratiques, du changement de matières et/ou de produit ou de l'utilisation de technologies plus respectueuses de l'environnement.

Une fois appliquées les formes viables de réduction à la source, on envisage la seconde option, le *recyclage à la source*, c'est-à-dire la réutilisation du courant résiduaire qui, inévitablement, s'est produit dans le processus ou établissement qui l'a généré.

Une politique environnementale correcte prendra en compte les traitements en fin de ligne et/ou la gestion du courant résiduaire seulement après analyse et/ou application des options de minimisation viables pour l'entreprise.

La figure suivante schématise le concept de minimisation ou prévention à la source :



L'étude et la connaissance du secteur de la galvanoplastie mettent en évidence une série de facteurs qui provoquent un mauvais fonctionnement des entreprises en question et une gestion de l'environnement pauvre.

L'objet principal de cette troisième section est de donner une série d'alternatives aux pratiques actuelles. Ces alternatives s'orientent vers une réduction à la source des courants résiduels et vers une gestion efficace des déchets qui sont inexorablement générés. La réduction des entraînements, le remplacement de matières premières par d'autres potentiellement moins polluantes, la réutilisation des eaux, le traitement de ces dernières et les bonnes pratiques professionnelles des ouvriers feront, dans les sous-sections suivantes, l'objet de notre étude.

3.1 Réduction de la pollution à la source

3.1.1 Substitution de matières premières et de procédés

La substitution de matières premières est une des alternatives employées afin de réduire la génération de courants résiduels. Dans bien des cas, on utilise des matières premières hautement polluantes lors des procédés de préparation de la pièce ou dans les bains de processus. Pourtant, il y a des alternatives à ces matières, donnant déjà de bons résultats, basées sur des produits chimiques qui n'attaquent pas l'environnement comme le font les produits traditionnels employés jusqu'à présent et qui, en même temps, réalisent la même fonction ou donnent les mêmes résultats que ceux-ci. Voyons, pour chaque bain, l'alternative disponible.

- Dégraissage

L'utilisation de différents solvants chlorés, tels que le trichloroéthane, le trichloroéthylène, le perchloroéthylène, etc., tend à disparaître progressivement, du fait de leurs impacts sur la santé des personnes et sur l'environnement.

Ce fait a provoqué l'apparition de différents produits alternatifs par des maisons commerciales dédiées à l'approvisionnement de matières premières.

C'est un fait que, dans certains cas, le propre substitut du solvant chloré améliore son activité, celui-ci étant alors plus efficace dans la tâche de dégraissage.

Parmi toute la gamme de produits alternatifs, il convient de citer tout d'abord **les mélanges à base de p-cymène**. Ces produits sont, en effet, parfaitement efficaces dans le dégraissage et, en même temps, sont composés de produits tensioactifs entièrement biodégradables. Il s'agit d'un terpène monocyclique (1,8 (9) P-Menthadiène) ayant des caractéristiques qui le rendent apte à de nombreuses applications : production d'arômes et de parfums, formulation de dissolvants et de détergents, substitut, dans quelques cas, des chlorofluorocarbonates, substitut aussi du 1,1,1 trichloroéthane, trichloroéthylène et du perchloroéthylène, détergents dégraissants pour aciers et métaux en général, etc. Comme caractéristiques principales, on peut dire qu'il n'est pas toxique, qu'il est entièrement biodégradable, qu'il n'altère pas la couche d'ozone et ne nuit pas à l'atmosphère, entre autre. Comme inconvénient, il s'utilise par voie humide, il peut être prohibitif en fonction de ses applications postérieures et son coût est élevé, ce qui rend difficile son utilisation.

La seule difficulté que présente ce substitut pour son utilisation est qu'un équipement automatique d'arrosage du produit par aspersion et de mouvement des pièces à dégraisser est indispensable, afin de favoriser l'effet mécanique du dégraissage.

Depuis peu, il existe la possibilité d'utiliser des hydrofluoroéthers (HFE), dont les caractéristiques dégraissantes sont bonnes ; en plus, la pièce sort sèche. Les principales caractéristiques de ces produits sont : faible toxicité, stabilité thermique et chimique, faible viscosité et tension superficielle, excellents agents mouillants, bonne pénétration, faible solubilité dans l'eau, ininflammables, sans point d'ignition. Le produit, de même que les solvants chlorés, peut être acquis conjointement avec un équipement de distillation qui permet la récupération de la majeure partie des liquides résiduels générés. À l'heure actuelle, le coût de ces produits est fort élevé par rapport aux solvants halogénés. Bien que l'investissement initial puisse s'avérer important, son amortissement en fait une option viable économiquement.

Pour ce qui est de l'autre grand groupe de dégraissages, celui des dégraissages chimiques et électrolytiques, il convient de citer aussi la limitation dans l'emploi de dégraissages contenant des niveaux élevés de phosphates ainsi que des dérivés de l'EDTA afin d'éviter la formation de complexes solubles résultant de ces composés et des métaux. La problématique réside dans le fait qu'il convient de libérer le métal du complexe formé pour sa précipitation ultérieure. Les conditions nécessaires pour cette libération sont telles qu'elles rendent le processus d'épuration non-viable, les conditions requises, entre autres, étant un temps de traitement long, ce qui accroît donc outre mesure le coût d'épuration des eaux résiduaires. Comme alternative, techniquement viable, nous proposons l'utilisation du **gluconate de sodium**, composé entièrement biodégradable et qui est un type de complexe métallique moins puissant, ce qui permet d'atténuer la difficulté de la précipitation postérieure des métaux complexés.

- Décapage

Quant aux **décapages**, on peut dire que la tendance habituelle est à utiliser de l'acide chlorhydrique. Celui-ci augmente la vitesse d'attaque du métal lorsque la concentration du fer dissous augmente. Cela entraîne un contrôle difficile de cette vitesse d'attaque. L'alternative la plus commune est la **substitution d'acide sulfurique à cet acide**, qui permet un contrôle de l'attaque du métal à travers le suivi de la température du bain.

- Nickelage électrolytique

Il n'existe, pour le moment, **aucun substitut alternatif au processus de nickelage électrolytique** ; les seules mesures que l'on peut mettre en œuvre émanent de la rationalisation des lavages ultérieurs au processus et de sa récupération dans la solution de travail.

- Processus de chromage

Dans la bibliographie existante à ce sujet, la solution alternative proposée est **l'emploi du chrome trivalent plutôt que de l'hexavalent**, la toxicité du premier étant considérablement inférieure à celle du second.

Le problème entraîné par l'utilisation de la forme trivalente au lieu de l'hexavalente est la formation de dépôts sombres à la surface de la pièce baignée, ce qui empêche l'obtention de la qualité souhaitée du produit.

Voici d'autres options pouvant être utilisées si la substitution du chrome hexavalent par du trivalent n'est pas possible :

- l'utilisation de techniques d'évaporation permet de récupérer une plus grande quantité d'eau dans les rinçages de récupération et donc de rendre une plus grande quantité de produit. Augmenter le nombre consécutif des rinçages de récupération permet d'éviter ou de réduire au minimum le rejet d'eau contenant du chrome.
- l'utilisation de résines d'échange ionique avec la récupération postérieure de l'élution sous forme d'acide chromique concentré.

- Bain de cuivrage

Entre toutes les possibilités existantes parmi les bains de cuivrage, la plus répandue de par sa performance continue d'être le bain alcalin cyanuré. Ceci étant, il est vrai que, **pour certaines applications concrètes, l'on peut remplacer le bain cyanuré par une option (alcaline ou acide) non cyanurée**. Toutefois, il faut analyser cas par cas et faire des essais pour voir si l'effet obtenu sur la pièce correspond à la qualité recherchée.

- Bains de laiton

Actuellement, **il n'y a pas d'alternative viable à l'utilisation de composés cyanurés** dans la formulation des bains de laiton.

Par conséquent, il conviendra de mettre en œuvre des mesures de minimisation telles que la réduction de la concentration des composés cyanurés dans le bain et l'incorporation des rinçages de récupération, ainsi que des mesures de correction consistant en l'oxydation des cyanures et la précipitation des métaux.

- Bains d'argent

Dans ce cas-là, on **rencontre le même problème que dans le cas du bain de laiton**, la seule alternative possible étant l'oxydation des cyanures et la précipitation et récupération ultérieure de l'argent.

- Bains d'or

Du fait qu'il s'agit d'un métal d'un coût élevé, on peut dire qu'**en ce moment il est déjà possible de récupérer toutes les solutions usagées** intervenant dans le processus de production, que ce soit par précipitation ou au moyen de résines d'échange ionique.

De cette façon, le cyanure d'or et de potassium (AuKCN_2), que ce soit en milieu acide ou alcalin, est dissocié afin de permettre le dépôt de l'or, tandis que la petite quantité de cyanure libre qu'il reste par suite du processus s'oxyde automatiquement à l'anode de la cuve électrolytique, en minimisant ainsi la contamination provoquée par ce composé tellement toxique.

Pour obtenir la précipitation de l'or restant dans les cubes de lavage, en le séparant du reste de la molécule de cyanure, on utilise généralement du zinc en poudre, de l'aluminium ou du dithionate de sodium, qui agissent en cassant la molécule de cyanure d'or et font précipiter l'or. Le peu de cyanure libre restant peut s'oxyder ultérieurement sans aucun problème.

- Processus de zingage

Comme on l'a vu auparavant, le dépôt du zinc s'obtient par trois voies :

- voie acide,
- voie alcaline cyanurée,
- voie alcaline sans cyanure.

Évidemment, les trois procédés impliquent la formation de composés différents suivant la voie employée. Par conséquent, il est intéressant de proposer les procédés qui donnent le moins de composés et moins toxiques, et dont le traitement ultérieur est plus aisé.

Suivant ce critère, l'état actuel de la technique penche en faveur du remplacement des procédés cyanurés par des **procédés acides ou alcalins sans cyanures** (du fait de la toxicité du cyanure et de ses complexes). Dans ce sens, on trouve déjà sur le marché, depuis quelques années, ces alternatives qui offrent une grande efficacité technologique.

Ainsi donc, les deux autres alternatives techniquement viables à prendre en considération sont le **zingage acide et le zingage alcalin non cyanuré**. Ensuite, on décrit quelles sont leurs possibilités pour ce qui est de la prévention de la pollution à la source.

Lors du **processus de zingage acide** les principaux polluants produits sont les chlorures, l'acide borique et l'ammonium.

D'entre tous, l'ammonium est un composé que l'on peut à ce jour éliminer des formulations de ce processus : il s'agit de **substituer le chlorure de potassium au chlorure d'ammonium**, ce qui permet de réduire considérablement la pollution du processus.

Quant au remplacement du processus de zingage acide par une autre alternative, cela n'est pas possible à ce jour. De plus, du fait que le rendement cathodique avoisine dans ce cas le 100 %, cela rend ce processus indispensable dans le traitement de l'acier trempé et du matériau synthétisé. En effet, ces matériaux sont très difficiles à traiter avec des procédés de faible rendement cathodique, à cause de la grande formation d'hydrogène qui se dépose sur le matériau, rendant ainsi impossible le dépôt du zinc.

L'autre type de processus, celui du **zingage alcalin sans cyanure**, a représenté un grand progrès technologique. Grâce à sa formulation à base d'oxyde de zinc et d'hydroxyde de sodium, on peut l'utiliser alternativement dans beaucoup d'industries, alors qu'en même temps il fait diminuer considérablement le degré de pollution du processus (par comparaison au cyanuré).

De plus, le traitement ultérieur des eaux résiduaires est beaucoup simple et rapide que dans le cas du cyanuré, car on peut procéder à l'épuration avec un simple ajustement du pH à 9,2-9,5, en se servant d'acide sulfurique dilué ou d'hydroxyde de calcium.

- Passivation du zinc

Dans la formulation employée actuellement pour passiver le zinc plusieurs composés acides interviennent, tels que : chromique, chlorhydrique, sulfurique, nitrique, acétique, phosphorique ou formique. Ces composés produisent différentes finitions chromatiques sur la surface du zinc.

La plupart des procédés de passivation utilisent le chrome VI comme composant de base de ces passivations.

Ces solutions doivent être changées fréquemment et, outre les polluants déjà mentionnés, on peut mettre l'accent sur les suivants, comme étant les plus remarquables : Zn, Fe et Cr III, qui proviennent de l'attaque des pièces zinguées et de la réaction d'oxydoréduction du Cr VI au Cr III.

Une fois de plus, on rencontre un élément spécialement polluant comme c'est le cas du Cr VI. Malheureusement, malgré les nombreux efforts exercés pour le remplacer, il n'existe aucun élément qui puisse le faire efficacement, du point de vue de la qualité esthétique du produit et non du point de vue des propriétés qu'il confère à la surface⁵.

- Oxydation anodique de l'aluminium

En ce qui concerne ce processus, nous ferons la distinction entre les deux phases qui le composent : préparation superficielle et éloxalage proprement dit.

Les alcalis, les phosphates, les tensioactifs, l'aluminium, les huiles et les graisses figurent parmi les principaux polluants rencontrés.

Lors du processus de dégraissage et de satinage de l'aluminium, une bonne partie des polluants décrits sont produits, et il est difficile à ce jour d'indiquer un processus alternatif moins contaminant. Une alternative possible pourrait être l'application des bains de dégraissage avant traitement par un équipement de séparation et de concentration des huiles.

Lors de l'éloxalage de l'aluminium une partie de celui-ci se dissout progressivement dans le propre bain de processus. Il arrive un moment où sa concentration est si élevée que le rendement du bain diminue considérablement, raison pour laquelle celui-ci doit être dilué et reconcentré avec de l'acide sulfurique. Cela est à l'origine de deux sortes de polluants principaux : l'acide sulfurique et le sulfate d'aluminium.

La seule technique applicable à ce jour, totalement éprouvée et vérifiée, est l'**utilisation de résines d'échange ionique ou de retard ionique** permettant de séparer l'aluminium de l'acide sulfurique, qui peut retourner au réservoir de travail.

⁵ Il faut dire qu'il y a quelques années quelques pays européens ont commencé à **employer le Cr III** en tant qu'alternative, principalement pour les produits ne présentant pas un composant esthétique important.

Au surplus, la future limitation de l'emploi du Cr VI dans les revêtements de passivation dans le secteur européen de l'automobile favorisera la recherche d'alternatives, parmi lesquelles l'emploi du Cr III s'impose fortement.

- Électropolissage

Les procédés d'électropolissage de l'acier inoxydable se basent sur l'utilisation d'acides minéraux concentrés. À l'heure actuelle, il n'existe pas de procédés alternatifs moins polluants. Néanmoins, les courants résiduels générés, autant pour ce qui est des composés que de leur volume, ne posent pas de problème technique difficile à résoudre.

Les mesures à proposer sont basées sur l'amélioration des systèmes d'épuration moyennant la neutralisation des effluents générés avec de l'hydroxyde de calcium. Ce traitement permettra de réduire autant la pollution par métaux lourds (fer, chrome, nickel, etc.) que la présence d'anions non désirés (sulfates et phosphates).

- Cadmiage

Dans beaucoup de pays, le processus de cadmiage a été substitué pour des raisons de santé, car son effet carcinogène a été démontré. L'alternative a consisté en l'utilisation de procédés d'étanage et d'argenture, qui procurent les caractéristiques de conductivité et soudabilité nécessaires. On emploie également d'employer des bains de zinc alliés pour obtenir un effet anticorrosion.

Les autres alternatives, en dehors du secteur de bains galvaniques, sont les traitements thermiques voire la métallisation à vide qui nécessitent néanmoins des installations spécifiques.

3.1.2 Bonnes pratiques

3.1.2.1 Allongement de la durée de vie des bains

L'industriel du secteur de traitement de surfaces doit analyser les bains de processus dont il dispose et, en fonction de l'évolution technique des fabricants, voir si ceux dont il se sert sont les plus appropriés à ses besoins ou s'ils ne le sont pas. Dans cette analyse, il doit prendre en considération :

- la gamme technologique (succession d'opérations à réaliser),
- le type de bain à employer.

Une fois qu'il aura décidé du type de bain à employer, compte tenu aussi de la problématique écologique que celui-ci puisse supposer, dans la gestion des bains il doit tenir compte des aspects clés suivants :

- choisir les concentrations en sels les plus basses possibles et compatibles avec les objectifs prétendus quant aux finitions.
- les ajustements en sels de produits devront être faits, suivant des critères objectifs, en fonction de la consommation électrique lors du processus (à plus grand ampérage, plus grande consommation de sels) et d'après des analyses périodiques de la concentration des bains. Parmi les analyses à réaliser, il faut faire les suivantes, qui sont considérées fondamentales :
 - cyanures libres, carbonates ;
 - acidité totale et libre ;
 - alcalinité totale et libre ;
 - pH, chlorures, ... ;
 - certains métaux : Ni, Cu, Cr⁶⁺...
- Pour chaque bain, il est recommandable de disposer de sa fiche de contrôle sur laquelle figureront les renseignements suivants :
 - formule constitutive du bain ;
 - résultats des analyses ;
 - ajustements effectués ;
 - opérations d'entretien des bains.
- Pour ce qui est de l'entretien des bains, on peut noter les renseignements suivants d'ordre générique :
 - filtration sur charbon actif
 - oxydation avec peroxyde d'hydrogène
 - précipitation d'impuretés et filtration ultérieure
 - élimination régulière des pièces et des outils qui seraient tombés dans le bain de processus
 - élimination d'impuretés sur cathodes inertes (par exemple, d'acier inoxydable), notamment pour les métaux indésirables qui contaminent le bain

- retrait des anodes lorsque le bain n'est pas utilisé
- À la sous-section 3.2.1. de ce rapport, on expose en détail la manière d'allonger la durée de vie des deux bains de processus qui doivent être le plus fréquemment vidés et reformulés : le dégraissage et le décapage.

3.1.2.2 Réduction d'entraînements

L'entraînement est la quantité de liquide que l'on extrait involontairement d'une cuve au cours de l'opération d'extraction des pièces entre deux étapes d'un quelconque processus de galvanoplastie. Normalement, on le mesure en litres/heure (l/h), quoique l'on puisse également le mesurer en fonction de la production (l/dm², par exemple).

Il s'agit de la source la plus significative de perte de matières premières issues des bains de processus et de la contamination des eaux de lavage⁶. On peut affirmer que le volume de boue généré est directement proportionnel au niveau de contamination de l'eau de lavage contaminée, c'est-à-dire, au niveau d'entraînement qui a lieu.

En dépit de tout ce qui a été dit jusqu'à présent, il faut indiquer que l'entraînement n'implique pas uniquement des aspects négatifs pour l'entreprise (consommation d'eau de lavage, perte de matières premières et génération de polluants), mais présente aussi un aspect bienfaisant : l'entraînement ; de la même façon que celui-ci emporte des matières premières du bain, il entraîne aussi d'éventuels polluants présents dans ce dernier, provoquant ainsi un effet de dilution. En effet, un cas symptomatique est celui de la présence d'impuretés dans les anodes qui ne finissent pas passer dans le bain, en le contaminant. L'entraînement permet de maintenir la concentration de ces impuretés à un niveau tel qu'il n'affecte pas la durée de vie et le fonctionnement du bain.

Il est fondamental, à ce stade, d'établir de nouveau un rapport entre le concept d'entraînement et celui de " besoin de lavage " ou, " raison de lavage " ou, " critère de lavage ", entendant par là que le nombre de fois que le liquide entraîné avec les pièces doit être dilué dans le processus de lavage afin que la qualité finale du processus ne soit pas affectée. Ce concept nous donne une mesure quantitative de l'efficacité du processus de lavage.

Ce paramètre est inversement lié au concept d'entraînement, selon l'expression :

$$C_0 / C_r = Q / q$$

Où :

C_0 = concentration initiale du bain

C_r = concentration moyenne du bain dans l'eau de lavage

q = entraînement (l/h)

Q = débit d'eau de lavage (l/h)

Compte tenu de l'expression précédente, il est facile de déterminer de quelle manière on peut estimer l'entraînement. Empiriquement, l'industriel peut l'établir en appliquant l'expression suivante, découlant de la précédente :

$$q = C_r / C_0 \cdot I / t$$

Où, dans ce cas :

C_0 et C_r sont les mêmes facteurs que dans le cas précédent

I = Volume de la cuve de lavage

t = temps en heures

Par conséquent, il convient que l'industriel fasse des analyses pour déterminer quelque espèce chimique susceptible de nous servir afin de l'introduire dans la dernière expression et de pouvoir, ainsi, déterminer l'entraînement provoqué par l'activité de l'entreprise.

Ces deux concepts que nous avons traité jusqu'ici, entraînement et critère de lavage, ainsi qu'il se dégage de tout ce qui a été dit, sont clés et, malheureusement, inconnus ou indéterminés par l'immense majorité des entreprises du secteur. Vu que l'on ne connaît pas l'entraînement provoqué dans l'opération productive et que la qualité de lavage dont on a besoin n'est pas non plus déterminée, on se trouve, la plupart du temps, face à des débits de lavage très supérieurs à ceux qui sont nécessaires (avec tout ce que cela suppose, comme on l'a déjà signalé) ou, dans très peu de cas, face à des débits de lavage insuffisants et, conséquemment, des contaminations entre baigns et une finition finale défectueuse des pièces.

L'importance d'établir le *critère de lavage ou la raison de dilution (Rd)* afin d'apporter des alternatives réelles de minimisation dans le secteur apparaît donc clairement.

Des valeurs moyennes d'entraînement standard sont :

⁶ En fait, l'entraînement est considéré comme la cause de la plus grande partie de la génération de déchets due au traitement d'eau nécessaire.

- châssis : 150 ml/m² traité
- tambour: 1-3 l/tambour

La connaissance des conditions qui contribuent à l'entraînement est clé si l'on veut le réduire. Parmi les facteurs, les principaux sont les suivants :

1. taille et forme des pièces
2. viscosité et concentration chimique du bain
3. tension superficielle du bain
4. température du bain et,
5. façon de travailler

Avec tous ces facteurs, nous pouvons établir que l'entraînement est directement proportionnel à la surface de la pièce et à la viscosité, concentration et tension superficielle du bain et, inversement proportionnel, à la température et à la densité du bain.

Une fois que les facteurs qui favorisent l'entraînement sont déterminés, il sera plus simple d'aborder le concept fondamental de *minimisation de l'entraînement*.

Il existe diverses techniques et méthodes pour le réduire de façon très significative et efficace. Certains de ces systèmes ne représentent aucun coût additionnel pour l'entreprise, ceux-ci n'impliquant souvent que le fait de travailler dans des conditions différentes ; de toute manière, les investissements requis sont généralement assez réduits et, par contre, ils apportent des niveaux importants de réduction de l'entraînement⁷. Dans certains cas, d'autres facteurs peuvent rendre plus difficile la mise en place de la mesure ; par exemple, des éléments qui conditionnent le processus ou bien le manque d'espace.

Les alternatives que nous proposons à la suite, nous avons fait en sorte qu'elles soient le plus exhaustives possible et sont expliquées avec un certain détail, afin d'établir clairement leur importance ; elles sont ordonnées en fonction du niveau d'investissement requis, en commençant par celles dont le montant est moindre :

- Maintenir le bain à la concentration minimale possible ; on arrive ainsi à réduire sa viscosité.

⁷ Par conséquent, grandes réductions des coûts de l'entreprise.

En général, le fournisseur du bain recommande des concentrations supérieures à celles réellement nécessaires, afin d'assurer la qualité de la finition finale et d'obtenir le rendement maximum.

Il est de toute importance que l'entreprise, d'une manière empirique, établisse la concentration minimale possible de travail de ses bains, par exemple, en la réduisant moyennant l'addition de bain plus dilué, jusqu'à ce qu'on commence à détecter que celui-ci n'opère plus adéquatement. À ce stade, l'entreprise peut identifier la concentration optimale du bain de processus offrant la qualité finale appropriée du produit.

- Travailler à la température maximale du bain, provoquant aussi une diminution de sa viscosité, favorisant le drainage du liquide. Avec cette mesure, on augmente le rang d'évaporation du bain, ce qui permet l'introduction de lavages étanches de récupération qui contribuent tout particulièrement à la réduction de l'entraînement, comme nous le verrons plus loin.

Toutefois, il faut veiller à ce que le liquide mouillant extrait avec la pièce ne sèche pas sur la surface de celle-ci en formant des dépôts affectant la qualité du processus.

- Addition d'agents mouillants, afin de réduire la tension superficielle du bain. Cette mesure peut réduire l'entraînement jusqu'à 50 %.

Il y a cependant des industriels qui préfèrent ne pas employer ces produits parce qu'ils forment de l'écume dans le bain et salissent la pièce au moment de l'extraire. De toute manière, il convient d'indiquer que son emploi doit être évalué en fonction des caractéristiques propres du bain et de la finition finale que l'on prétend obtenir.

- Incorporation de systèmes de soufflage, qui agissent sur le bain, favorisant le drainage du liquide attrapé par les pièces.

- Introduction de systèmes de vibration, aussi avec le châssis sur le bain, rendant également possible un plus grand drainage du liquide.

- Utilisation de mécanismes de lavage au spray, sur le propre bain de processus, spécialement indiqué dans ceux qui travaillent à chaud. À l'effet de lavage de l'eau, il convient d'ajouter l'effet mécanique du spray.

D'autre part, au moment d'effectuer un premier lavage sur le bain, on y remet la plus grande partie du liquide entraîné par la pièce (jusqu'à 50%). Le seul élément conditionnant que présente le

système est, comme on l'a déjà dit, le fait que le bain opère à une certaine température (>40 °C) afin qu'on puisse compenser l'évaporation qui a lieu avec le lavage par aspersion sur le propre bain.

- Incorporation couvre-joints entre la cuve du bain et celle du lavage postérieur. Si l'inclinaison de cet élément sur le bain est appropriée, on peut faire revenir dans ce dernier tout le liquide résultant de l'égouttement qui provient des pièces, entre les cuves.

- Introduction de systèmes de succion de liquide dans les tambours. Il s'agit d'imprimer une petite pression négative au tambour pour récupérer le liquide qui s'y trouve.

Cette mesure, pas très répandue, permet de réduire d'environ 30% les pertes par entraînement.

- Choix des châssis. Dans certains cas, la surface occupée par les châssis peut être supérieure à celle des pièces traitées. Il sera donc nécessaire de faire une étude approfondie de la forme et la structure de ces châssis, de façon à obtenir la surface la plus petite possible.

En tout cas, les châssis plastifiés présenteront une surface hydrophobe et, par conséquent, entraîneront une quantité bien plus réduite de solutions que les châssis métalliques.

- Lavages étanches de récupération. Ce sont, très probablement, les alternatives les plus efficaces pour réduire l'entraînement vers les eaux de lavage, permettant en même temps de récupérer les matières premières à nouveau vers le bain d'origine.

D'autre part, d'une manière indirecte, ils permettent la réduction du débit de renouvellement de l'eau du lavage postérieur: si, par exemple, le lavage étanche a un taux de concentration du bain de 20%, le débit du lavage postérieur peut être divisé par 5. La méthode consiste à intercaler un, ou plusieurs, lavages d'eau étanches entre la position du bain de processus et les lavages postérieures.

L'eau de ce lavage, de préférence, doit être distillée vu que l'eau de réseau, contenant des sels, peut finir par contaminer le bain.

S'agissant d'un lavage étanche, il y a une autre recommandation intéressante de faire, dont on ressent souvent le manque dans les entreprises, est le fait d'agiter par air - ou mécaniquement - le lavage, afin d'accroître son efficacité.

Le lavage se concentre progressivement en sels issus du bain de processus et, à une concentration donnée, en moyenne de 20% de celle du bain, on retire une partie de ce liquide et on le réintroduit dans le bain de processus d'où les sels proviennent. Ce volume est défini en fonction du rang d'évaporation. Ainsi, de même que pour les lavages au spray, il est nécessaire que le bain opère à une certaine température, supérieure aussi dans ce cas à 40 °C pour que le système soit applicable.

Quelques entreprises sont réticentes à utiliser des lavages étanches de récupération, par crainte de contaminer le bain⁸. Il peut également arriver que, dans certains bains de processus, certains des composants se déstabilisent lorsqu'ils sont dilués, en altérant la composition chimique du bain initial ; c'est le cas des bains de nickel et de cuivre chimique.

Il se peut aussi que le lavage étanche soit contaminé du fait que, accidentellement, un ouvrier y lave des pièces provenant d'un autre bain de processus (contamination croisée entre bains). En tout cas, si le risque encouru est celui d'une contamination par des impuretés ou des métaux, il existe la possibilité "d'épurer" le lavage étanche, avant de le faire revenir dans le bain, moyennant, par exemple, des résines d'échange ionique.

Malgré tout, l'importance du système est telle qu'une fois le cas concret étudié, il faut l'introduire toutes les fois que cela sera possible.

Une variante très intéressante du système, avec des répercussions évidentes de réduction de l'entraînement, est la possibilité de combiner 2, voire 3, lavages étanches "en cascade", c'est-à-dire reliés entre eux. Cette disposition devient un système de lavages courants en cascade (voir volet 2.3.4), dont le débit est suffisamment petit pour que ceux-ci puissent être directement recyclés en continu vers le bain de processus. Le système permet la récupération maximale de matières premières et la réduction maximale, par conséquent, de l'entraînement. Si, un lavage étanche peut atteindre un niveau de réduction de l'entraînement de 70%, 2 récupérations consécutives peuvent arriver à 90% de réduction des pertes par entraînement.

- Lavage ECO. Il s'agit aussi, comme dans le cas précédent, d'un lavage étanche dans lequel les pièces sont immergées avant et après le bain de traitement. À la différence du lavage de récupération qui se vide peu à peu pour compenser les pertes par évaporation du bain, dans le cas du lavage ECO celui-ci ne se vide jamais, sa concentration se stabilise à 50% de celle du bain. La concentration de l'entraînement est, donc, la moitié de celle d'origine.

⁸ Auparavant, on commentait que l'entraînement a une conséquence positive puisqu'il dilue la possible contamination du bain introduite par des agents externes (impuretés des anodes, détachement de métaux de la surface des pièces sur lesquelles on travaille, etc.).

Ce lavage s'applique aux bains qui opèrent à faible température (<40 °C). Il n'est pas recommandable pour les bains de préparation de la surface (dégraissages et décapages) ni pour les lavages finaux (passivations), étant donné que le contact de la pièce avec une solution relativement concentrée (même si celle-ci n'est que de 50%) peut provoquer l'amorçage de réactions nuisibles pour la qualité du traitement qui vient après.

Dans ce cas, on estime que la réduction de l'entraînement est inférieure au lavage de récupération et se situe entre 30 et 50%. Malgré tout, les mêmes avantages environnementaux du lavage étanche de récupération sont attribuables au lavage ECO.

Finalement, il faut dire que, que ce soit dans le cas du lavage de récupération ou du lavage ECO, il faut respecter les principes du bon lavage :

1. Mouvement relatif turbulent entre la pièce et l'eau.
2. Temps approprié de contact entre la pièce et l'eau.
3. Présence d'eau suffisant pendant le temps de contact.

- Position des pièces sur le châssis : il convient de les placer de façon à faciliter son vidage en sortant du bain, en évitant la formation de zones où le liquide reste attrapé. Dans ce sens, il convient d'indiquer que les pièces doivent être placées de préférence à plat, vu qu'ainsi on réduira l'épaisseur de la pellicule liquide entraînée au moment de l'extraction des pièces.

Il faut éviter, dans tous les cas où cela est possible, de placer une pièce au-dessus d'une autre, afin d'éviter que la pièce placée au-dessus s'égoutte sur celle de dessous. Sur ce point, le design du châssis choisi pour le travail en question revêt une grande importance.

Il est important aussi que l'ouvrier fasse pencher le châssis adéquatement au sortir du bain, afin de faciliter le vidage.

Dans le cas du tambour, son design est aussi fondamental pour faciliter le drainage de liquide du bain qui est entraîné : des trous les plus grands possibles et qui n'arrivent pas jusqu'aux marges, dans le cas de tambours polyédriques (étant donné qu'il resterait du liquide attrapé sur les flancs du tambour).

- Vitesse d'extraction des pièces du bain, qui doit être lente : plus vite on retire la pièce, plus grande est l'épaisseur de la pellicule de liquide mouillant.

Il convient que les conducteurs de l'unité de traitement éduquent et supervisent les ouvriers dans ce sens.

- Temps d'égouttage : il faut qu'il soit le plus long possible, tout en évitant le séchage du liquide à la surface des pièces ou la possibilité de "passivations" de la surface.

Pour faciliter cette tâche, il est utile de placer des barres de suspension des châssis (très pratiques, surtout lorsque le poids à supporter est considérable), dans le cas de lignes de traitement manuelles.

Il est démontré que le temps d'égouttage ne pose pas ces problèmes sur les bains de prétraitement (dégraissages et décapages) ; dans ces cas-là, l'ouvrier peut opérer nouvellement avec le châssis une fois que celui-ci a dégoutté tout l'entraînement.

Pour des tambours, outre le temps d'égouttage, il est important de le faire tourner à 90°, et de réaliser un bon entretien de celui-ci afin d'éviter le bouchage des orifices. Il est important aussi que les châssis soient en bon état, puisque dans le cas contraire, il peut rester du liquide à l'intérieur des fêlures et des trous.

Les valeurs moyennes standard de temps d'égouttage sont :

- pour des châssis : 10 sec.
- pour des tambours : 20 sec.

Pour clore ce point si important sur les possibilités de prévenir la pollution à la source générée lors du traitement de surface, on peut conclure :

1. L'entraînement est la principale source de génération de courants résiduaux dans le secteur de bains galvaniques, en supposant en même temps une perte de matières premières et d'eau. Il devrait faire, par conséquent, l'objet d'une analyse approfondie pour chaque entreprise concrète et être le concept principal sur lequel l'entreprise devrait centrer ses efforts pour réduire les courants résiduaux générés.
2. La grande majorité des entreprises méconnaît quel est l'entraînement moyen qu'elles provoquent tout comme le critère de lavage nécessaire dans leur cas particulier.

3. En même temps, la plupart des entreprises ne connaissent pas quels facteurs contribuent à minimiser l'entraînement, raison pour laquelle elles n'agissent pas sur celui-ci.
4. Il existe un bon nombre d'alternatives et d'options pour minimiser l'entraînement, la plupart desquelles soit n'implique aucun coût d'investissement pour l'entreprise, soit celui-ci est suffisamment bas pour que la période d'amortissement soit très courte, compte tenu de l'importante réduction du coût dans les achats de matières premières, de consommation d'eau et de traitement et gestion de déchets.

3.1.2.3 Améliorations dans les rinçages et les lavages

Avec tous les concepts décrits à la section 2.3. traitant des systèmes de lavage, nous sommes en mesure d'analyser les différentes méthodes en vue de réduire la consommation d'eau dans l'unité de galvanoplastie.

Il faudra donc que l'industriel soit à même de définir la structure optimale de ses lavages, en tenant compte des principaux paramètres de choix.

Les moyens à la portée de l'industriel de galvanoplastie pour réduire la consommation d'eau sont les suivants :

- Rationalisation de lavages : choix des systèmes de lavage.

a) Lavage simple.

De tous les lavages, il s'agit du pire système de lavage dont dispose l'entreprise et, en dépit de cela, c'est pratiquement le plus répandu dans le secteur.

Il consiste, comme on l'a déjà vu, dans le fait de disposer d'une seule cuve de lavage d'eau courante après le bain de traitement. Dans ce cas, le débit d'eau de lavage, pour une raison de dilution donnée (Rd), est :

$$Q = q Rd$$

En général, on peut affirmer que le débit (Q) de lavage nécessaire pour assurer une raison de dilution satisfaisante est très élevé si on le compare à d'autres possibilités.

b) Lavage double (et multiple) en parallèle.

On trouve ce lavage dans le cas où chaque cuve de lavage après le bain (2 ou plus) est alimentée séparément (en parallèle). Dans ce cas, l'expression mathématique qui détermine le débit de lavage est la suivante :

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = n q^n \sqrt{Rd}$$

où n = nombre de cuves de lavage.

Ce système n'est pas tellement utilisé, puisque, pour un nombre équivalent de cuves de lavage et pour une même raison de dilution on peut obtenir une réduction bien plus grande du débit d'eau de lavage nécessaire avec le système ci-après.

c) Lavage double (et multiple) en série (cascade).

Il s'agit des meilleurs systèmes de lavage disponibles. Le système consiste à faire entrer de l'eau courante propre à travers la dernière position du système de lavage, eau qui passera en cascade jusqu'à la première cuve. Les pièces à laver circulent en sens contraire, c'est-à-dire à contre-courant. À la différence du cas précédent, ici on n'a qu'une seule alimentation d'eau propre (dans la dernière cuve).

Dans ce cas, le débit d'eau nécessaire est exprimé par :

$$Q = q^n \sqrt{Rd}$$

où, ici aussi, n correspond au nombre de cuves de lavage composant le système.

Dans ce cas, l'économie obtenue dans la consommation d'eau grâce à l'augmentation du nombre de cuves (n) est importante. Dans le tableau suivant, voici quelques consommations d'eau en fonction du nombre de cuves en cascade, pour un exemple concret. On peut apprécier l'importante réduction du débit au fur et à mesure que le nombre de lavages s'accroît :

Systeme de lavage	Débit de lavage Q (l/h)
Lavage simple	10.000
Double lavage en cascade	220
Triple lavage en cascade	65

Tableau 6

En supposant que :

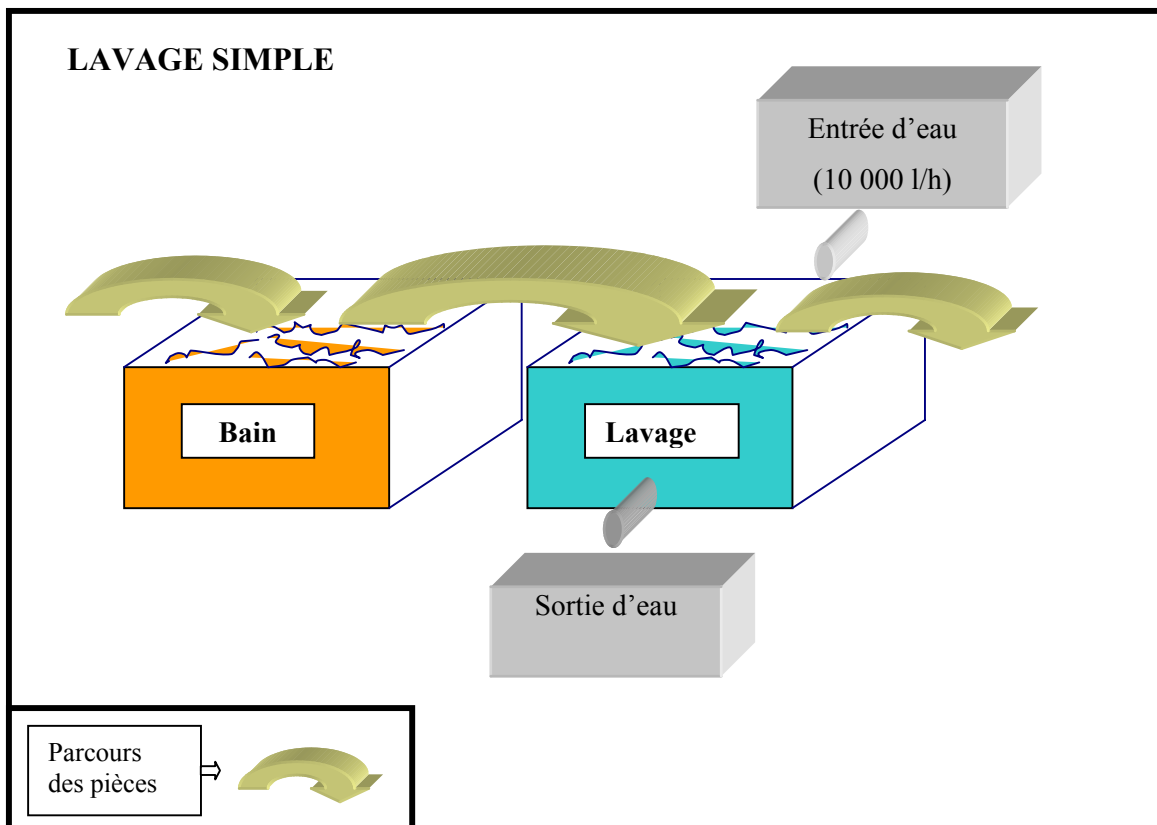
l'entraînement (q) = 5 l/h

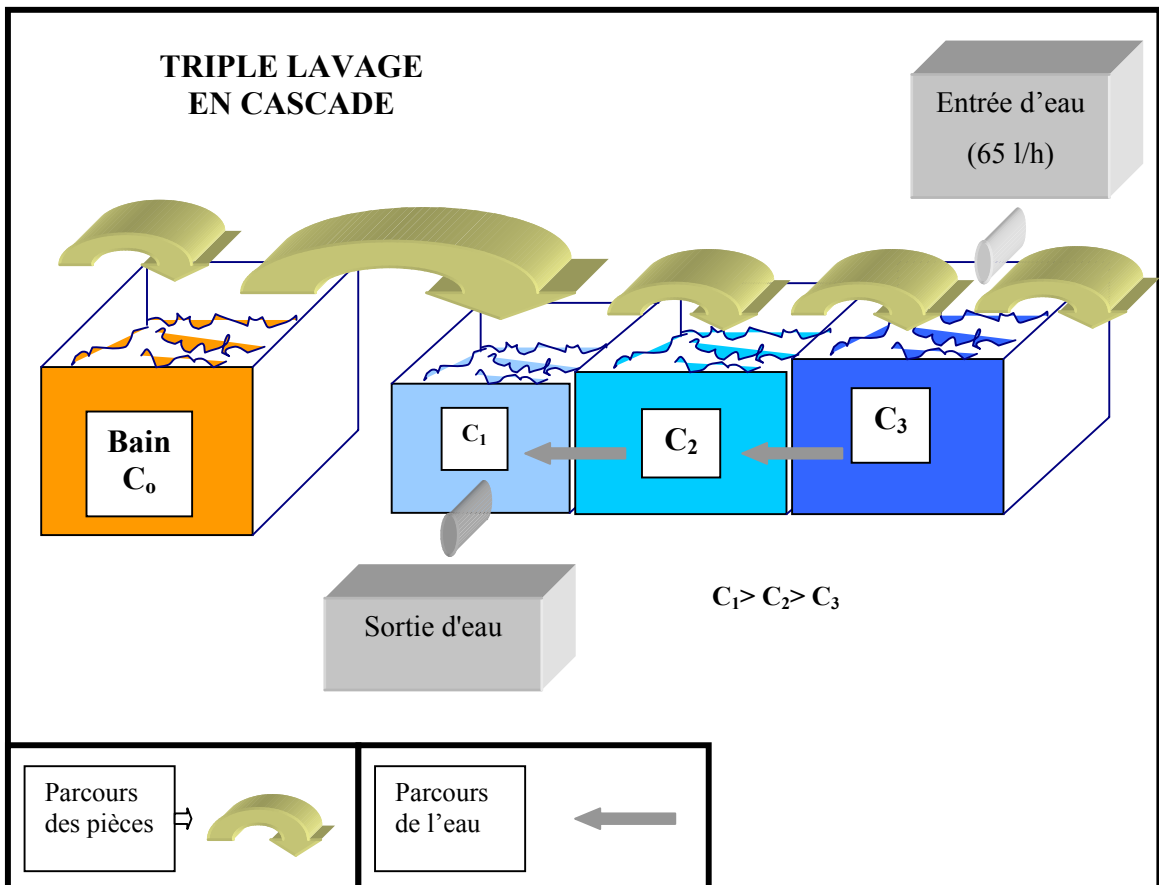
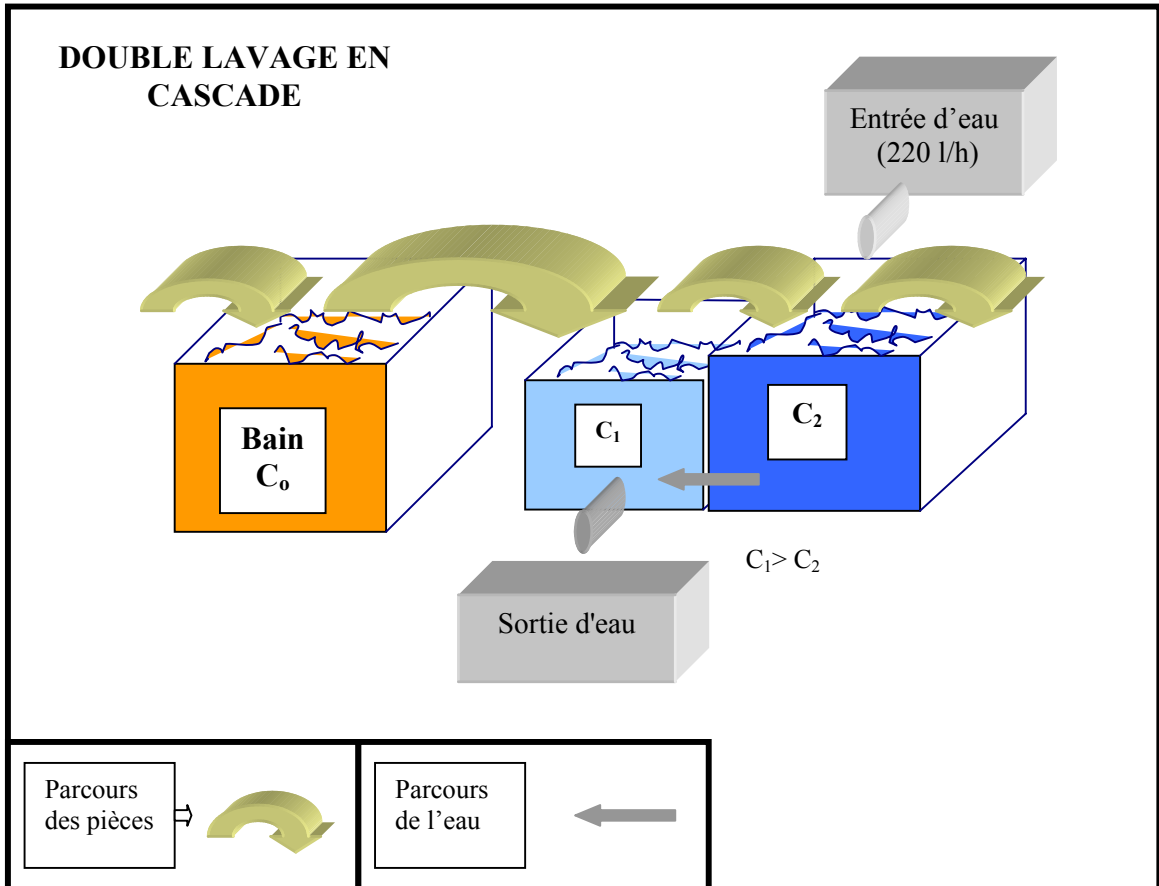
la raison de dilution (Rd) = 2000

Cet exemple montre l'importance d'une rationalisation des lavages, permettant :

1. de consommer moins d'eau pour une même raison de dilution,
2. de réduire, de la sorte, les coûts de consommation d'eau et d'épuration,
3. d'augmenter la qualité du lavage sans avoir à augmenter la consommation d'eau.

Nous obtiendrions alors la forme graphique suivante:





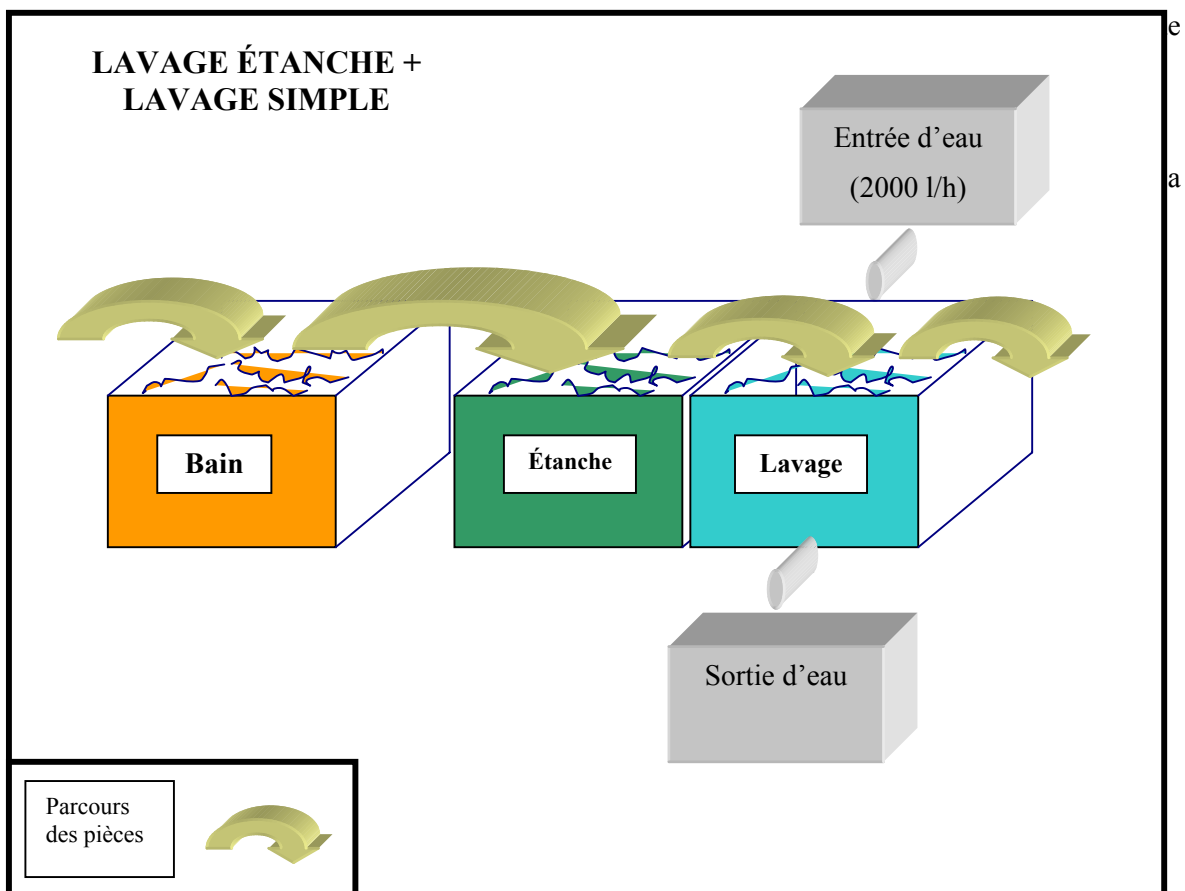
d) Lavage étanche.

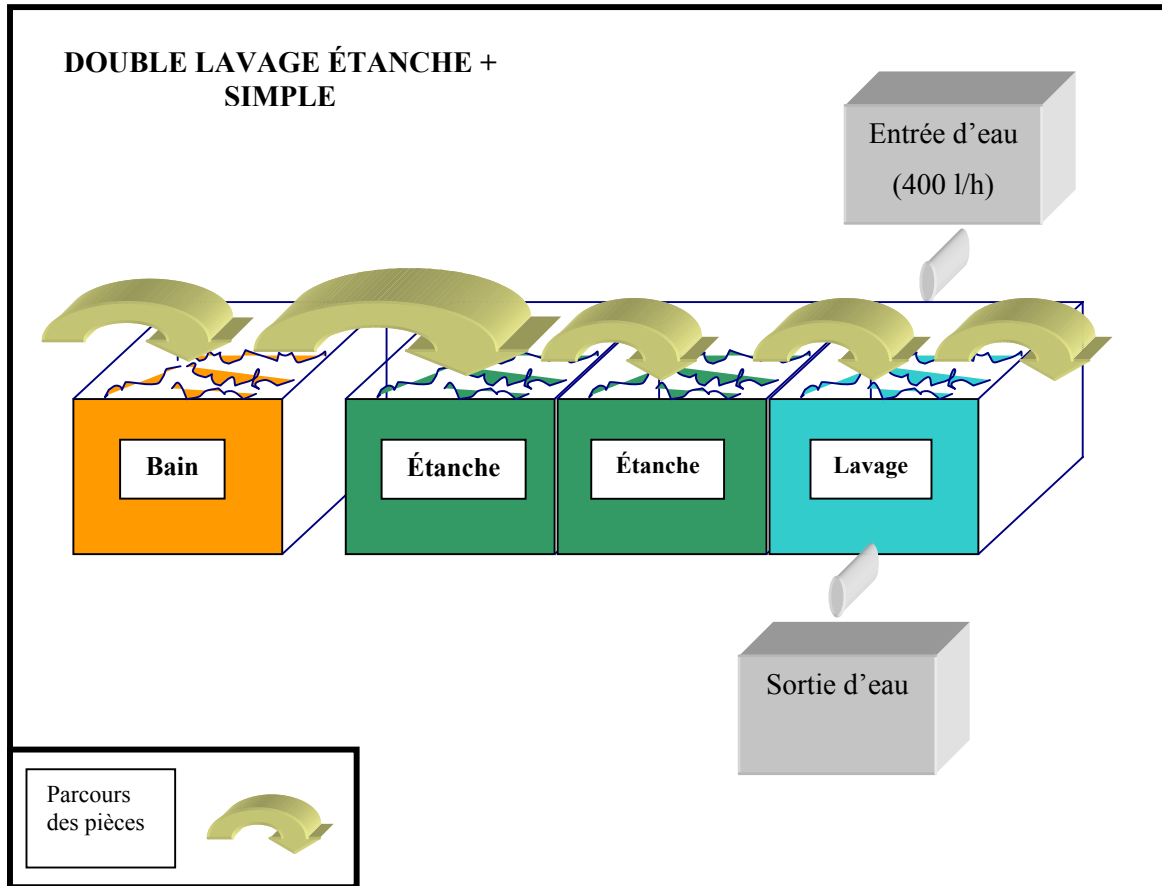
Il s'agit d'un lavage sans renouvellement qui permet de retenir une bonne partie de l'entraînement issu du bain de processus. Par conséquent, en plus de réduire les besoins de lavages postérieurs – et la consommation d'eau - il rend possible la récupération de sels du bain.

Malgré son étanchéité, pour éviter sa concentration progressive en sels issus du bain de processus, il faut procéder périodiquement à son renouvellement. Dans le cas où le bain précédent opérerait à chaud – à plus de 50 °C -, ce renouvellement sert à y réintroduire les pertes en eau par évaporation et en eau et en sels par entraînement.

Des valeurs de concentration du lavage étanche situées entre 10 à 20% de celle du bain sont parfaitement admissibles pour cette double fonction.

Une structure très efficace est celle qui consiste à maintenir 2 ou plusieurs lavages étanches reliés en cascade, en faisant recirculer le liquide récupéré vers le bain dont il provient. De cette façon, on peut récupérer le maximum de produit d'une manière simple. Dans ce cas, il faut faire en sorte que





e) Lavage ECO.

Le lavage ECO est aussi un lavage étanche dans lequel les pièces sont immergées avant et après le bain de traitement. Celui-ci n'est jamais vidé - ni partiellement - et sa concentration se stabilise à la moitié de celle du bain de processus. De cette façon on obtient une concentration dans l'entraînement égale à la moitié de la concentration initiale. Il n'exige pas non plus de variation du volume de la cuve, puisqu'il s'applique habituellement à des bains froids ou pas très chauds - <math><40^{\circ}\text{C}</math> -.

Malgré ces avantages, il n'est pas recommandable de l'appliquer aux bains de préparation (dégraissages et décapages) ou au bain final (passivation), pas plus qu'aux bains de processus chimique (cuivre ou nickel chimique). En effet, la concentration de ce lavage étant égale à la moitié de celle du bain, des réactions peuvent se produire à la surface de la pièce et nuire à la qualité du traitement ultérieur.

Les lavages ECO permettent de :

- récupérer des matières premières,
- limiter les entraînements – en théorie entre 30 et 50 %-
- par conséquent, de réduire la consommation d'eau du lavage postérieur.

f) Lavage par aspersion.

Il consiste à projeter un fin brouillard d'eau de lavage directement sur les pièces sortant du bain de processus, soit directement sur le bain – s'il opère à chaud -, soit sur une cuve vide et, même, sur le lavage postérieur.

Le système présente les avantages suivants :

1. Réduction de la consommation d'eau de lavage. Un lavage par aspersion, c'est comme un lavage en cascade.
2. Amélioration de la qualité de lavage grâce à l'effet hydromécanique des gouttes de l'eau projetée sur la surface de la pièce à traiter.
3. Rendre possible la récupération de sels, dans le cas de bains à température, en faisant un premier lavage au-dessus de la cuve de processus.

Le nettoyage par aspersion présente, comme on peut le voir, des avantages importants quant à l'efficacité et à l'économie de l'eau. Néanmoins, l'emploi des rinçages par aspersion pose quelques problèmes dont il faut tenir compte :

- installation compliquée et entretien considérable.
- nécessité d'eau de qualité.
- danger de formation d'aérosol pouvant affecter la sécurité dans le travail.

Pour conclure ce point, indiquer les paramètres que l'industriel de la galvanoplastie doit considérer au moment de définir son système de lavages :

- qualité de lavage désirée pour chaque position : détermination de la raison de dilution (Rd) ;
- disponibilité d'eau et débits d'entrée (Q) ;
- concentration des bains et nature de leur composition ;
- débit d'entraînement estimé (q) ;

- capacité pour récupérer l'entraînement vers les bains ;
- espace disponible dans l'atelier ;
- conditions opérationnelles dans l'unité de traitement ;
- limites de déversement à respecter.

- Autres méthodes pour réduire la consommation d'eau.

a) Réduction de la surconsommation démesurée.

On constate parfois que la consommation d'eau de beaucoup d'ateliers de galvanoplastie est extraordinairement élevée, pas justifiable pour ce qui serait des nécessités optimales de lavage. Parmi les principales raisons de cette surconsommation, on peut citer les suivantes:

- alimentation d'eau superflue dans les positions de lavage, par exemple, sans production;
- excès de lavage dans certaines positions dépassant la raison de dilution ;
- lavages excessifs de cuves, bidons, installations, terres, etc. ;
- pertes diverses : robinets mal fermés, fuites, etc.

L'importance de cette consommation peut avoisiner, dans certains cas, 40 à 50% de la consommation totale d'eau de l'entreprise.

Voici les alternatives de minimisation que l'on peut proposer :

- pose d'électrovannes fermant l'alimentation en eau s'il n'y a pas de processus, soit par mesure de conductivité de l'eau, soit par temporisateurs ;
- laver les installations et les équipements avec des moyens à pression, réutilisation de l'eau des seconds lavages dans les premiers lavages, etc. ;
- bon entretien des installations, contrôle et supervision, formation du personnel, etc.

b) Amélioration de la qualité de lavage.

Une fois la structure de lavages choisie, on peut encore améliorer la qualité du lavage de manière significative, par exemple :

- en réduisant le volume et la concentration des entraînements ;

- en chauffant certains lavages ;
- en introduisant des systèmes d'agitation dans le lavage ;
- en utilisant de l'eau de très bonne qualité pour les lavages critiques et pour certains lavages fins.

En fait, au moment d'améliorer l'efficacité d'un lavage, il faut compter sur trois stratégies dont on peut se servir :

- Contrôler le temps de contact entre la pièce et le système de lavage. Il est facile de constater que, d'habitude, ce temps est inférieur à celui qui est vraiment requis.
- Forcer une petite turbulence (par agitation) de l'eau de lavage, ce qui provoquera un lavage plus efficace.
- Faire en sorte de disposer d'un volume d'eau suffisant pendant le temps de contact entre la pièce et le système de lavage.

La combinaison de ces trois stratégies augmente, considérablement, l'efficacité des opérations de lavage et contribue à une diminution de la quantité d'eau nécessaire.

c) Réutilisation de certaines eaux.

Une autre possibilité, peu utilisée par les industriels, consiste à réutiliser les eaux de certains lavages, par exemple, pour une autre position de lavage compatible avec la première. Avec cette simple mesure, on peut arriver à réduire de moitié la consommation d'eau des deux positions de lavage. Il convient néanmoins s'assurer de la compatibilité des bains.

À titre d'exemples, voici les suivants :

- un second lavage après un dégraissage est réutilisable pour un lavage après un décapage acide ou alcalin ; ou bien inversement ;
- un lavage postérieur à une activation (passivation ou neutralisation) peut servir de lavage après le prétraitement ;
- un lavage postérieur à une passivation chromique de zinc est réutilisable pour un lavage postérieur à un chromage (exception faite du lavage final) ;
- si le processus d'épuration d'eaux résiduelles est correct, bien souvent on peut réutiliser l'eau épurée pour différents lavages de prétraitement (il faut néanmoins être attentif à sa conductivité afin d'éviter des concentrations excessives en sels) ; on peut aussi réutiliser cette eau pour des activités annexes: lavage de terres et d'installations ...

- réutilisation de l'eau de refroidissement de bains pour lavages.

Par mesure de précaution générale, il faut signaler qu'avant de prendre la décision de réutiliser un certain type d'eau, on doit examiner les éléments qui en conditionnent l'emploi.

3.1.2.4 Application des bonnes pratiques environnementales

Certaines des recommandations concernant les bonnes pratiques ont déjà été détaillées au fur et à mesure que l'on proposait des améliorations visant la réduction de la consommation d'eau ou la minimisation de l'entraînement. Les recommandations qui vont être décrites à présent sont plus génériques et touchent beaucoup d'autres activités de l'entreprise. Les bonnes pratiques environnementales sont de type intégral car elles agissent à la fois sur divers courants résiduels.

En général, il s'agit de mesures sans aucun coût économique (au moins direct) ou qui supposent un coût réduit alors qu'elles ont une répercussion très favorable sur la réduction de la consommation de matières premières, de la génération de courants résiduels, améliorant beaucoup le contrôle et la gestion globale de certains services de l'entreprise.

Les mesures de bonnes pratiques pour l'entreprise se résument, ordonnées d'après leur champ d'application, en :

- Stockage de matières et de déchets

Un stockage déficient des matériaux est une source potentielle d'obtention de déchets, comme c'est le cas de la génération de produits périmés, un risque majeur d'épanchement de matériaux, etc. supposant à la fois un danger et un risque pour les propres travailleurs.

Tous les processus développés par l'entreprise incluent le stockage de matières de base, de produits, de sous-produits et de déchets, ainsi que leur transfert d'une zone à l'autre de l'usine. Un bon stockage est donc une possibilité importante pour la minimisation.

Parmi les principales propositions génériques à recommander, voici les suivantes :

- Mener à bien un contrôle normalisé de l'état de saleté (graisses, poussières, etc.) des pièces réceptionnées en vue de leur traitement électrolytique, afin de faire en sorte qu'elles arrivent le plus propre possible.
- Disposer de zones séparées et appropriées de stockage pour les matières premières, les produits, les sous-produits et les déchets. Ces zones doivent être protégées des rigueurs du temps - lumière, pluie, chaleur, etc., - afin d'éviter la détérioration de l'emballage ou du produit lui-

même et doivent disposer d'une sole en béton hydrofuge et d'un système de collecte des eaux résiduaires indépendant du système général. La zone en question doit être convenablement signalisée et éclairée.

- Maintenir l'ordre établi dans le magasin et les distances entre les matériaux, de façon qu'ils soient accessibles et que l'on puisse procéder à leur inspection. Il faut, de plus, maintenir les distances entre les produits chimiques incompatibles. Les différents bidons devront être ordonnés en fonction de leur danger et degré d'utilisation, en facilitant leur chargement et déchargement. Tous les matériaux doivent être convenablement étiquetés, en indiquant leurs caractéristiques et les normes spéciales de manipulation. Il est intéressant aussi de stocker les conteneurs suivant les indications de l'emballleur ou du fabricant.
- Dans le cas où l'on entasserait des matériaux, mettre toujours les liquides sous les solides, en maintenant les récipients toujours bien fermés.
- Nettoyer les surfaces en face de leur revêtement électrolytique, afin d'éviter qu'elles se salissent pendant le temps de stockage.
- Établir un système de gestion des stocks suivant le système FIFO (premier entré-premier sorti), qui garantisse que les matériaux stockés les plus anciens seraient les premiers à sortir.
- Se servir de récipients aux dimensions appropriées à l'emploi prévu et aux caractéristiques du produit, en achetant de préférence en gros, excepté pour les matériaux dont la durée de vie est courte ou qui ne sont pas consommés en grande quantité. Tout cela peut permettre de réduire le nombre d'emballages ainsi que le matériau qui se perd du fait qu'il reste adhérent aux parois du récipient. De même, il est préférable de se servir de conteneurs réutilisables, tels que les conteneurs en polyéthylène qui, en outre, sont faciles à transporter et à nettoyer. Il convient donc de vider complètement les récipients afin de réduire la quantité d'agents de nettoyage nécessaires.
- Dans le cas particulier des déchets, on recommande de prévoir et d'aménager une zone spécifique et différenciée pour leur stockage, comme on l'a déjà dit auparavant, avec un nombre de conteneurs suffisant pour rendre possible leur séparation correcte, selon qu'il s'agit de liquides ou de solides, du type dangereux ou inertes. Parmi les produits dangereux, la séparation devra se faire en fonction de leur composition et, finalement, il faudra procéder à la séparation des différents types de déchets valorisables (ferraille, plastique, carton, papier, etc.) pour permettre leur gestion externe et réduire leur volume.

- Contrôle d'inventaires

La conséquence fondamentale du contrôle d'inventaires est que l'entreprise n'ait pas plus de matières, produits et sous-produits dans l'unité de ceux qui sont réellement nécessaires pour une raison ou pour une autre. En plus de l'espace occupé et de l'actif immobilisé que cela suppose, une absence de contrôle d'inventaires peut entraîner une génération de déchets issue des matières

premières et de produits superflus, périmés ou endommagés, représentant ainsi un double coût pour l'entreprise.

Voici les propositions de bonnes pratiques que nous suggérons :

- Définir la fréquence et la responsabilité en ce qui concerne les inventaires.
- Éviter les achats excessifs susceptibles de périmier et de se convertir, de ce fait, en déchet.
- Standardiser, chaque fois que cela sera possible, les matériaux achetés, en se servant du moindre nombre possible de composés différents pour une même finalité. Cela implique une réduction du coût d'achat et d'entretien, simplifie le contrôle d'inventaire, en améliorant le suivi et l'utilisation des matériaux, et peut permettre de réduire la quantité et la variété de déchets à gérer.
- Étiqueter et enregistrer tous les matériaux réceptionnés, en indiquant le nom du produit, la date d'entrée dans le magasin et la date de péremption (le cas échéant). Vérifier en même temps que le matériau entrant est convenablement étiqueté.
- Acheter la quantité de matériaux strictement nécessaire pour chaque étape de production spécifique, de façon qu'il n'y ait pas de matériau excédentaire.
- Contrôler tous les matériaux à la réception, en vérifiant qu'ils respectent les spécifications du fabricant et en retournant ceux qui ne sont pas conformes.
- Suivre les spécifications des fournisseurs et des fabricants en ce qui concerne l'utilisation, la manutention, le stockage et le traitement des matériaux réceptionnés.
- Dans la consommation de matériaux, comme on l'a déjà dit, se servir d'un système de gestion FIFO, en effectuant une rotation des conteneurs placés au fond des étagères vers le devant quand du matériel nouveau arrive. Dans tous les cas, donner des instructions par écrit et conscientiser les ouvriers afin qu'ils utilisent en premier les produits qui seront périmés avant.
- Réduire la quantité d'emballages partiellement pleins, en encourageant l'utilisation du matériel excédentaire des opérations précédentes. En ce sens, il est très important d'adapter les dimensions de l'emballage à la quantité nécessaire pour chaque occasion, comme nous l'avons déjà dit précédemment.

- Manipulation de matériaux

Pendant les opérations de manipulation, transport, transvasement, etc., tant de matériaux que de déchets, on doit adopter une série de mesures afin d'éviter des épanchements, des fuites, la contamination de matériaux, etc., qui comportent des pertes et génèrent des courants résiduaux.

Par exemple, la contamination d'un déchet à cause d'une manipulation ou d'une séparation incorrecte peut générer un plus grand volume de déchets, faire diminuer les possibilités de le valoriser ou provoquer son classement en tant que déchet spécial.

Parmi d'autres, nous pouvons recommander les bonnes pratiques suivantes :

- Les zones de chargement et de déchargement doivent être bien éclairées, doivent être signalisées, propres et sans obstacles, notamment les zones de passage.
- Établir des procédures écrites pour toutes les opérations de chargement, de déchargement et de transvasement, en prêtant une attention particulière au fait physique du chargement et du déchargement : manipulation de palettes, bidons, chariot élévateur, transpalettes, pompes, etc. Il est fortement recommandé de vérifier et inspecter les équipements qui vont être utilisés - pompes, filtres, joints, vannes - avant de commencer une quelconque opération de transvasement surtout s'il s'agit de produits liquides (par exemple : les bains de dégraissage).
- D'autre part, il convient de préparer également des procédures écrites d'entretien et de révision périodique de l'état des installations utilisées pour le chargement, le déchargement et le transvasement de produits : raccords, joints, fermetures de vannes, tuyaux, pompes, etc.
- Préparer les réservoirs et les récipients de manière à éviter qu'ils se cassent, en facilitant la détection de fissures ou de corrosion. Les bidons métalliques par exemple doivent être isolés du sol au moyen de palettes en bois afin d'éviter la corrosion provoquée par l'humidité du sol.
- Se servir des récipients en suivant les instructions du fabricant en ne les utilisant que pour l'usage auquel ils sont destinés, en s'assurant qu'ils font tout l'objet d'un programme de contrôle et d'entretien et qu'ils soient en bonne condition.
- Réserver des zones de contention imperméables et propres autour des réservoirs ou des zones de stockage, incorporer dans ces zones des éléments - coffrets ou cuvettes de retenue - pour recueillir les possibles fuites. Ces zones doivent respecter la séparation des matériaux suivant leur nature chimique et leur danger et doivent éviter le contact avec le réseau général de collecte d'eau de l'installation.
- S'assurer que l'on est en train de transvaser le bon liquide dans le récipient approprié ; pour ce faire, il faut suivre les normes d'étiquetage qui permettent de savoir à tout moment quel est le contenu des bidons stockés, comme cela a déjà été dit précédemment.
- Disposer de systèmes qui permettront de connaître à tout moment le volume de liquide dans les réservoirs dont dispose l'entreprise, en évitant de remplir excessivement les réservoirs ou les récipients, et vérifier toujours le niveau du récipient dans lequel on transvase le liquide avant de commencer l'opération, au cas où cela insuffisant.
- Prévoir, dans les zones de transvasement, l'installation de systèmes qui permettront aux ouvriers de laisser égoutter le temps suffisant les éléments employés au cours de l'opération réalisée, en

particulier dans les zones de transvasement de liquides. Cet égouttage doit être effectué dans un récipient qui permettra la récupération du produit.

- Lors des opérations de transvasement de liquides, procéder en faisant particulièrement attention à éviter les possibles éclaboussures et épanchements et à utiliser les équipements adéquatement (pompe, entonnoir, etc.).
- Éviter des mouvements superflus de matériaux en procédant à une planification soignée, en transportant la quantité adéquate à l'endroit adéquat.
- Disposer rapidement des matériaux absorbants appropriés aux produits manipulés normalement pour pouvoir agir en cas de fuites. Ceux-ci devront donc être disposés à proximité des zones de manipulation et être facilement accessibles au personnel chargé des opérations.

- Opérations dans l'unité de traitement

À la suite, on indique une série de conseils à exécuter au cours du processus des bains galvaniques et de toutes les autres activités liées, dans le but aussi d'éviter la génération de pollution. Quelques-unes de ces recommandations ont déjà été faites précédemment :

- Utilisation de bains galvaniques potentiellement moins polluants, dans tous les cas où cela est techniquement possible. En commençant par les bains de préparation et en terminant par les bains de processus, il convient d'envisager si la composition ou la concentration de chacun des bains peut être modifiée de façon que les courants résiduels générés se réduisent et, en plus, que la qualité des pièces obtenues soit, au minimum, égale à celle fournie par le bain remplacé.
- Nettoyage des pièces juste avant de procéder à leur galvanisation, afin d'éviter leur salissure pendant le temps de stockage.
- Optimiser le nettoyage des pièces afin de réduire la génération de déchets et d'émissions, en utilisant la quantité juste du produit de nettoyage et en allongeant au maximum la durée de vie des bains de préparation.
- Utilisation de produits de nettoyage moins polluants. En ce sens, l'ordre de choix du produit de nettoyage est : l'air, l'eau, le moyen abrasif, la dissolution aqueuse de détergents, les dissolutions alcalines, les acides et, finalement, les solvants.
- Agitation des bains afin d'augmenter l'efficacité des opérations de nettoyage, que ce soit par des moyens mécaniques ou ultrasoniques.
- Extraction lente des pièces des réservoirs de préparation et de ceux de processus, en donnant suffisamment de temps pour qu'un drainage du liquide excès vers le réservoir se fasse.
- Pose correcte des pièces dans les châssis, pour minimiser l'entraînement de matières premières.
- Maximiser, autant que possible, le temps d'égouttage des pièces. Il s'agit là d'un point important que l'on oublie souvent. Nous recommandons un temps d'égouttage minimum de 10 secondes pour les châssis.

- Assurer le vidage des pièces pendant le temps d'égouttage. Si besoin, effectuer divers mouvements vibratoires avec les châssis, tout juste sortis des bains, afin de faciliter la vidange du liquide que les pièces puissent avoir retenu.
- Installation de couvre-joints pour recueillir le liquide qui s'égoutte des pièces au moment de les extraire des réservoirs correspondants.
- Lors de la récupération de pièces défectueuses, il faut appliquer, tout d'abord, les systèmes mécaniques de nettoyage avant d'utiliser les systèmes liquides.
- Tenir un contrôle normalisé de l'état des pièces après le processus de nettoyage et de préparation, afin de réduire le nombre de pièces défectueuses qui sont galvanisées.
- Quant aux travailleurs, les informer sur l'importance de réduire la pollution environnementale et le besoin s'utiliser les systèmes de protection personnelle les meilleurs : utilisation de masques, de casques ou de bouchons pour les oreilles, de lunettes et de gants, etc.
- Formation professionnelle adéquate pour les ouvriers chargés des lignes de production, afin d'être en mesure d'exécuter une opération avec une connaissance professionnelle totale.
- Laisser bien s'égoutter les pots et les bidons de produits.
- Connaître la composition des produits utilisés dans l'entreprise tout comme les possibles composants nocifs. Dans ce sens, il est très important de solliciter et de tenir à jour les feuilles de sécurité des produits.
- Bien calculer la quantité de matière de base nécessaire à chaque tâche et faire en sorte de programmer les changements afin de réduire au minimum les nettoyages et les restes de matières.
- Étudier le design des raccordements de tuyaux, des pompes et des réservoirs de l'installation afin que la partie à égoutter et à nettoyer soit la plus réduite possible.
- Ne pas mélanger de produits qui ne doivent pas l'être.
- Éviter des épanchements et des éclaboussures.
- Vérifier régulièrement que les robinets et les raccords ne gouttent pas.
- Connaître le fonctionnement correct des machines et des équipements à employer. Mieux on les connaît, meilleur sera le rendement que l'on obtiendra de l'équipement et moindres seront les possibilités de pollution susceptibles de se produire.
- Vérifier que les surfaces à traiter électrolytiquement sont en parfait état et ne présentent pas d'irrégularités pouvant affecter la qualité finale du traitement.

- Entretien et conservation d'installations et d'équipements

Le fonctionnement normal des équipements et des machines provoque leur usure et a des répercussions sur leur rendement provoquant la génération de produits hors spécifications, des

fuites, des épanchements, etc. L'ensemble de tout cela peut produire des courants résiduaux pas du tout négligeables.

L'entretien préventif consiste en l'inspection et le nettoyage régulier des équipements et des installations, y compris la lubrification, la vérification et le remplacement des pièces en mauvais état. Cet entretien constitue en lui-même une bonne pratique pour la prévention de la pollution à la source. D'une façon générale, on peut réduire la quantité de déchets et d'émissions générés à cause de fuites et de produits hors spécifications, on augmente la durée de vie des équipements et on améliore la productivité de l'entreprise.

Parmi les principales bonnes pratiques qui contribuent à une bonne conservation des installations et à la minimisation de déchets figurent :

- L'élaboration de feuilles ou de procédures d'entretien pour chaque équipement ou machine avec leurs instructions d'emploi. Il est important qu'elles se trouvent près de chaque équipement et qu'elles en détaillent les caractéristiques, le fonctionnement optimal et l'entretien approprié. De plus, il faut que chaque feuille inclut la fréquence et la méthode de nettoyage de l'équipement, la réalisation de petits ajustements, la lubrification, la vérification de l'équipement, ainsi que le remplacement de petites pièces. Il convient également de recueillir dans un registre écrit les pannes survenues, les changements de pièces, les ajustements effectués, les dates des révisions et des réparations, etc. Il faudra indiquer, d'autre part, où déposer les pièces usées et les éventuels déchets générés - huiles, pièces métalliques, torchons sales, etc. -. Ces feuilles peuvent prendre la forme de fiches de données ou bien être informatisées.
- Élaborer, aussi, des feuilles d'incidences pour chaque ligne ou zone de production, où le personnel note les pannes, les égouttements de vannes ou de joints, les arrêts des équipements, etc., qui puissent avoir des répercussions sur la fabrication ou provoquer une génération superflue de courants résiduaux.
- Il est fondamental d'informer et de former le personnel chargé de l'entretien, afin qu'il s'ajuste aux procédures écrites et respecte la périodicité établie pour les révisions. Cet aspect est particulièrement important en ce qui concerne aussi la gestion des déchets générés par suite des opérations d'entretien (liquides de nettoyage sales, sciures sales, torchons sales, etc.). Il est important, dans ce cas, de ne pas les mélanger et de les entasser dans un endroit réservé à cet effet.
- Pour certains éléments et équipements (appareils de combustion, chariots, par exemple), il est préférable de sous-traiter la maintenance préventive en externe, dans une entreprise spécialisée.

- Nettoyage d'équipements et d'installations

Comme cela a déjà été indiqué auparavant, il existe divers moyens pour éviter les épanchements accidentels, les fuites, pour procéder à une manipulation correcte des produits, utiliser les éléments appropriés pour les transvasements, etc. Cependant, malgré toutes les mesures de prévention citées, il y a toujours une partie non désirée des matériaux qui finit par salir les équipements et les installations de l'entreprise.

Le moment venu de nettoyer, la manière de procéder recommandable est la suivante : isoler le produit épanché, afin d'éviter sa propagation, le recueillir, de manière à pouvoir le réutiliser ou réduire son volume, nettoyer le sol ou ce qui aura été sali. Cette manière de procéder rendra possible l'économie de détergents et d'eau, permettra de réduire la charge polluante des eaux résiduaires déversées et, dans le cas où la réutilisation du produit ne serait pas possible, cela facilitera sa séparation et sa gestion en tant que déchet.

Comme normes générales, lors du nettoyage d'équipements et d'installations, nous recommandons à l'entreprise les suivantes :

1. Informer, former, conscientiser et superviser le personnel chargé de nettoyer.
2. Substituer les systèmes automatiques aux systèmes manuels, plus efficaces.
3. Établir des procédures écrites de nettoyage.

Voici, concrètement, quelques bonnes pratiques recommandables dans cette partie :

- Établir et faire connaître des procédures écrites décrivant, en fonction du produit épanché, les actions à mener, l'ordre dans lequel elles doivent être réalisées et le matériel à employer. Il s'agit d'arriver à obtenir le maximum d'efficacité lors du nettoyage avec un minimum de ressources et de réduire au minimum le nombre d'opérations de nettoyage, tout en évitant tout nettoyage superflu.
- Le premier objectif sera, comme on l'a dit, dans tous les cas possibles, l'isolement du foyer, comme premier pas, et, ensuite, le recueil du matériau épanché de façon à en permettre la réutilisation. Dans le cas de liquides, il est important de construire de grands réservoirs de retenue dans les zones de transvasement et de stockage qui ne doivent être reliés ni aux égouts ni aux réseaux de drainage internes. Pour les solides, il suffit d'éviter le contact du solide avec l'eau ou d'autres produits qui provoqueraient leur extension.
- Disposer du matériel approprié pour isoler les différents types de produits habituellement manipulés dans l'entreprise et susceptibles d'être épanchés accidentellement, tels que plateaux

ou récipients allant sous le bidon et servant de cuves de retenue pour le recueil du liquide qui pourrait tomber.

- Disposer du matériel approprié pour nettoyer le sol ou l'emplacement affecté par une fuite ou un épanchement, une fois le foyer isolé et le produit épanché recueilli. Ce matériel devra être facilement accessible par le personnel, c'est pourquoi il faudra le localiser près des points où il peut s'avérer être le plus nécessaire. Dans la mesure du possible, le nettoyage mécanique doit être préféré au nettoyage chimique.
- Procéder au nettoyage des équipements de traitement (filtres, cuves, pompes, etc.) de façon périodique, afin de les maintenir dans de bonnes conditions et, en même temps, de faciliter leur nettoyage.
- Pour le nettoyage d'équipements, faire en sorte d'utiliser le système de nettoyage en cascade ou à contre-courant : se servir, par exemple, pour le premier nettoyage, du liquide provenant d'autres nettoyages, et continuer avec un autre moyennement sale et terminer l'opération avec la moindre quantité possible de liquide de nettoyage propre.
- Dans le cas où l'on devrait avoir recours à des méthodes de nettoyage chimique (comme c'est le cas pour le nettoyage du sol avec de l'eau et une solution dégraissante), les paramètres de contrôle à respecter sont le temps, la température, la concentration et la turbulence nécessaire pour une opération efficace. Pour réduire la quantité de dissolution de nettoyage, il est nécessaire en suivant cet ordre :
 - de nettoyer avec des méthodes mécaniques ou non chimiques au moment et à l'endroit appropriés, comme c'est le cas pour les grattoirs, les brosses, l'aspiration, etc.
 - de se servir de tuyaux ou d'aérosols à pression permettant d'économiser de l'eau et/ou des produits de nettoyage (eau et vapeur d'eau),
 - d'utiliser à cette fin de l'eau avec des tensioactifs ou d'autres produits (tels qu'agents de suspension et émulsifiants),
 - réutiliser l'eau avec les détergents d'un nettoyage antérieur, afin de faire un premier lavage en obtenant une certaine concentration de polluants et un moindre volume d'eau de nettoyage sale.

- Développement et respect des procédures opérationnelles

L'existence de documents ou de procédures opérationnelles écrits où figurent toutes les données, opérations et instructions effectuées dans les différents procédés menés à bien assurent que chaque tâche soit bien définie et, en plus d'améliorer l'efficacité dans la production, ils peuvent réduire la génération de courants résiduels. Autrement, on peut se trouver confronté à un gaspillage de matières premières, des procédés inefficaces, etc., qui, dans l'ensemble, contribueront à une plus grande génération de déchets et à augmenter le risque d'accidents.

Dans cette sous-section en particulier, l'implication de tous les niveaux opérationnels est nécessaire, chacun d'eux dans son domaine de responsabilité pour l'élaboration et la mise en place de ces procédures d'intervention.

Comme recommandations concrètes, nous pouvons signaler les suivantes :

- En premier lieu, sélectionner les procédures opérationnelles normales des procédés réalisés le plus fréquemment à l'usine. Il faudra détailler davantage les opérations pouvant avoir une plus grande répercussion sur l'environnement, comme ce serait, par exemple, dans le cas qui nous occupe maintenant :
 - procédés de fabrication,
 - opérations de maintenance,
 - nettoyage d'équipements et d'installations,
 - stockage et transvasement de matériaux,
 - intervention face aux fuites ou aux épanchements.

Il importe que chaque procédure incorpore la description des procédés globalement et qu'elles définissent chacun des travaux individuels, en indiquant les tâches à réaliser par chaque ouvrier ou responsable, la méthode d'intervention, les moyens prévus, etc.

- Faire respecter le contenu des procédures élaborées, tout en évitant des improvisations ou d'éventuelles d'omissions en ce qui concerne les instructions établies.
- Dans le cas de fuites ou d'épanchements, on devrait disposer, comme on l'a déjà dit auparavant, d'une procédure générique où seraient décrites les premières interventions à mettre en œuvre, en signalant les responsables qui doivent être avertis.
- Tenir un registre de données sur la génération de courants résiduaux pour chaque ligne de traitement ou service de l'entreprise, ainsi que sur les coûts associés. L'objectif étant d'identifier les services qui ont le plus besoin d'une amélioration et, ultérieurement, il permettra également d'évaluer les résultats des pratiques améliorées.

- Séparation des déchets

La séparation correcte des différents types de courants résiduaux générés par l'entreprise rend possible la minimisation, permettant ainsi d'appliquer la gestion la plus appropriée à chaque type de déchet, en augmentant son potentiel de recyclage et de récupération, avec les économies monétaires associées au traitement. Par contre, le mélange des différents types de déchets provoque

le gaspillage de matières premières du fait qu'il réduit la possibilité de réutilisation, la pollution entre les déchets, leur plus grand volume et, en définitive, augmente les coûts de leur gestion.

Il faut donc séparer dans l'entreprise les déchets générés selon leurs caractéristiques. Concrètement, on peut recommander :

- De fournir des moyens divers et des instructions par écrit de façon à pouvoir séparer les déchets générés selon les aspects suivants :
 - séparer les déchets selon leurs caractéristiques physico-chimiques : isoler les déchets liquides des solides, séparer les déchets spéciaux des non spéciaux et des inertes, séparer aussi les déchets toxiques suivant le type de leurs composants majoritaires. Parmi les déchets inertes ou banals, il est intéressant d'appliquer une séparation par type, de façon à rendre possible également leur valorisation externe (bois, carton, ferraille d'après leur composition, matière plastique, etc.).
- Cette séparation présuppose que l'on dispose de conteneurs spécifiques qu'il serait en plus intéressant de placer près de chaque zone de travail, que ce soit dans l'usine soit dans les bureaux, les magasins ou la cour extérieure de l'entreprise.
- Comme on l'a déjà indiqué dans le chapitre correspondant au magasin, il faut prévoir et aménager (paver, recouvrir, etc.) et, encore, signaler la zone où seront stockés les différents conteneurs jusqu'au moment de leur retrait par un gestionnaire autorisé. Il faut aussi signaler adéquatement chaque conteneur en indiquant le déchet, le code, les conditions de stockage et de manipulation, le nom et le téléphone du responsable, etc., comme mentionné précédemment.
- Désigner des responsables pour se charger de l'emploi correct de chaque conteneur et de chaque zone de stockage, et qui avertiront les gestionnaires de chaque type de déchets afin de vider ou remplacer le conteneur lorsque celui-ci sera plein.
- Favoriser la réutilisation du matériel d'emballage, que ce soit dans la propre entreprise ou par le biais de son retour au fournisseur.
- Informer, former et stimuler le personnel de l'entreprise en ce qui concerne le besoin de séparer les déchets

3.2 Recyclage à la source

Comme on l'a vu tout au long de cette étude, l'industrie de la galvanoplastie produit une consommation importante de matières de base et, en plus, il s'agit généralement de produits

potentiellement polluants. Il existe diverses techniques pour réduire les pertes, en récupérant et/ou en revalorisant ces matières, tout en évitant leur transformation en déchets.

Nous verrons à la suite une série de mesures simples pour ce qui est de l'utilisation de produits et d'autres plus élaborées impliquant des investissements plus ou moins onéreux.

3.2.1. Récupération des matières premières

3.2.1.1. Dégraissage

Au fur et à mesure que l'on élimine l'huile et la graisse à traiter, le dégraisseur se charge progressivement d'huiles, de graisses et d'impuretés provenant des pièces.

En général, on remarque que ces bains de préparation sont éliminés périodiquement lorsqu'ils ont perdu leur pouvoir dégraissant à cause de ces impuretés.

Face à cette façon de procéder, l'alternative technique (économiquement viable) recommandable est l'implantation d'équipements qui séparent les impuretés de la solution dégraissante. Ces équipements permettent la récupération du produit et l'élimination des graisses et des huiles.

Avec cette alternative, nous disposons de divers systèmes à implanter dans les entreprises :

* Lorsque le dégraissage forme une *émulsion* :

- **Ultrafiltration** : Elle sépare les huiles et recycle les produits actifs et les solvants des procédés de dégraissage. Lors de ce processus, il faut que les différents composants aient un poids moléculaire inférieur seuil de coupure de la membrane considérée. L'efficacité est fort bonne, encore que le coût d'investissement initial puisse être important.

* Pour huiles *non émulsionnées*:

- **Système de balayage superficiel par flottaison et décantation et "oil skimmer"** : il consiste en l'installation d'une pompe dans le bain de dégraissage qui souffle continuellement de l'air sur sa surface et déplace progressivement les huiles et les graisses surnageant vers un compartiment de concentration. Ce système est utile seulement dans le cas d'huiles non émulsionnées au cours du dégraissage. Il s'agit généralement d'une méthode dont l'efficacité est médiocre, bien que son coût

d'implémentation soit relativement bas. Les huiles aussi peuvent être éliminées en utilisant des équipements d'entraînement mécanique.

- **Équipement de centrifugation** : il provoque la séparation des deux phases du fait que le poids des huiles et des graisses est supérieur à celui du produit dégraissant. Le système est assez efficace, quoique les coûts d'investissement et d'opération sont considérablement élevés.
- Outre ces possibilités, il en existe une autre qui consiste à allonger la durée de vie du dégraissage, moyennant l'**introduction d'un pré-dégraissage**. Lorsque le pré-dégraissage doit être vidé, on le renouvelle avec le contenu du bain de dégraissage. Ce dernier est reformulé. Avec cette mesure, on arrive à allonger la durée de vie du bain d'environ 20 à 30%.
- Finalement, une autre alternative simple pour récupérer du produit, dans le cas de dégraissages qui opèrent à une certaine température ($> 40\text{ °C}$), est l'**introduction d'un lavage étanche de récupération** qui permet de récupérer les pertes par évaporation. Par exemple, un dégraissage aqueux alcalin qui opère à environ 70 °C a des pertes par évaporation entre 6,5 et 31 l/h/m^2 .

3.2.1.2. Décapage

Un des principaux problèmes que comporte le processus de décapage chimique est l'attaque de l'acide sur la propre surface du métal de base. Ce fait donne lieu à deux effets :

- vieillissement prématuré du bain de décapage par contamination métallique ;
- par suite de l'effet précédent, vidage plus fréquent du bain avec l'augmentation conséquente de la consommation de matières de base et l'augmentation de la génération de courants résiduels.

Il est donc nécessaire de pouvoir agir sur la vitesse d'attaque de l'acide et sur le métal de base, en contrôlant le processus.

Pour ce qui est du fer, les paramètres de fonctionnement dans un milieu d'acide sulfurique et chlorhydrique sont :

- la concentration de l'acide ;

- la température du bain⁹ ;
 - la concentration en fer dissous¹⁰.
- Un système pour réduire l'attaque aux zones oxydées du métal de base consiste à introduire dans le bain un type quelconque d'**inhibiteur d'attaque**. Étant donné la grande variété d'inhibiteurs d'attaque disponibles sur le marché (amines organiques, etc.), il est recommandable de le choisir en tenant compte de sa compatibilité avec les opérations suivantes de traitement.
- Il y a aussi la possibilité de purifier les bains de décapage, soit par des charges soit en continu. Dans le cas du décapage du fer avec de l'acide sulfurique, on peut utiliser le système appelé **électro-électrodialyse**. La méthode consiste à concentrer l'acide sulfurique par migration d'ions au travers d'une membrane sous l'effet d'un champ électrique et à éliminer le fer par dépôt sur la cathode. Pour en savoir plus long, voir le point 3.2.3.3. Électro-électrodialyse plus loin dans cette même étude.
- Dans le cas du bain de décapage avec de l'acide chlorhydrique, on peut utiliser un équipement de **résines d'échange ionique** de type anionique qui fixeront le chlorure de fer formé dans le bain. Postérieurement, on procède à la régénération de la résine à l'eau, obtenant ainsi de l'acide chlorhydrique pur. Voir aussi le point 3.2.3.7. Échange ionique, dans cette même étude.
- Pour les bains de décapage du cuivre avec de l'acide sulfurique, on peut utiliser une unité d'**électrolyse en continu** sur le bain qui permet l'obtention du cuivre métallique directement à la cathode.

Autres systèmes plus simples à prendre en considération :

- **Introduction d'un prédécapage** avant le décapage (comme dans cas du dégraissage), alimenté par les vidages du bain de décapage.
- Dans ce cas aussi, pour les décapages à chaud (par exemple, du fer et du cuivre avec de l'acide sulfurique), il est intéressant d'**introduire un lavage étanche de récupération**, permettant de récupérer les pertes par évaporation du bain tout en récupérant l'acide. De plus, ce lavage de récupération peut servir à **reformuler un nouveau décapage**, au

⁹ La vitesse de décapage avec de l'acide sulfurique s'accroît notablement avec la température.

¹⁰ Dans le cas du décapage avec de l'acide chlorhydrique, la vitesse de décapage augmente sensiblement en présence de Fe²⁺ en dissolution.

moment où il doit être changé. Très souvent, cependant, il faut procéder à l'épuration du bain en continu, celui-ci se concentrant progressivement en métal de base.

- Pour finir, recommander l'introduction d'un **prédécapage mécanique**, dans tous les cas où la pièce le permet, ce qui permettra de réduire - ou parfois de supprimer - l'utilisation d'agents chimiques.

Dans le cas où il y aurait de grandes quantités de décapage à régénérer, on indiquera trois alternatives techniquement viables, mais dont le coût de l'investissement est élevé :

- Installation d'un **crystalliseur de sulfate de fer** : le mécanisme consiste à laisser refroidir le décapage à l'intérieur du cristalliseur jusqu'à une température telle qu'elle provoque la précipitation du fer sous forme de sulfate heptahydraté; une variante du système consiste à le chauffer afin d'obtenir la forme monohydratée du sulfate de fer. Avec ce système, on obtient entre 40 et 70% d'élimination du sulfate de fer, avec une réduction de 30 à 50% de la consommation d'acide neuf. On peut essayer de valoriser le produit obtenu, par exemple, en s'en servant comme coagulant dans des procédés d'épuration physico-chimique de l'eau résiduaire. Coût de l'investissement très élevé, uniquement recommandables pour de grands volumes de récupération (500 l/h ou plus).
- Système d'**incinération oxydative** : il consiste à pulvériser le décapage à l'intérieur d'un four à haute température, et ce faisant, on obtient la récupération HCl sous forme gazeuse et de Fe_2O_3 . Le système permet d'obtenir un acide récupéré concentré ayant moins de 10 g Fe /l. Il s'agit aussi d'un système au coût très élevé, applicable uniquement à de grandes installations de décapage (plus d'1 m³/h).
- **Échange liquide-liquide** : il consiste à extraire les métaux lourds des bains de décapage (Fe, Ni, Cr...) par addition de tributylphosphate dans du kérosène. Le système permet de récupérer de l'acide nitrique et, jusqu'à environ 70%, de l'acide fluorhydrique. Comme pour le reste des trois systèmes, l'investissement peut être très élevé et n'est justifiable que pour de grandes unités de décapage.
- **Retard ionique** : il consiste à séparer le métal dissous dans l'acide et permet de récupérer l'acide dans un degré de pureté suffisant pour pouvoir être réutilisé dans le processus.

3.2.1.3. Produits d'apport

Dans ce point, nous prenons en considération tous les produits constituant les divers bains de processus (dégraissages, décapages, additifs, sels métalliques, etc.).

On doit partir de l'idée qu'une bonne partie des pertes de produits est évitable, fondamentalement par deux voies :

- prévention des pertes, en évitant qu'elles se produisent ou en les réduisant :
 - choix du bain (nature, composition, concentration, etc.)
 - gestion du bain correct (en respectant les conditions de travail optimales, choix des concentrations minimales, entretien de bains, etc.).
- récupération et valorisation des pertes : par le biais de l'introduction d'équipement spécifiques :
 - systèmes permettant de récupérer tous les sels du bain :
 - osmose inverse : bains de nickel
 - électrodialyse : bains de nickel, cuivre et argent
 - électro-électrodialyse : bains d'étain et de chrome, purification de certains décapages (par exemple, d'acide sulfurique)
 - évaporation : bains de chrome, cadmium, zinc et argent
 - ultrafiltration : purification de dégraissages
 - retard ionique : récupération d'acides du décapage ou éloxalage
 - systèmes permettant de récupérer des métaux sans le reste des constituants :
 - électrolyse : tous les métaux
 - résines d'échange ionique spécifiques : argent, or, cuivre, bore, etc.

3.2.2 Réutilisation de l'eau

3.2.2.1 Technique de skip

Un des systèmes que l'on peut employer pour diminuer la consommation d'eau est la technique de skip.

Cette technique consiste à employer un même lavage pour différentes étapes chimiquement compatibles, par exemple employer le rinçage postérieur à une étape de décapage comme lavage préalable à un bain acide ou bien employer les eaux de lavage d'un décapage (légèrement acides) en tant qu'eaux de lavage du dégraissage. Ce avec quoi on arrive à réduire le nombre de cuves de lavages et la consommation d'eau.

Afin de pouvoir appliquer cette technique d'une manière cohérente, il est nécessaire d'envisager le fait que les étapes qui partagent des rinçages doivent être le plus près possible les unes des autres et situées de manière que les entraînements puissent être également minimisés ; dans le cas contraire, l'effet prétendu par la technique employée sera dévalué par l'augmentation des entraînements.

3.2.2.2. Recyclage par échange ionique

Les systèmes de recyclage par échange ionique sont en train de gagner en popularité, notamment dans les industries qui décident d'installer des unités d'épuration d'effluents.

Le système est très utile parce qu'il permet d'atteindre certains objectifs très importants :

- réduire la consommation d'eau du réseau dans un pourcentage élevé ;
- nettoyer les pièces avec un débit important d'eau qui, de plus, est un circuit fermé et dont le contenu ne se perd pas ;
- nettoyer les pièces avec de l'eau de très bonne qualité. (Ces équipements éliminent la quasi-totalité des ions de l'eau en la transformant en eau déminéralisée) ;
- éviter au maximum les contaminations des bains dues à l'entraînement de pièces ;
- épurer un volume d'effluents beaucoup plus réduit et très concentré, en augmentant l'efficacité des traitements d'épuration et en réduisant leur coût opérationnel ;
- réduire le coût d'investissement dans les installations de traitement d'effluents.

L'application de systèmes de recyclage d'eaux en servant de résines d'échange ionique doit être étudiée avec grand soin en fonction des espèces chimiques présentes dans les effluents et de leur degré de concentration.

La présence de certaines substances peut affecter les systèmes de recyclage, car ils peuvent bloquer les groupes actifs des résines et, par conséquent, rendre inutilisables les équipements. Il est aussi très fréquent que des espèces toxiques incompatibles soient retenues et concentrées conjointement. Ce qui peut être le cas de l'eau en présence de chromés et aussi de cyanures. Étant donné que les deux espèces sont anioniques, elles sont retenues dans la même résine, l'anionique, de façon que lorsque les résines se régénéreront, les deux polluants seront présents conjointement.

Si cela se produit, l'épuration des polluants ne pourra pas se faire par les méthodes habituelles et se complique considérablement. Il est donc nécessaire que ne soient **jamais mélangées des eaux contenant des chromés et des cyanures.**

Une autre difficulté typique peut être le mélange d'effluents contenant du nickel agissant comme cation avec des ions de cyanure libres. Dans ces conditions, il peut se former des complexes tel que le nickel tétracyanure, très difficile à détruire par les méthodes traditionnelles, et, en conséquence, qui s'échappent des systèmes d'épuration pris en compte. Il est donc nécessaire de prévoir cette situation afin d'éviter la formation du complexe ci-dessus mentionné.

Le deuxième grand problème associé au recyclage de l'eau utilisant des résines d'échange ionique est lié à la concentration maximale de polluants présents dans les eaux à faire recirculer.

Les équipements industriels de recyclage ont une capacité maximale fixe définie. Si la concentration en sels de l'eau que l'on fait recirculer est haute, cette capacité s'épuise dans des intervalles de temps très courts, obligeant à régénérer souvent les équipements. Cet effet est lié autant au coût de l'exploitation du système de recyclage qu'à la génération d'effluents de haute salinité.

La concentration maximale de sels dans l'eau recyclée sera un paramètre très important dont il faut tenir compte pour assurer une bonne mise en œuvre d'un recyclage.

Dans la plupart des cas, cela oblige à remodeler les lignes de travail de façon que deux rinçages consécutifs soient toujours interposés après chaque processus de traitement. Le premier opérera avec un débit élevé, en recirculant à l'intérieur de l'équipement de recyclage.

Le problème final que posent les systèmes de recyclage, même s'ils sont bien conçus, est l'augmentation de la salinité (ou conductivité) des effluents évacués. Ce problème est d'une solution difficile. En effet, d'un côté, la consommation d'eau est réduite et, par conséquent, la concentration de ses polluants augmente, obligeant à procéder à une épuration, qui devient plus efficace et se traduit par

un accroissement de la salinité ; de l'autre, les équipements de recyclage sont régénérés moyennant un acide (communément, chlorhydrique) un alcali (communément, soude), dans des quantités variables, mais qui, en moyenne, sont de 100 g d'acide chlorhydrique à 100%, par litre de résine cationique et 80 g d'hydroxyde de sodium à 100% par litre de résine anionique.

Cela implique dans la pratique des conductivités très hautes dans les effluents de régénération dues à la présence de sodium et de chlorures, espèces toutes deux très difficiles à éliminer. Cette accroissement de la salinité de l'eau peut causer, dans certaines zones, d'importantes modifications dans l'écosystème.

3.2.2.3 Recyclage par osmose inverse

Ce système de recyclage est une alternative aux échangeurs d'ions pour le recyclage des eaux de lavage. Son niveau d'implantation actuel est bas, bien qu'il soit techniquement réalisable.

Le mode de fonctionnement de l'osmose inverse se base sur la séparation des sels dissous du solvant, dans ce cas l'eau, moyennant une pression externe qui oblige à faire passer le solvant à travers une membrane osmotique qui ne permet pas le passage des ions salins.

De cette manière, à partir d'un débit ayant une concentration donnée en sels, on obtient deux solutions différentes. L'une, contenant en majorité du solvant, est dénommée perméat, d'un grand volume et faible concentration saline et, l'autre, est dénommée concentré, de peu de volume et haute concentration saline. Ainsi, il est possible de recycler le perméat pour des opérations de rinçage.

La séparation se fait par effet mécanique, en appliquant une pression, il n'y a donc aucune addition de produits chimiques pour la séparation des polluants (contrairement à ce qui passe avec les échangeurs d'ions). De cette façon, la teneur saline des effluents contaminés n'augmente pas, l'effet de la conductivité élevée étant ainsi contrôlé.

Un autre avantage de l'osmose inverse est sa capacité de travail sur des effluents plus concentrés que l'échange ionique, ce qui fait qu'il ne sera pas nécessaire de faire des dilutions avant de rincer avec de l'eau qui recircule. Par contre, la qualité de cette eau n'arrive pas à présenter les caractéristiques de pureté des systèmes de résines, raison pour laquelle, dans certains cas, ceux-ci seront encore nécessaires.

Malgré cela, ce type d'équipements présente des problèmes pratiques opérationnels qui rendent leur application difficile au niveau industriel. Les membranes utilisées jusqu'à présent sont beaucoup plus

performantes, mais continuent à poser des problèmes de résistance chimique face aux agents agressifs, au chrome hexavalent, au chlore, au persulfate, etc., en particulier à partir de certaines concentrations.

Au surplus, ces membranes présentent des problèmes importants de saturation qui doivent être prévenus en combinant des filtres à sable à l'entrée et des filtres à la sortie avec une dimension de passage jusqu'à 5 microns. Cette filtration est nécessaire aussi pour éliminer des matières organiques susceptibles d'endommager les membranes, et il serait même recommandable dans quelques cas d'installer des lits filtrants de charbon activé.

Un autre problème associé est la présence dans l'eau de cations qui produisent des incrustations, tels que le calcium ou le manganèse. Il est donc indispensable que toute l'eau qui pénètre dans le système soit adoucie au moyen d'un décalcificateur.

Comme on peut le remarquer, le système final est assez complexe par rapport aux avantages qu'il apporte, ce qui implique un coût d'installation pas mal plus élevé que les systèmes de recyclage par résines d'échange ionique. En revanche, au niveau opérationnel, le coût est assez inférieur, puisqu'il n'exige pas une consommation élevée de produits chimiques.

3.2.3 Récupération des entraînements

Malgré tout l'ensemble de mesures apportées pour réduire l'entraînement (voir le point 3.1.2.2. Réduction des entraînements), il subsiste un entraînement résiduel inévitable qui finit, dans le pire des cas, sur le sol du hall ou dans les cuves de lavage avec de l'eau. Comme on l'a déjà vu, cet entraînement est récupérable, en partie, pour l'amélioration de la structure des lavages (voir aussi 3.1.2.3. Améliorations des rinçages et des lavages).

Il y a cependant d'autres systèmes plus sophistiqués qui permettent aussi de récupérer une bonne partie de l'entraînement produit. Voyons lesquels :

3.2.3.1. Électrolyse

Ce système permet de récupérer un métal se trouvant dans une solution. Cette séparation s'effectue à l'intérieur d'une cellule électrolytique avec le dépôt du métal en question sur la cathode de celle-ci. Au point 3.2.1.2. Récupération de matières premières : décapage, on a déjà signalé quelques exemples de récupération.

Le fonctionnement du système est identique à celui de tout autre cellule électrolytique, raison pour laquelle il convient de procéder :

- en contrôlant la concentration du bain,
- en contrôlant périodiquement les équipements électriques
- en remplaçant les cathodes.

À part le métal récupéré, le reste de sels et de composés du bain n'est pas récupérable. La récupération du métal déposé sur les cathodes exige la destruction de celles-ci, ce qui se fait habituellement par incinération. Il faut donc disposer du service d'un récupérateur, normalement externe, et, à ce coût, on devra ajouter le coût total de la récupération.

En plus, indiquons que la consommation électrique est importante par rapport aux quantités récupérées, par conséquent, on l'utilise pour récupérer des métaux précieux, dont la valeur compense les dépenses de la récupération.

3.2.3.2. Électrodialyse

Celle-ci consiste aussi en un système électrochimique qui permet d'extraire les ions contenus dans une solution, par migration au travers de membranes sélectives, sous l'influence d'un champ électrique. Normalement, une cellule d'électrodialyse est formée par une membrane cationique qui délimite deux compartiments entre deux membranes anioniques. À l'intérieur de l'un des compartiments circule la solution à diluer (lavage) et, dans l'autre, la solution à enrichir (bain). Les membranes anioniques ne laissent passer que les anions et, les cationiques, que les cations. Les unes autant que les autres sont imperméables aux liquides. Les cations migrent dans le sens du courant électrique, de l'anode vers la cathode, en traversant la membrane cationique et sont retenus par la membrane anionique.

Ainsi, la concentration des électrolytes se fait d'un côté et pas de l'autre ; tant et si bien que cela permet de :

- séparer certains ions d'une solution,
- concentrer une solution qui peut être renvoyée vers le bain de processus.

Par conséquent, il s'agit d'un système de récupération de sels dans des bains chauds, où a lieu une évaporation naturelle. En ce sens, sa place est entre le bain de processus et le lavage étanche de récupération, en concentrant les sels entraînés vers ce lavage et en les faisant revenir dans le bain. Les deux objectifs visés sont ainsi atteints :

- faire revenir dans le bain une partie des sels perdus par entraînement,
- maintenir le lavage étanche de récupération à une faible concentration, ce qui fait que les eaux de lavage suivantes sont moins polluées et que le débit d'eau peut être réduit.

Ce type d'installation est utile pour des rinçages étanches de cuivre, nickel et argent.

Comme inconvénients présentés par le système, on peut citer les suivants :

- contrôles et entretiens quotidiens de l'équipement : contrôle de la pression de travail, vérification des filtres et des électrodes ;
- décarbonatation des membranes : tous les trimestres.

Étant donné que son rendement est très élevé, entre 95 et 97%, et que les coûts opérationnels et d'entretien ne sont pas très élevés, on estime une période moyenne d'amortissement de l'investissement inférieure à une année.

3.2.3.3. Electro-électrodialyse

Ce système combine les effets de l'électrolyse et ceux de l'électrodialyse en interposant une membrane d'électrodialyse (anodique ou cathodique) entre deux électrodes. Deux compartiments, un anodique et l'autre cathodique sont ainsi séparés entre eux. Le compartiment anodique est limité par une anode et la membrane, tandis que le compartiment cathodique est limité par la même membrane et une cathode. Le choix du type de membrane dépend des éléments que l'on veuille faire passer d'un compartiment à l'autre. C'est-à-dire qu'on obtient une filtration sélective d'anions et de cations.

L'autre phénomène qui a lieu est le dit électrolytique : l'oxydation dans l'anode et sa réduction de l'élément dans la cathode.

Comme application techniquement viable, on trouve la régénération de l'acide chromique et de l'acide sulfurique dans une cuve de lavage étanche. L'acide chromique est récupéré dans le compartiment anodique de l'appareil et peut être réintroduit, soit dans le propre bain de processus soit dans le lavage précédent le bain, afin de le réintroduire progressivement et lentement avec l'entraînement.

Comme facteur limitant du système, on peut signaler que la concentration maximale de travail en acide chromique est de 300 g/l.

On trouve d'autres inconvénients à ce système dans les méthodes d'entretien et de contrôle, qui sont très similaires à celle de l'électrodialyse. De plus, vu que l'équipement produit des solutions directement utilisables, il peut se présenter des cas de pollution de la solution par les impuretés s'y trouvant et qui sont également réduites dans la cathode.

Le principal coût opérationnel est le coût énergétique. En effet, on se trouve en présence de coûts de consommation allant de 25 à 30 kWh par kg d'acide chromique récupéré. Si l'on ajoute le coût de départ élevé de l'investissement, les coûts opérationnels et le prix de marché de l'acide chromique, les données nous indiquent que le système n'intéresse que les installations qui doivent récupérer de grandes quantités d'acide chromique.

3.2.3.4. Osmose inverse

Au point 3.2.2.3. Recyclage par osmose inverse, on a déjà largement décrit le système et son emploi principal en tant qu'élément de récupération d'eaux. On ajoutera maintenant uniquement son emploi possible en tant que récupérateur de matières provenant des entraînements qui ont lieu entre les cuves.

Dans le cas de la récupération de sels, les ions métalliques sont retenus par les membranes d'osmose, les pourcentages d'efficacité obtenus avoisinant souvent les 90 %.

Un système utilisé est celui de la récupération des sels de nickel contenus dans un lavage étanche de récupération. Par contre, la récupération des brillants à métaux du bain est moins importante que celle du nickel, atteignant seulement des valeurs de 60%. Pour cette raison, des analyses et une reformulation du bain sont nécessaires pour atteindre les paramètres optimaux de travail.

Un autre inconvénient présenté par cette installation est que, à la différence d'autres systèmes de séparation sélective, dans ce cas aussi, les impuretés captées progressivement par le bain se concentrent, ce qui suppose un risque élevé de contamination de ce bain, du fait qu'il concentre progressivement tous les sels.

Il s'agit d'équipements au prix élevé qui exigent des installations annexes pour pouvoir bien fonctionner, avec des entretiens périodiques tels que le nettoyage des membranes avec une solution d'acide citrique ou acétique pour éliminer d'éventuels dépôts calcaires et carbonatés. Le tout, ajouté au bas prix des sels récupérables font que les périodes d'amortissement de l'investissement soient normalement très longues.

3.2.3.5. Ultrafiltration

Ce concept a déjà traité au point 3.2.1.1. Récupération des matières premières : dégraissage. Ici, on ajoutera que, de même que dans le cas de l'osmose, le système fonctionne en séparant le soluté de la solution en employant pour cela des membranes de filtration, grâce à une pression externe qui est imprimée au système. La différence importante réside dans le fait que, dans ce cas, on utilise des membranes sélectives en fonction de ce que l'on veut filtrer. Il faut donc déterminer – habituellement de façon empirique - le type de membrane et la taille du pore souhaité.

Actuellement, on trouve deux types de membranes disponibles :

- membranes organiques : acétate de cellulose, polyamide, etc.
- membranes minérales : la principale, en oxyde de zirconium.

Alors que les premières sont moins onéreuses, elles ont des applications plus limitées ; les membranes minérales, quant à elles, sont utilisables sur des liquides à des températures élevées (entre 50 et 120 °C) et, ce, en présence de solvants aromatiques ou chlorés, qui sont tous des facteurs que les membranes organiques ne supportent pas.

Leurs possibles applications dans le secteur des traitements de surfaces sont les suivantes :

- séparation et concentration d'effluents d'électrophorèse, dans le trempage de métaux ;
- récupération de sels dans les bains de dégraissage, moyennant la séparation des huiles.

En ce qui concerne le système lui-même, les principaux inconvénients rencontrés sont la nécessité de nettoyer le module d'ultrafiltration au moyen d'une solution d'acide lactique et de butyle-butane, avec, en plus, des relavages successifs avec de l'eau reminéralisée.

D'un autre côté, il s'agit d'équipements onéreux qui ne justifient pas la récupération du dégraissage. Dans certains cas, cependant (situations avec des pièces très chargées qui sont à l'origine de véritables problèmes au moment d'épurer les bains de dégraissage épuisés), leur installation peut être intéressante.

L'avantage de cette technique est qu'elle permet d'avoir une qualité constante de dégraissage, appropriée pour des procédés dans lesquels le dégraissage doit être d'une grande qualité.

3.2.3.6. Évaporation

Il s'agit d'un système de concentration de matières qui utilise de l'énergie sous forme calorifique pour évaporer la partie liquide en concentrant les sels qui y sont dissous.

Étant donné ce facteur de concentration en sels, on peut s'en servir pour les réintroduire dans le bain de processus. C'est un système particulièrement adéquat dans le cas de bains qui opèrent à basse température ($< 40\text{ °C}$), dans lesquels les pertes par évaporation naturelle ne sont pas suffisamment significatives au point de pouvoir d'introduire des lavages étanches de récupération.

Pour sa part, l'eau évaporée, une fois condensée, peut servir à alimenter le système de lavages de la ligne de traitement.

Le système d'évaporation peut être introduit dans la ligne à différents niveaux :

- sur un système de lavages multiples en cascade à contre-courant
- au niveau du lavage statique qui vient après le bain de processus
- y compris, sur le propre bain de processus, en le concentrant

Évidemment, on ne peut obtenir une récupération des entraînements que dans les deux premiers niveaux.

Afin d'éviter, d'un côté, un coût énergétique important dans l'échauffement jusqu'à ébullition de la dissolution, et, de l'autre, la dégradation de certains constituants organiques présents dans les bains galvaniques, le système d'évaporation à vide est le plus recommandable. Avec ce système, on peut facilement obtenir un processus d'évaporation d'une solution aqueuse à une température atteignant seulement 30 à 40 °C.

Voici quelques exemples d'applications pratiques du système :

- évaporation d'huiles solubilisées
- récupération de zinc (dans ce cas, vu que le bain de zingage est assez chaud, en provoquant le vide de la solution, on arrive déjà à faire bouillir la solution sans qu'il soit nécessaire de procéder à un échauffement additionnel)
- concentration d'un bain de chromage pour permettre l'introduction de lavages statiques à la suite du bain

- dernièrement, on a observé l'implantation de ces équipements combinés à des équipements de recyclage d'eau par voie de l'échange ionique en vue d'arriver au "zéro rejet" en matière d'eaux résiduares.

Pour sa part, la seule difficulté que le système présente est le coût élevé de l'appareil. Pour ce qui est des entretiens, il s'agit d'équipements assez robustes. Le seul élément critique à contrôler est la pompe à vide qui, étant donné son coût élevé, exige une attention plus détaillée. Quant à l'exploitation de l'équipement, il est important de contrôler les pressions et les températures de travail, le niveau de liquide d'évaporation et les débits de condensation et de distillation. Afin d'arriver à tirer le meilleur parti de cette technique, il convient d'analyser et d'adapter, si nécessaire, la ligne de galvanoplastie pour y inclure des rinçages multiples ; il est recommandable de combiner cette technologie avec un équipement de résines d'échange ionique.

3.2.3.7. Échange ionique

On a largement traité de ce système au point 3.2.2.2. Recyclage par échange ionique, se rapportant aux eaux générées de processus.

Maintenant, on ajoutera les diverses possibilités de récupération de certains ions perdus avec l'entraînement.

En plus des applications déjà mentionnées pour la récupération en continu des eaux de rinçage, les équipements de résines sont utilisables pour les applications suivantes :

- Épuration de récupérations de bains d'acide chromique ou de passivations chromiques, moyennant la retenue dans la résine de cations indésirables : Cr^{3+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Fe^{3+} , Cu^{2+} , etc. En procédant à leur dépollution, on rend possible leur réintroduction dans le bain, la récupération des entraînements produits étant ainsi obtenue.
- Récupération de métaux présents dans les eaux de lavage, moyennant l'emploi de résines de type anionique (Ag^+ , acide chromique,...).
- Régénération d'un décapage d'acide chlorhydrique, moyennant l'élimination des ions Fe^{3+} . L'acide chlorhydrique est récupérable (il suffit d'ajuster sa concentration) et le chlorure ferrique obtenu est valorisable, tout en le concentrant préalablement.

Nous reviendrons à nouveau sur le point 3.2.2.2. Recyclage par échange ionique de cette étude pour parler des problèmes et inconvénients reliés à l'installation.

On peut conclure ce point en disant que les échangeurs ioniques permettent de concentrer et d'extraire des polluants (ions spécifiques). Ceci étant, le niveau de concentration qu'ils peuvent atteindre ne permet pas de réintroduire directement les sels récupérés, ceux-ci devant être concentrés davantage. Ce qui fait qu'ils ne sont pas très utilisés dans ce but. Par contre ils sont tout particulièrement indiqués, comme on l'a vu, pour des solutions très diluées, comme des rinçages que l'on doit faire recirculer dans la ligne de lavages.

Finalement, pour conclure ce point consacré à la récupération des entraînements, détailler les systèmes les plus simples, dont nombre d'entre eux ont déjà été évoqués dans les points précédents, et qui peuvent être combinés avec tous les autres systèmes de récupération vus jusqu'ici.

3.2.3.8. Autres mesures

- Barres de support pour châssis

Ce système est utile dans des installations de type manuel, où les ouvriers doivent manipuler des châssis d'un grand poids rendant difficiles les opérations d'égouttage.

L'opération est certes bien simple, mais, malheureusement, elle n'est pas très souvent réalisée.

En réalité, elle n'implique que la réalisation de certaines opérations additionnelles de suspension de châssis. Ainsi, tandis qu'un crochet égoutté est déplacé vers le processus suivant, un second se trouvera en position d'égouttage et ainsi de suite.

Ce système est très utile sur les baignoires de travail à température ambiante et dans les rinçages de récupération, mais pas tellement sur les baignoires de processus à chaud, car la solution peut arriver à sécher sur les pièces en créant des problèmes de finition finale. Dans ces cas-là, leur utilité se limite aux rinçages de récupération.

- Couvre-joints entre les différentes cuves de travail

Cela consiste à placer une surface inclinée entre deux cuves consécutives dans le processus de production.

Dans la pratique, ce type de dispositifs n'est presque pas utilisé, même dans les installations automatisées, alors que leur utilité est indiscutable.

Dans les unités de processus manuel, l'emploi de couvre-joints et une disposition adéquate du processus permettront de récupérer une bonne partie des entraînements, tout en évitant que ces derniers tombent par terre en générant un autre problème difficile à résoudre.

- **Réservoirs d'égouttage**

Lorsque le type de production est tel que l'égouttage est prolongé, comme c'est le cas dans les productions en tambour, il convient grandement d'envisager l'emploi d'un réservoir de collecte des égouttements.

Celui-ci consiste en un réservoir vide où le transporteur peut être suspendu durant un laps de temps, tandis que les pièces sont en train de s'égoutter. Dans le cas de tambours, le tambour peut tourner tant qu'il se trouve dans cette position, assurant ainsi un maximum d'égouttage. Lorsqu'une certaine quantité de solution s'accumule au fond de ce réservoir, on peut la faire revenir par pompage vers le réservoir de traitement.

- **Réservoirs d'égouttage par aspersion**

Une variante des réservoirs d'égouttage est les réservoirs d'aspersion. Dans ceux-ci, les pièces sont mouillées avec une petite quantité d'eau aspergée sous forme de fines gouttes formant comme un brouillard qui se condense sur la surface des pièces, provoquant ainsi un égouttage au fond du réservoir. Ce système ne peut pas être considéré comme un lavage étant donné la petite quantité utilisée.

La nature vaporeuse de ce brouillard fait qu'il est possible d'accéder à toutes les parties des pièces, même les plus inaccessibles. La solution accumulée dans le fond du réservoir est assez concentrée et peut donc être réutilisée dans le propre réservoir de traitement.

Ce système est de peu d'utilité pour des pièces à concavités où la solution de l'entraînement peut rester retenue.

- **Rinçages étanches de récupération**

Comme on l'a vu auparavant, ce système est idéal pour la récupération des matières premières constituant les bains de processus, notamment s'ils opèrent à chaud.

Pour certains cas spéciaux de bains opérant à température ambiante, on peut implanter les systèmes de récupération ECO.

4. ALTERNATIVES DE TRAITEMENT

Nous vous présentons ci-dessous diverses alternatives à ce traitement, qui visent la réduction des déchets générés dans le processus – principalement sous forme de boues contenant des hydroxydes métalliques – ainsi que la minimisation de la quantité de substances présentes dans les eaux épurées.

Une bonne alternative de traitement passe forcément par une **séparation correcte de ces effluents** du reste. C'est seulement de cette façon que l'on obtiendra une précipitation correcte de tous les métaux.

4.1 Cassure de complexes métalliques

Une fois l'effluent à traiter séparé, on trouve, parmi les alternatives au processus conventionnel qui arrivent à séparer le métal du complexe et rendent possible sa précipitation ultérieure, les suivantes :

1. Traitement avec du **chlorure de calcium, du peroxyde d'hydrogène et de l'acide sulfurique**. Le système, outre qu'il casse le complexe, réduit le cuivre à la forme cuivreuse qui précipite très bien en milieu alcalin.
2. Une autre variante de ce qui précède, plus effective et de plus récente implantation, est l'addition de sulfate ferreux, préalable au traitement conventionnel. Le **sulfate ferreux et le peroxyde d'hydrogène, à pH 9**, arrivent aussi à réduire le cuivre à la forme cuivreuse, tout en occupant le lieu dans le complexe grâce à la présence d'ions ferreux ou ferriques. Le principal inconvénient de la méthode est la consommation élevée de sulfate ferreux et la grande quantité de boues qu'il génère.
3. Il y a aussi des alternatives dans des applications similaires qui passent par l'emploi d'un **polysulfure de sodium et d'un hydrosulfure de sodium**. Comme avantage par rapport aux précédents, nous avons le fait qu'ils génèrent une quantité bien moindre de boues résiduelles, mais, en contrepartie, ils présentent un risque de génération de sulfure d'hydrogène gazeux, hautement toxique. Il convient donc, dans ce cas, de procéder à un contrôle rigoureux du pH et de veiller à ce que le local où sont appliqués les composés soit bien ventilé.
4. Une alternative à ces traitements, bien plus récente et qui n'est pas encore au point, consiste dans l'emploi d'un **xanthate insoluble d'amidon (ISX)**. Un emploi possible de cette molécule organique est la régénération de résines cationiques d'échange ionique, puisqu'elle libère les ions magnésium qui occupent les lieux des métaux absorbés. Les traitements d'épuration combinant ce composé avec d'autres de type sulfureux peuvent réduire notablement la présence de métaux lourds dans les eaux résiduelles. En règle

générale, les composés sulfureux sont bien plus insolubles que ceux formés avec des hydroxydes.

5. Finalement, pour l'élimination de métaux complexés et d'autres composants d'élimination difficile par voie physico-chimique, mentionner la possibilité d'utiliser des **résines d'échange ionique spécifiques**. On dispose pour cela sur le marché de résines celantes pour Cu, B, NO₃⁻, parmi d'autres. Afin d'éviter des problèmes avec l'éluant de régénération, le plus recommandable est de régénérer la résine de façon centralisée, dans des unités de traitement de déchets.

4.2 Oxydation des cyanures

Sur ce point, les alternatives à l'hypochlorite en milieu alcalin passent par les suivantes :

1. Oxydation de cyanures alternative avec du **gaz chlore** ; cette possibilité est particulièrement adéquate dans le cas de grandes stations d'épuration à cause du moindre coût opérationnel qu'elle suppose et de la moindre quantité de boues que le système génère.
2. Oxydation avec du **peroxyde d'hydrogène** qui le transforme en cyanate et, en plus, sans formation de composés intermédiaires. Au surplus, comme il a déjà été dit auparavant, ce composé facilite la cassure de complexes métalliques rendant possible leur précipitation ultérieure.
3. Destruction de cyanures utilisant un **acide mono-peroxyde sulfurique**, lequel agit non pas en tant qu'acide mais en tant que sel triple acide. Le processus qui a lieu est complexe ; ajoutons simplement qu'avec cette méthode la vitesse de réaction avec le cyanure s'accroît sensiblement, atteignant des niveaux optimaux d'épuration du composé.
4. Oxydation de cyanures au moyen d'**oxygène ou d'air, avec du charbon actif**. De même que dans le deuxième cas, le cyanure s'oxyde grâce à la présence d'oxygène. Afin de faciliter le contact entre le liquide et l'oxygène – ou air - on fait passer celui-ci à contre-courant à travers une colonne pleine de charbon actif. Dans ce cas, l'oxydation catalytique du cyanure a lieu à la surface du charbon. Il existe la possibilité d'aérer l'eau contenant des cyanures dans un réservoir où se trouvent des particules de charbon actif en suspension. Le résultat final dans les deux cas est la formation d'un cyanate, avec l'avantage que la génération de boues résiduelles à la fin du traitement est moindre que dans le cas conventionnel avec de l'hypochlorite de sodium.
5. Destruction de cyanures au moyen d'un **processus d'oxydation anodique**. Le mécanisme de réaction qui a lieu est fort complexe, étant donné qu'un grand nombre de réactions se produisent. Le système consiste à oxyder dans une cellule électrolytique, sous diverses

conditions de travail, le cyanure qui passe à la forme oxydée dans l'anode. Il s'agit d'une méthode lente et qui n'est utile que pour des solutions de volume réduit et concentrées (par exemple, épuration de bains avec des métaux précieux). En tant qu'aspects intéressants de la méthode, il convient de mentionner le fait que la réaction est totalement irréversible, la formation de cyanures par réduction du cyanate dans la cathode n'étant pas possible. Un cas idéal est celui dans lequel, en plus de l'oxydation du cyanure dans l'anode de la cellule électrolytique, il se produit la réduction du métal dissous dans la solution.

6. Destruction de cyanures par **précipitation avec des sels de Fe (II)**. Les ions ferreux forment, avec les cyanures, un complexe extraordinairement stable qui peut se précipiter (c'est ce que l'on appelle les hexacyanoferrates ou ferrocyanures). Il s'agit d'un bon système pour éliminer des cyanures dans des solutions concentrées, en obtenant un précipité facilement filtrable. Le grave inconvénient qu'il présente, c'est que dans la vase formée le cyanure n'est pas oxydé, ce qui fait de ce déchet un déchet toxique.
7. Il existe une autre alternative, bien que nous ne ferons que la citer étant donné qu'il s'agit d'un processus cher et qui exige beaucoup de contrôle. C'est la **destruction thermique de cyanures** au moyen de l'emploi de sources de combustion. À des températures élevées (entre 140 et 220 °C), on obtient l'hydrolyse du cyanure et sa combustion ultérieure.

4.3 Réduction du chrome hexavalent

Quant aux alternatives au traitement conventionnel, elles passent par les suivantes :

1. Réduction avec du **dioxyde de soufre** gazeux. Le système consiste à mélanger dans un réservoir de réaction le liquide résiduaire avec le gaz ; la réaction est très rapide, les niveaux de réduction atteints étant bons. Comme principal avantage, on peut dire que, s'agissant d'un gaz, il ne génère pas autant de boues que dans le cas de l'emploi du bisulfite de sodium. De plus, étant donné que le gaz est acide, il n'y a pratiquement pas de consommation d'acide extra pour réduire le pH dans le processus.
2. Réduction de chrome avec l'utilisation de **composés de Fe (II)**. Le principal avantage de la méthode réside dans le fait que le processus est pratiquement indépendant du pH – à l'intérieur d'une certaine marge - ; c'est-à-dire qu'il n'est pas nécessaire, comme dans le cas du bisulfite, de ramener le pH à des valeurs de 2-2,5. Ceci est particulièrement intéressant en vue de réduire la consommation d'acide et d'alcali afin de faire remonter ce dernier jusqu'à des valeurs de précipitation des métaux ; de plus, les ions ferriques présents dans le système agissent en tant qu'agent flocculant, favorisant la décantation des hydroxydes métalliques formés ultérieurement.

3. Réduction de chrome hexavalent par voie **cathodique**. De même que dans le cas des cyanures, les chromés peuvent se réduire dans la cathode d'une cellule électrolytique. Le processus, cependant, n'est effectif que lorsque la concentration en chromés est basse (< 0,5 mg/l). De toutes façons, c'est une méthode qui n'est pas adoptée dans la pratique, à cause des diverses difficultés techniques qu'elle comporte (processus complexe électrochimiquement, consommation électrique importante, réactions inverses avec nouvelle formation du composé, etc.).

4.4 Coagulation

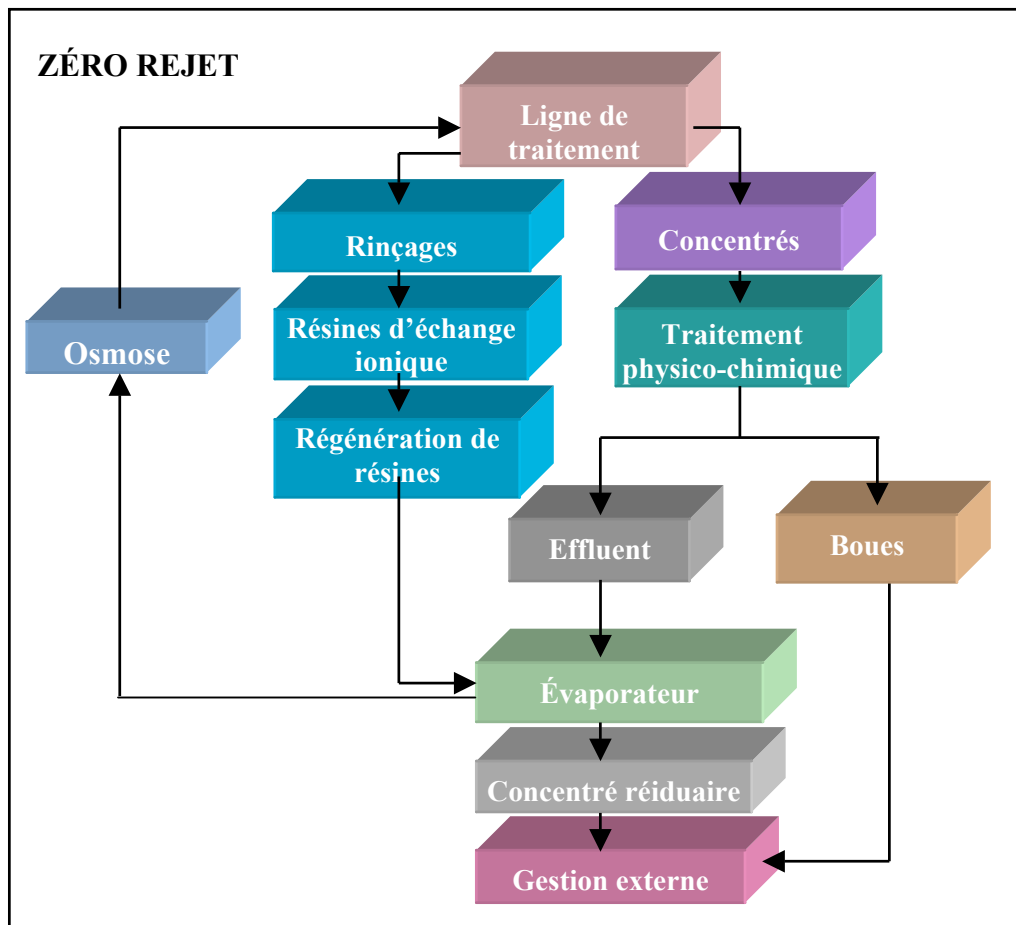
Pour ce qui concerne le processus de coagulation habituel, avec du chlorure ferrique, nous ferons une brève mention ici d'une technologie utilisée parmi les entreprises du secteur, à savoir : l'implantation d'unités d'**électrocoagulation**. Le système consiste, pour l'essentiel, en la fabrication *in situ* des ions ferreux ou ferriques indispensables pour obtenir une bonne formation de caillots avant l'étape de neutralisation et de précipitation des métaux.

En soi, la méthode emploie une cellule électrolytique où, moyennant le passage d'un courant électrique, on obtient la formation d'ions de Fer provenant d'une anode fabriquée avec de la tôle de Fer. En fait, c'est l'industriel lui-même qui fabrique son propre coagulant.

Comme avantage principal, on peut citer la réduction de la conductivité de l'eau ; rappelons que, dans le cas traditionnel, les ions ferriques sont apportés par une solution de chlorure ferrique, dont les chlorures sont ensuite solubilisés dans l'eau épurée. Il y a aussi une moindre demande de solution alcaline pour monter le pH de la solution et, conséquemment, une diminution sensible du volume de vases résiduaux générées. Comme principal inconvénient, le coût élevé de l'unité d'électrocoagulation. Cette technique est applicable dans les cas où les caractéristiques des eaux présentent peu de variabilité, ceci étant-il est recommandable de disposer de réservoirs d'homogénéisation pour arriver à obtenir cette régularité. En fonction du type d'eau à homogénéiser, il est nécessaire d'installer un système d'agitation pour éviter les précipités.

Finalement, pour conclure cette section, nous ferons mention des diverses utilités des équipements destinés à la récupération et au recyclage de l'eau qui, ces dernières années, sont en train de s'imposer dans le secteur en vue d'atteindre un "zéro rejet" ; il a déjà été largement traité de tous ces équipements dans les sections précédentes, ici nous ne ferons référence qu'à un type d'installation qui est en train de gagner du terrain dans ce domaine, il s'agit de la combinaison de systèmes de recyclage d'eaux de lavage moyennant l'emploi de résines d'échange ionique, parfois combinés à des équipements d'osmose inverse, combinés à des évaporateurs à vide pour la concentration des éluants

provenant de la régénération de résines et des bains de prétraitement épuisés. Le résultat final est un concentré résiduaire qui doit être géré comme un déchet spécial.



5. AUTRES ASPECTS À CONSIDÉRER

Dans ce chapitre, on considère tout un ensemble de recommandations variées qui vont dans le sens de réduire le risque de pollution, soit sur le lieu de travail soit dans l'environnement. Comme on le verra, nombre de ces propositions ont déjà été recommandées dans les sections précédentes, notamment celle qui fait référence aux bonnes pratiques environnementales.

5.1. Localisation de magasins de produits

En règle générale, les magasins doivent être situés le plus près possible du lieu où les produits sont consommés. Bien qu'il soit toujours plus recommandable de ne disposer que d'un seul lieu de stockage.

Évidemment, il faudra aussi le situer à un endroit facilement accessible aux camions de transport.

5.2. Gestion du magasin

Seul un nombre déterminé de personnes devrait pouvoir accéder au magasin. Celles-ci, entre autres aspects, devraient avoir suffisamment d'informations et une formation de base sur les caractéristiques et les dangers que comportent les produits stockés.

Comme on l'a vu auparavant dans d'autres sections, il faut procéder à une distribution des produits en évitant les mélanges, au moyen d'un étiquetage visible, de la confection de cuvettes de retenue séparatrices (acides de bases et, en particulier, de cyanures), etc.

Il est également recommandable de préparer des fiches d'état du stock permettant de contrôler les entrées et les sorties de produits du magasin et de réduire le risque de se retrouver sans un approvisionnement approprié de produits.

5.3. Cuvettes de retenues

Elles doivent permettre de recueillir d'une façon suffisante des épanchements éventuels et de garantir un haut degré d'étanchéité.

Il convient que la cuvette permette de recueillir autant les épanchements verticaux que les horizontaux issus de fuites dans les réservoirs élevés.

Comme on l'a déjà dit à plusieurs reprises, les cuvettes doivent être du type séparateur, évitant les mélanges entre acides et cyanures, ainsi que d'autres mélanges qui, de par leur nature, rendent difficile ou empêchent la réutilisation des produits épanchés.

5.4. Alimentation d'eau

Pour bien faire, l'alimentation d'eau dans l'atelier de galvanoplastie devrait être unique, disposer d'un compteur et d'une électrovanne reliée à un système de mesure du débit : si la consommation part en flèche et se maintient ainsi, on agira alors sur l'électrovanne en fermant le système d'alimentation.

Un système recommandable est celui de l'installation d'une cuve de stockage d'eau, dimensionnée pour plusieurs heures de fonctionnement, de façon à permettre de stocker l'eau épurée dans de mauvaises conditions. De cette façon on éviterait son déversement direct à l'extérieur en cas d'épuration défectueuse ou d'accident.

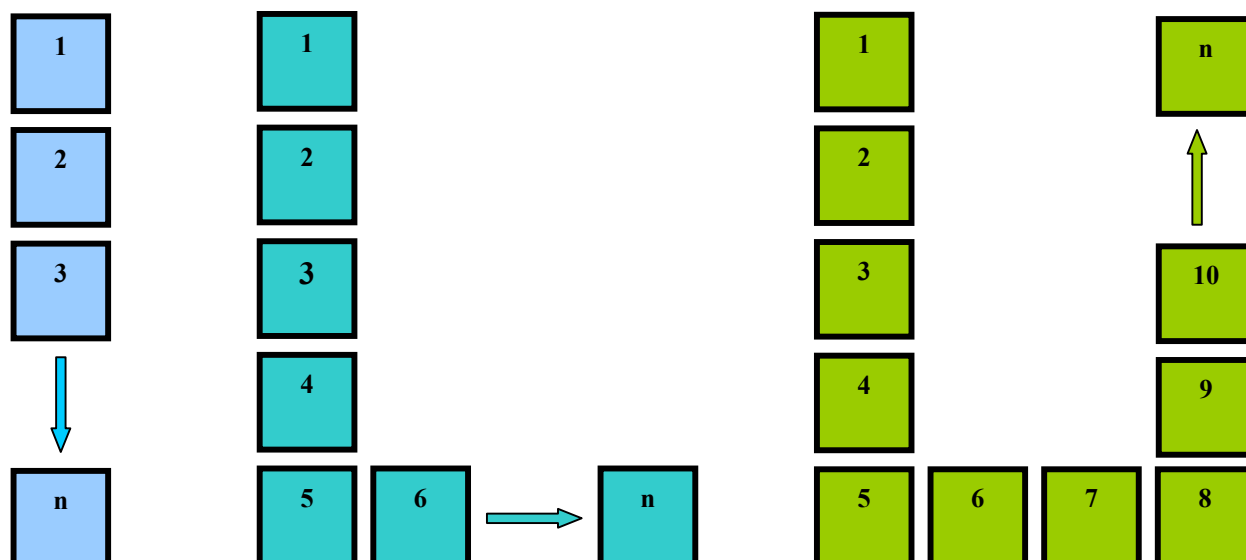
5.5. Protection de conduites

Les conduites de réactifs ou d'effluents qui ont été mal fixées ou mal protégées peuvent devenir des sources de génération des courants résiduaire à cause des cassures ou des fissures.

Il faudra donc les fixer convenablement et les protéger avec des éléments résistants pour éviter ces éventualités.

5.6. Conception des lignes de traitement

Compte tenu du fait que les principaux problèmes écologiques du secteur émanent de l'entraînement, il faudra prévoir, dans la conception de l'unité de galvanoplastie, le nombre minimal de carrefours de couloirs afin d'éviter qu'une partie de l'entraînement produit avec le mouvement entre les cuves finisse par tomber sur le sol du hall.



Étant donné que cela n'est pas toujours faisable - surtout dans des unités manuelles ayant différentes finitions finales – il faut prévoir la pose de plateaux sous les corridors pour le recueil de cet égouttement, tout en évitant que celui-ci tombe par terre. Ces plateaux doivent être reliés au réservoir correspondant – de préférence, aux concentrés - en vue d'une épuration ultérieure de l'effluent.

5.7. Transvasement d'effluents

Les équipements de pompage d'effluents et d'autres liquides doivent s'ajuster aussi à toute une série d'aspects :

- les pompes doivent être d'une qualité appropriée au type de liquide de transvasement ; par exemple, il faut prendre soin de l'intérieur des pompes destinées à pomper des effluents ou des liquides chromiques, à cause de l'effet fortement corrosif que les substances pompées ont sur le fer, voire sur l'acier inoxydable lui-même ;
- prendre la précaution de disposer d'un double système de pompes destinées à pomper les effluents dilués vers l'unité de traitement des eaux, puisque c'est par là qu'arrive le débit le plus important à l'unité de traitement ;
- dans certains cas, il peut être intéressant de placer des compteurs horaires de service des pompes.

5.8. Collecte d'effluents

La collecte des effluents doit être faite dans des canalisations fermées séparément pour chaque type d'effluents et dans un matériau résistant. Par mesure de précaution, tenir compte du vidage périodique et habituel des baignoires de dégraissage pouvant se trouver à une température d'environ 65 à 70 °C ; une conduite en PVC, par exemple, ne résistera pas à l'échauffement produit et se déformera. Si cette même conduite est fabriquée en fer, qui résiste bien à la température, elle ne supportera pas l'attaque de la soude, par exemple, et, avec le temps, elle finira par se perforer. Un bon matériau pour cet effluent est l'acier inoxydable.

En ce qui concerne la séparation d'effluents, il faut disposer au moins des conduites suivantes :

1. Concentrés acides et chromiques
2. Concentrés alcalins
3. Concentrés cyanurés (ne pas les mélanger aux précédents à cause du risque de formation de complexes entre les métaux des bains cyanurés et les complexants présents dans les dégraissages)
4. Dilués acides et alcalins non cyanurés
5. Dilués chromiques
6. Dilués cyanurés

De plus, il est intéressant de signaler que lors de la collecte d'effluents, il faut prévoir les futures modifications de l'unité de traitement. Le système idéal consiste en une galerie accessible dans laquelle les conduites sont fixées.

5.9. Ambiance de travail

Un atelier mouillé d'eau, au sol glissant, avec une atmosphère humide et corrosive favorise les accidents de travail et les maladies. Il faut travailler dans des conditions appropriées, de propreté, d'ordre, en disposant des éléments, des équipements, etc. adaptés à chacune des tâches développées.

Si non, on favorisera une négligence généralisée qui finira par répercuter en une mauvaise qualité de la production, une dégradation de l'ambiance de travail et, probablement, une augmentation de la génération de courants résiduels.

L'expérience prouve qu'un atelier sale et contaminant est généralement moins performant sur le plan de la productivité.

5.10 Automatisation et programmation des processus

Déterminer les paramètres de contrôle des processus et les automatiser est l'une des voies d'optimisation de l'activité de production à notre portée. Cette voie, qui entraîne également la minimisation des courants résiduels générés, permettra en outre de traiter toutes les pièces à égalité, en fonction du standard de qualité de l'entreprise.

La viabilité de l'application de cette alternative dépendra fortement des caractéristiques concrètes de l'entreprise (taille, espace, etc.).

6. ANALYSE DE LA VIABILITÉ TECHNIQUE ET ÉCONOMIQUE DE QUELQUES ALTERNATIVES

Nous avons, pour mettre en place ce chapitre, pris deux modèles réels d'entreprises de traitement de surfaces, les entreprises A et B, pour lesquelles nous avons évalué les divers coûts et économies intervenant au moment de l'implantation de quelques alternatives. Ce chapitre a pour objectif d'établir, de façon relativement fiable, la période de retour des investissements (PRI) proposés pour quelques-unes des alternatives de minimisation identifiées.

Entreprise A :

Petite entreprise de type familial employant cinq ouvriers et disposant de lignes manuelles en châssis de finis nickel et chrome :

Entreprise B :

Entreprise moyenne, employant quarante ouvriers, spécialisée dans l'anodisation dure de l'aluminium via des lignes automatiques en pompe :

Nous vous présentons maintenant l'étude de viabilité technique et économique d'une bonne partie des alternatives de minimisation vues auparavant.

ENTREPRISE A :

Typologie : entreprise de type familial, très petite, spécialisée dans le nickelage et le chromage avec des lignes manuelles en châssis.

Description générale :

Nombre d'ouvriers : 5 Heures travail/jour : 8 Équipes : 1

Activité : revêtement électrolytique décoratif en nickel et en chrome sur des pièces en fer et en laiton.

Type d'installation : petite installation manuelle, avec passages et espaces entre les cuves.

Production : environ 2,3 millions de dm² /an pour l'éclairage

Facturation : 19 833,99 €/an

Principaux polluants produits :

Eaux résiduaires :

- Caractérisation : effluents dilués en continu et concentrés par charges avec :
 - pH hautement alcalin ou acide en fonction du concentré
 - présence de métaux lourds comme le fer, le nickel, le cuivre et le zinc
 - présence de chrome hexavalent
 - d'autres composés tels que les sels solubles avec chlorures, sulfates et bore
- Régime de rejet : l'entreprise rejette approximativement 1,4 m³/h, de façon continue, tout au long des 8 heures de travail par jour.

Déchets industriels :

- Caractérisation :
 - Dangereux :
 - ⇒ eaux résiduaires et solutions concentrées de bains épuisés
 - ⇒ boues d'épuration des effluents
 - ⇒ récipients de matières premières vides et sales
 - Non-dangereux :
 - ⇒ déchets généraux non-recueillis de façon sélective

Gestion actuelle des polluants produits :

Eaux résiduaires : traitement physico-chimique consistant à réduire le chrome hexavalent en chrome trivalent via du bisulfite sodique, coagulation au chlorure ferrique, neutralisation à l'hydroxyde sodique, floculation via polyélectrolyte anionique, sédimentation et concentration des boues et leur séchage via filtre-presse.

Déchets industriels : sauf en ce qui concerne les eaux résiduaires et les solutions concentrées des bains épuisés qui sont traitées dans l'entreprise elle-même, les déchets générés par l'entreprise sont gérés à l'extérieur par des entreprises agréées.

Coûts de la gestion actuelle des polluants :

Par pertes de matières premières et d'eau : 9 616,19 €/an

Eaux résiduaires : 23 439,47 €/an

Déchets industriels : 2 704,55 €/an

DESCRIPTION DES ALTERNATIVES DE MINIMISATION

Courant résiduaire analysé : pollution des eaux de lavage.

Alternative de minimisation : réduction de l'entraînement.

Options de minimisation : incorporation de couvre-joints entre les cuves du bain et celles du lavage postérieur.

Autres courants concernés : aucun.

Matières premières concernées : toutes celles des divers bains de processus.

Processus ou produits concernés : l'ensemble de l'installation de galvanisation.

Économies possibles concernant la consommation des matières premières et auxiliaires : 30% de l'entraînement :

Bain de processus ou composant	Perte par entraînement	Économie par réduction de perte (30%)	Total économie (€/an)
Dégraissage ultrasons	88,70 kg	26,61 kg	14,38
Dégraissage électrolytique	68,90 kg	20,67 kg	31,31
Décapant	24,64 kg	7,39 kg	14,44
Chlorure de nickel	78,85 kg	23,65 kg	50,47
Sulfate de nickel	266,10 kg	79,83 kg	199,11
Acide borique	49,28 kg	14,78 kg	11,11
Brillants	24,64 kg	7,39 kg	49,54
Additifs	3,94 kg	1,18 kg	3,43
Oxyde de chrome	147,84 kg	44,35 kg	217,25
Trioxyde de chrome	177,40 kg	53,22 kg	391,19
TOTAUX	930,29 kg	279,07 kg	1 009,41

Tableau 8

Concernant l'eau du réseau, réduire l'apport de polluants dans l'eau de lavage de 30% permettra également de réduire le débit de renouvellement dans les mêmes proportions ; les 2 443,7 m³/an pourraient donc être réduits de 733,1 m³, ce qui entraîne une économie de 1 005,02 €/an.

On peut appliquer le même raisonnement à l'eau distillée : sur les 9,9 m³/an, l'entreprise pourrait économiser 2,97, ce qui entraîne une économie financière de 62,48 €/an.

Possible réduction des polluants : il faut également dans ce cas appliquer la réduction de 30% car toutes les matières premières perdues par entraînement se transforment en déchet via les eaux résiduaires.

Justification technique de chaque option :

Contraste de la technologie : la pose de couvre-joints n'entraîne aucune modification substantielle dans le processus de production appliqué par l'entreprise ; seule une partie de l'égouttement perdu dans l'entraînement revient dans le bain.

Effet sur la qualité du processus ou du produit : aucun.

Exigence d'espace : pratiquement nulle ; on cherche justement à occuper un espace vide afin d'éviter la chute sur le sol de gouttes renfermant des sels des produits du bain de processus.

Temps d'implantation : très réduit ; la pose de couvre-joints est effectuée directement sur les cuves concernées.

Exigences d'utilisation : il est important de donner la bonne inclinaison au couvre-joint afin de pouvoir procéder à la réincorporation du liquide dans le bain de processus.

Justification économique de chaque option (en €) :

Dépenses :

- *Équipement* : 3,01 €. c.u. x 6 cuves de processus = 18,03 €.
- *Installation* : 2 h x 15,03 €/h = 30,05 €.
- *Ingénierie*
- *Services*
- *Mise en activité*
- *Valeur équipement à la fin de la durée de vie utile*
- *Formation*
- *Matières premières*
- *Gestion des polluants*
- *Fonctionnement*
- *Entretien*
- *Autres*
- **TOTAL : 48,08 €.**

Recettes :

- *Vente équipement existant*
- *Augmentation prix de vente du produit*
- *Augmentation de la production*
- *Vente et/ou valorisation des sous-produits*
- *Économie de matières premières et auxiliaires* : 2 076,91 €/an (voir tableau joint).
- *Économies de gestion des polluants* : (733,1 m³ d'eau du réseau + 2,97 m³ d'eau distillée qui ne seraient alors plus épurées) x 0,9 €/m³ d'épuration des eaux et de transport et gestion des boues d'épuration = 663,58 €/an.
- **TOTAL : 2 740,48 €/an.**

Amortissement de l'investissement : 6,4 jours.

DESCRIPTION DES ALTERNATIVES DE MINIMISATION

Courant résiduaire analysé : pollution des eaux de lavage.

Alternative de minimisation : réduction de l'entraînement.

Options de minimisation : introduction de lavages étanches de récupération après certains bains de processus.

Autres courants concernés : génération de boues d'épuration.

Matières premières concernées : toutes celles des divers bains de processus.

Processus ou produits concernés : l'ensemble de l'installation de galvanisation.

Économies possibles concernant la consommation des matières premières et auxiliaires :

Bain de processus ou composant	Nombre de lavages étanches de récupération	Économie par réduction de perte	Total économie (€/an)
Dégraissage ultrasons	1	62,09 kg (70%)	97,02
Dégraissage électrolytique	1	48,23 kg (70%)	73,05
Nickelage	2	380,51 kg (90%)	940,95
Chlorure de nickel		70,96 kg (90%)	151,40
Sulfate de nickel		239,49 kg (90%)	597,33
Acide borique		44,35 kg (90%)	33,32
Brillants		22,17 kg (90%)	148,62
Additifs		3,54 kg (90%)	10,28
Chromage	3	318,73 kg (98%)	1 987,66
Oxyde de chrome		144,88 kg (98%)	709,66
Trioxyde de chrome		173,85 kg (98%)	1 277,66
TOTAUX	7	809,56 kg	3 098,54

Tableau 9

Concernant l'eau de lavage, nous pensons que pour chaque cuve étanche de récupération, le débit d'eau du lavage postérieur pourrait être réduit d'1/5 ; nous obtiendrions alors :

Bain de processus précédent	Débit d'eau de renouvellement (l/h)		Réduction du débit de lavage (l/h)	Économie financière (€/an)
	Actuel	avec récupérations		
Dégraissage ultrasons	560	112	448	1 080,93
Dégraissage électrolytique	280	56	224	540,47
Nickelage	2 800	112	2 688	6 485,47
Chromage	4 480	36	4 444	10 722,48
TOTAUX	8 120	316	7 804	18 829,48

Tableau 10

Possible réduction des polluants : il faut également appliquer ici la réduction d'1/5 du débit nécessaire à chaque lavage étanche de récupération qui se transforme en eau résiduaire à traiter ; on obtiendra de cette façon une réduction de 13 735 m³/an d'eaux résiduaires.

Justification technique de chaque option :

Contraste de la technologie : comme nous l'avons vu tout au long du présent document, les lavages étanches de récupération sont particulièrement indiqués dans le cas des bains de processus fonctionnant à une température supérieure à 40 °C car ils permettent de faire revenir l'eau et les sels dans le bain grâce aux pertes par évaporation expérimentées par celui-ci.

Effet sur la qualité du processus ou du produit : comme nous l'avons vu dans le document, l'introduction de ces lavages étanches de récupération peut entraîner la réintroduction dans le bain de certains polluants générés par les impuretés présentes dans les anodes, en raison de l'attaque de la surface du métal, etc. Il faudra donc appliquer systématiquement des critères de contrôle analytique afin d'éviter la pollution du bain.

Exigence d'espace : chaque lavage étanche de récupération implique l'introduction d'une cuve dans la ligne de processus existante. Ainsi donc, il faudra disposer de l'espace nécessaire pour prolonger les lignes.

Temps d'implantation : relativement bref ; les modifications pertinentes dans les lignes de processus peuvent être réalisées en 3-4 jours.

Exigences d'utilisation : s'agissant simplement d'un lavage supplémentaire, le processus n'appelle aucune mesure particulière ; néanmoins, il ne faut pas oublier que chaque jour, l'entreprise devra renvoyer vers le bain les pertes par évaporation à partir des récupérations mises en place, et ceci de la dernière récupération à la précédente, et ainsi successivement, jusqu'à atteindre la première récupération qui sert d'apport au bain.

Justification économique de chaque option (en €) :

Dépenses :

- *Équipement* : 721,21 € c.u. x 7 cuves de lavage = 5 048,5 €.
- *Installation* : 2 x(32 h x 15,03 €/h) = 961,62 €.
- *Ingénierie*
- *Services* : modification des conduites de l'eau de lavage : 1 502,53 €.
- *Mise en activité*
- *Valeur équipement à la fin de la durée de vie utile*
- *Formation*
- *Matières premières*
- *Gestion des polluants*

- *Fonctionnement* : ½ h par jour pour réincorporer les pertes par évaporation x 220 jours/an x 15,03 €/h = 1 652,78 €/an.
- *Entretien*
- *Autres*
- **TOTAL INVESTISSEMENT : 7 512,65 €.**
- **TOTAL COÛTS FONCTIONNEMENT : 1 652,78 €/an.**

Recettes :

- *Vente équipement existant*
- *Augmentation prix de vente du produit*
- *Augmentation de la production*
- *Vente et/ou valorisation des sous-produits*
- *Économie de matières premières et auxiliaires* : 21 928,02 €/an (selon les calculs des tableaux joints).
- *Économie de gestion des polluants* : 13 735 m³/an d'eau du réseau (qui ne serait alors plus épurée) x 0,9 €/m³ d'épuration des eaux et de transport et gestion des boues d'épuration = 12 382,35 €/an.
- **TOTAL : 34.310,37 €/an.**

Amortissement de l'investissement : 2,8 mois.

DESCRIPTION DES ALTERNATIVES DE MINIMISATION

Courant résiduaire analysé : pollution des eaux de lavage.

Alternative de minimisation : réduction de la consommation d'eau de lavage.

Options de minimisation : incorporation de lavages doubles en cascade à contre-courant.

Autres courants concernés : génération de boues d'épuration.

Matières premières concernées : aucune.

Processus ou produits concernés : structure des lavages de l'installation de galvanisation.

Économies possibles concernant la consommation de matières premières et auxiliaires : économie au niveau de la consommation d'eau de lavage :

Ban de processus ou composant	Lavage simple actuel avec débit (l/h)	Lavage double en cascade (l/h)	Réduction de la consommation d'eau (l/h)	Total économie (€/an)
Dégraissage ultrasons	560	18,0	542,0	1 307,74
Dégraissage électrolytique	280	12,5	267,5	645,42
Décapage	400	15,0	385,0	928,92
Nickelage	2 800	39,6	2 760,4	6 660,28
Chromage	4 480	50,0	4 430,0	10 688,70
TOTAUX	8 520	135,1	8 384,9	20 231,07

Tableau 11

Possible réduction des polluants : il faut dans ce cas également appliquer la même réduction pour chaque position de lavage car toutes les eaux de lavage se transforment en eaux résiduaires.

Justification technique de chaque option :

Contraste de la technologie : l'introduction de systèmes de lavage multiples en cascade à contre-courant est largement réalisée par de nombreuses entreprises du secteur, et elle propose tous les avantages mentionnés en ce qui concerne l'importante réduction du débit de lavage tout en conservant une même qualité de lavage.

Effet sur la qualité du processus ou du produit : aucun aspect négatif, dans tous les cas, amélioration du lavage existant.

Exigence d'espace : l'introduction de ces lavages doubles entraîne la prolongation de la ligne de processus et l'intercalation de nouvelles cuves entre celles qui existent déjà.

Temps d'implantation : réduit ; il s'agit essentiellement du temps nécessaire pour bouger les cuves afin de faire de la place pour les lavages doubles et pour mettre en place les nouvelles conduites d'eau.

Exigences d'utilisation : aucune exigence particulière ; il s'agit simplement de faire passer les pièces par les deux cuves connectées dans le bon sens : elles doivent passer en premier par l'eau la plus sale puis ressortir par l'eau la plus propre.

Justification économique de chaque option (en €) :

Dépenses :

- *Équipement* : 1 502,3 €. c.u. x 5 cuves de processus = 7 512,65 €.
- *Installation* : 20 h x 15,03 €/h = 30,05€.
- *Ingénierie*
- *Services*
- *Mise en activité*
- *Valeur équipement à la fin de la durée de vie utile*
- *Formation*

- Matières premières
- Gestion des polluants
- Fonctionnement
- Entretien
- Autres
- **TOTAL : 7 813,16 €.**

Recettes :

- Vente Équipement existant
- Augmentation prix de vente du produit
- Augmentation de la production
- Vente et/ou valorisation des sous-produits
- Économie de matières premières et auxiliaires : 20 231,07 €/an (selon les calculs du tableau joint).
- Économie de gestion des polluants : $14\,757\text{ m}^3 \times 0,9\text{ €/m}^3$ d'épuration des eaux et de transport et gestion des boues d'épuration = 13 303,70 €/an.
- **TOTAL : 33 534,77 €/an.**

Amortissement de l'investissement : 2,8 mois.

DESCRIPTION DES ALTERNATIVES DE MINIMISATION

Courant résiduaire analysé : pollution des eaux de lavage.

Alternative de minimisation : réduction de la consommation d'eau de lavage.

Options de minimisation : incorporation de débitmètres pour chaque position de lavage.

Autres courants concernés : génération de boues d'épuration.

Matières premières concernées: aucune.

Processus ou produits concernés : aucun.

Économies possibles concernant la consommation de matières premières et auxiliaires : économies au niveau de la consommation d'eau de lavage :

Bain de processus ou composant	Lavage simple débit (l/h) habituel	Lavage simple débit (l/h) avec débitmètres	Réduction de la consommation d'eau (l/h)	Total économie (€/an)
Dégraissage ultrasons	1 000	560	440	1 061,63
Dégraissage électrolytique	500	280	220	530,81
Décapage	700	400	300	723,83
Nickelage	5 000	2 800	2 200	5 308,16
Chromage	8 000	4 480	3 520	8 493,05
TOTAUX	15 200	8 520	6 680	16 117,49

Tableau 12

Possible réduction des polluants : Il faut également dans ce cas appliquer la même réduction pour chaque position de lavage car toutes les eaux de lavage se transforment en eaux résiduaires.

Justification technique de chaque option :

Contraste de la technologie : l'introduction de débitmètres permet de connaître et de réguler les nécessités réelles, les débits de lavage, et elle ne présente aucune difficulté technique au niveau du processus ; cette technologie propose au contraire un maximum d'avantages concernant le contrôle et la régulation du débit de lavage.

Effet sur la qualité du processus ou du produit : aucun effet négatif du moment que la raison de dilution de chaque position de lavage est respectée.

Exigence d'espace : l'introduction de débitmètres n'entraîne aucune exigence d'espace en ce qui concerne la ligne galvanique.

Temps d'implantation : réduit, environ cinq heures pour l'ensemble des cuves.

Exigences d'utilisation : aucune exigence particulière ; il faut seulement réguler le débit de lavage à l'aide de la valve intégrée dans l'élément lui-même.

Justification économique de chaque option (en €.) :

Dépenses :

- *Équipement* : 270,46 € c.u. x 5 cuves de lavage = 1 352,28 €.
- *Installation* : 5 h x 15,03 €/h = 75,13 €.
- *Ingénierie*
- *Services*
- *Mise en activité*
- *Valeur équipement à la fin de la durée de vie utile*
- *Formation*
- *Matières premières*
- *Gestion des polluants*
- *Fonctionnement*
- *Entretien*
- *Autres*
- ***TOTAL : 1 427,40 €.***

Recettes :

- *Vente équipement existant* :
- *Augmentation prix de vente du produit*
- *Augmentation de la production*
- *Vente et/ou valorisation des sous-produits*
- *Économie de matières premières et auxiliaires* : 16 117,49 €/an (selon le tableau)

- *Économie de gestion des polluants* : $11\,757\text{ m}^3 \times 0,9\text{ €/m}^3$ d'épuration des eaux et de transport et gestion des boues d'épuration = 10 599,15 €/an.
- **TOTAL : 2 676,15 €/an.**

Amortissement de l'investissement : 19,5 jours.

DESCRIPTION DES ALTERNATIVES DE MINIMISATION

Courant résiduaire analysé : solutions alcalines avec huiles résiduelles.

Alternative de minimisation : réutilisation de la solution pour l'introduction d'un pré-dégraissage.

Options de minimisation : implantation de deux cuves de pré-dégraissage, une pour chaque bain.

Autres courants concernés : eaux résiduaires à traiter.

Matières premières concernées : dégraissage par ultrasons et dégraissage électrolytique.

Processus ou produits concernés : préparation de la surface métallique à recouvrir via électrolyte.

Économies possibles concernant la consommation des matières premières et auxiliaires : réduction de 25% de la consommation des sels et de l'eau de préparation des dégraissages.

Possible réduction des polluants : réduction de 25% du volume de solution aqueuse alcaline avec huiles.

Justification technique de chaque option :

Contraste de la technologie : l'application de cette méthode est modérément présente dans le secteur. Il s'agit en fait d'effectuer le dégraissage dans deux cuves – la solution de la première est plus diluée – opération actuellement mise en place avec une seule cuve.

Effet sur la qualité du processus ou du produit : l'introduction d'un premier bain de dégraissage permet de réaliser cette opération de façon plus adéquate et on obtient un meilleur niveau d'élimination des huiles et des graisses. On peut donc dire que cette méthode améliore la qualité du processus.

Exigence d'espace : évidemment, chaque cuve de pré-dégraissage implique la prolongation de la ligne galvanique dans la mesure où l'on installe de nouvelles cuves de processus.

Temps d'implantation : environ une journée de montage.

Exigences d'utilisation : aucune exigence particulière, il s'agit simplement de réaliser les opérations habituelles correspondant au type de dégraissage utilisé.

Justification économique de chaque option (en €.) :

Dépenses :

- *Équipement* : 2 cuves x 901,52 € c.u. = 1 803,04 €.
- *Installation* : 1 ouvrier x 1 journée x 8 h x 15,03 €/h = 120,20 €.
- *Ingénierie*
- *Services*
- *Mise en activité*
- *Valeur équipement à la fin de la durée de vie utile*
- *Formation* :
- *Matières premières*
- *Gestion des polluants*
- *Fonctionnement*
- *Entretien*
- *Autres*
- **TOTAL INVESTISSEMENT : 1 923,24 €.**

Recettes :

- *Vente équipement existant*
- *Augmentation prix de vente du produit*
- *Augmentation de la production*
- *Vente et/ou valorisation des sous-produits*
- *Économie de matières premières et auxiliaires* : 25% de 450,76 €/an en ultrasons + 25% de 681,55 €/an en électrolyte = 1112,69 €/an + 170,39 €/an = 283,08 €/an ; 25% de 2 100 l d'eau pour les ultrasons à 1,37 €/m³ + 25% de 8 400 l d'électrolyte à 1,37 €/m³ = 0,72 €/an + 2,88 €/an = 3,60 €/an 283,08 €/an + 3,60 €/an = 286,68 €/an.
- *Économie de gestion des polluants* : 10 500 l de solution alcaline résiduelle/an x 25% = 2 625 l ; 2 625 l x 0,27 €/l = 709,95 €/an.
- **TOTAL : 996,62 €/an.**

Amortissement de l'investissement : approximativement 1,9 ans.

DESCRIPTION DES ALTERNATIVES DE MINIMISATION

Courant résiduaire analysé : solution acide renfermant des métaux dissous.

Alternative de minimisation : réutilisation de la solution via l'introduction d'un pré-décapage

Options de minimisation : implantation d'une cuve de pré-décapage

Autres courants concernés : eaux résiduaires à traiter.

Matières premières concernées : décapage acide.

Processus ou produits concernés : préparation de la surface métallique à recouvrir via électrolyte.

Économies possibles concernant la consommation des matières premières et auxiliaires : réduction de 25% de la consommation des sels et de l'eau de préparation du décapage.

Possible réduction des polluants : réduction de 25% du volume de solution acide avec métaux.

Justification technique de chaque option :

Contraste de la technologie : l'application de cette méthode est modérément présente dans le secteur. Il s'agit en fait d'effectuer le décapage dans deux cuves – la solution de la première est plus diluée – opération actuellement mise en place avec une seule cuve.

Effet sur la qualité du processus ou du produit : l'introduction d'un premier bain de décapage permet de réaliser cette opération de façon plus adéquate et on obtient un meilleur niveau d'élimination des oxydes métalliques. On peut donc dire que cette méthode améliore la qualité du processus.

Exigence d'espace : évidemment, chaque cuve de pré-décapage implique la prolongation de la ligne galvanique dans la mesure où l'on installe de nouvelles cuves de processus.

Temps d'implantation : environ une demi-journée de montage.

Exigences d'utilisation : aucune exigence particulière, il s'agit simplement de réaliser les opérations habituelles correspondant au type de décapage utilisé.

Justification économique de chaque option (en €) :

Dépenses :

- *Équipement* : 1 cuve x 901,52 € = 901,52 €.
- *Installation* : 1 ouvrier x ½ journée x 8 h x 15,03 €/h = 60,01 €.
- *Ingénierie*
- *Services*
- *Mise en activité*
- *Valeur équipement à la fin de la durée de vie utile*
- *Formation*
- *Matières premières*
- *Gestion des polluants*
- *Fonctionnement*

- *Entretien*
- *Autres*
- **TOTAL INVESTISSEMENT : 961,62 €.**

Recettes :

- *Vente équipement existant*
- *Augmentation prix de vente du produit*
- *Augmentation de la production*
- *Vente et/ou valorisation des sous-produits*
- *Économie de matières premières et auxiliaires* : 25% de 315 l d'acide chlorhydrique = 78,75 l ; $78,75 \text{ l} \times 0,09 \text{ €/l} = 7,10 \text{ €/an}$; 25% de 3 150 l d'eau à $1,37 \text{ €/m}^3 = 1,08 \text{ €/an}$; $7,10 \text{ €/an} + 1,08 \text{ €/an} = 8,18 \text{ €/an}$.
- *Économie de gestion des polluants* : 25% de la solution se transforme en déchet aqueux acide à teneur en métaux = $3 \text{ 150 l/an} \times 25\% = 787,5 \text{ l/an}$ de déchet ; $787,5 \text{ l} \times 0,15 \text{ €/l} = 118,32 \text{ €/an}$.
- **TOTAL : 126,50 €/an.**

Amortissement de l'investissement : approximativement 7,6 ans.

DESCRIPTION DES ALTERNATIVES DE MINIMISATION

Courant résiduaire analysé : solution acide avec métaux dissous.

Alternative de minimisation : substitution de la solution de décapage à l'acide chlorhydrique

Options de minimisation : utilisation d'acide sulfurique pour décaper les pièces en fer

Autres courants concernés : eaux résiduaires à traiter.

Matières premières concernées : décapage acide.

Processus ou produits concernés : préparation de la surface métallique à recouvrir via électrolyte.

Économies possibles concernant la consommation des matières premières et auxiliaires : réduction de 15% de la consommation des sels et de l'eau de préparation du décapage.

Possible réduction des polluants : réduction de 15% du volume de solution acide avec métaux.

Justification technique de chaque option :

Contraste de la technologie : comme nous l'avons vu dans le document, la substitution de l'acide chlorhydrique par de l'acide sulfurique, en plus d'un effet décapant très similaire, présente l'avantage de permettre le contrôle du degré d'attaque de l'acide sur le fer via la température du bain, ce qui prolonge la durée de vie utile de ce dernier.

Effet sur la qualité du processus ou du produit : le remplacement d'un acide par un autre permet de réaliser cette opération de façon plus adéquate, grâce au contrôle du degré d'attaque sur le fer. On peut donc dire que cette méthode améliore la qualité du processus.

Exigence d'espace : la même cuve de décapage sert aux deux acides.

Temps d'implantation : environ une ½ journée pour remplacer un bain par un autre.

Parallèlement au changement proprement dit, quelques jours sont nécessaires pour établir le *modus operandi* du nouveau bain.

Exigences d'utilisation : pour que le système soit efficace, il faut installer un thermomètre permettant le contrôle de la température de fonctionnement de l'acide. Une fois effectués les tests de détermination du degré précis de l'attaque, on devra fixer l'intervalle de la température de fonctionnement du bain et, selon les cas, chauffer ou refroidir celui-ci.

Justification économique de chaque option (en €.) :

Dépenses :

- *Équipement*
- *Installation* : 1 ouvrier x une ½ journée x 8 h x 15,03 €/h = 60,01 €.
- *Ingénierie*
- *Services*
- *Mise en activité* : 1 ouvrier x 1 journée x 8 h x 15,03 €/h = 120,20 €.
- *Valeur équipement à la fin de la durée de vie utile*
- *Formation*
- *Matières premières*
- *Gestion des polluants*
- *Fonctionnement*
- *Entretien*
- *Autres*
- **TOTAL INVESTISSEMENT : 180,3 €.**

Recettes :

- *Vente équipement existant*
- *Augmentation prix de vente du produit*
- *Augmentation de la production*
- *Vente et/ou valorisation des sous-produits*
- *Économie e matières premières et auxiliaires* : 15% de 315 l d'acide chlorhydrique = 47,25 l ; 47,25 l x 0,09 €/l = 4,26 €/an ; 15% de 3 150 l d'eau à 1,37 €/m³ = 0,65 €/an ; 4,26 €/an + 0,65 €/an = 4,91 €/an.

- *Économie de gestion des polluants* : 15% de la solution se transforme en déchet aqueux acide avec métaux = $3\,150 \text{ l/an} \times 15\% = 472,5 \text{ l/an}$ de déchets ; $472,5 \text{ l} \times 0,15 \text{ €/l} = 70,99 \text{ €/an}$.
- **TOTAL : 75,90 €/an.**

Amortissement de l'investissement : approximativement 2,4 ans.

DESCRIPTION DES ALTERNATIVES DE MINIMISATION

Courant résiduaire analysé : eaux résiduaires générées dans le processus de lavage.

Alternative de minimisation : réutilisation d'une partie de l'eau de lavage.

Options de minimisation : utiliser l'eau de lavage du décapage comme eau de lavage du dégraissage électrolytique (technique du *skip*).

Autres courants concernés : eaux résiduaires à traiter.

Matières premières concernées : aucune.

Processus ou produits concernés : aucun.

Économies possibles concernant la consommation des matières premières et auxiliaires : économie de la consommation d'eau dans la position du dégraissage électrolytique.

Possible réduction des polluants : réduction du traitement de l'eau du décapage

Justification technique de chaque option :

Contraste de la technologie : l'application de cette méthode est modérément présente dans le secteur. Comme nous l'avons déjà expliqué, elle ne présente aucun inconvénient étant donné que les pièces, une fois lavées avec cette eau réutilisée, passent à la cuve acide de décapage.

Effet sur la qualité du processus ou du produit : aucun effet significatif.

Exigence d'espace : aucune.

Temps d'implantation : environ une $\frac{1}{2}$ journée pour le montage des conduites.

Exigences d'utilisation : une fois sa fonctionnalité clairement établie, son utilisation ne requiert aucune condition particulière ; il s'agit simplement de réaliser les opérations habituelles correspondant au lavage.

Justification économique de chaque option (en €) :

Dépenses :

- *Équipement*
- *Installation* : 1 ouvrier x une $\frac{1}{2}$ journée x 8 h x 15,003 €/h = 60,01 €.
- *Ingénierie*
- *Services* : 120,02 € pour les conduites en PVC

- Mise en activité
- Valeur équipement à la fin de la durée de vie utile
- Formation
- Matières premières
- Gestion des polluants
- Fonctionnement
- Entretien
- Autres
- **TOTAL : 180,03 €.**

Recettes :

- Vente équipement existant
- Augmentation prix de vente du produit
- Augmentation de la production
- Vente et/ou valorisation des sous-produits
- *Économie de matières premières et auxiliaires* : 280 l/h d'eau de lavage du dégraissage électrolytique x 1 760 h/an = 493 m³/an ; 493 m³ a 1,33 €/m³ = 675,86 €/an.
- *Économie de gestion des polluants* : 493 m³ x 0,90 €/m³ d'épuration des eaux et de transport et gestion des boues d'épuration = 444,45 €/m³.
- **TOTAL : 1 120,30 €/an.**

Amortissement de l'investissement : 2 mois.

ENTREPRISE B :

Typologie : entreprise moyenne, spécialisée dans l'anodisation dure de l'aluminium via des lignes automatiques en pompe.

Description générale :

Nombre d'ouvriers : 49 Heures de travail/jour : 24 Équipes : 3

Activité : rectification et anodisation dure de l'aluminium

Type d'installation : ligne automatique en pompe

Production : 25 millions de pièces d'aluminium pour le secteur de l'automobile

Principaux polluants produits :

Eaux résiduaires :

- Caractérisation : effluents dilués en continu et concentrés par charges avec
 - pH hautement alcalin ou acide en fonction du concentré
 - présence d'huiles, de détergents, etc.
 - présence de métaux lourds, par exemple l'aluminium
 - présence de chrome hexavalent
 - d'autres composés présents en qualité de sels solubles : sulfates, chlorures et nitrates
- Régime de rejet : environ 10,5 m³/jour, par charges

Déchets industriels :

- Caractérisation :
 - Dangereux :
 - ⇒ eaux résiduaires et solutions concentrées de bains épuisés
 - ⇒ boues d'épuration des effluents
 - ⇒ solutions acides et alcalines renfermant des huiles
 - Non-dangereux :
 - ⇒ déchets généraux non-recueillis de façon sélective

Gestion actuelle des polluants produits :

Eaux résiduaires : traitement physico-chimique consistant à réduire le chrome hexavalent en chrome trivalent via du bisulfite sodique, neutralisation à l'hydroxyde calcique, floculation via polyélectrolyte anionique, sédimentation et concentration des boues et leur séchage via filtre-presses.

Déchets industriels : sauf en ce qui concerne les eaux résiduaires et les solutions concentrées des bains épuisés qui sont traitées dans l'entreprise elle-même, les déchets générés par l'entreprise sont gérés à l'extérieur par des gestionnaires agréés.

Coûts de la gestion actuelle des polluants :

Par pertes de matières premières et d'eau : 1 502,53 €/an

Eaux résiduaires : 11 118,72€/an

Déchets industriels : 32 454,65 €/an

DESCRIPTION DES ALTERNATIVES DE MINIMISATION

Courant résiduaire analysé : pollution des eaux de lavage.

Alternative de minimisation : réduction de la consommation d'eau de lavage.

Options de minimisation : incorporation d'électrovalves temporisées pour chaque position de lavage.

Autres courants concernés : génération d'eaux résiduaires et de boues d'épuration.

Matières premières concernées : aucune.

Processus ou produits concernés : aucun.

Économies possibles concernant la consommation des matières premières et auxiliaires : économie au niveau de la consommation d'eau de lavage :

Bain de processus ou composant	Lavage simple débit (l/h) habituel	Lavage simple débit (l/h) avec électrovalves	Réduction de la consommation d'eau (l/h) ¹¹	Total économie (€/an)
Dégraissage	485	291	194	779,05
Décapage	485	291	194	779,05
Anodisation	1 940	1 164	776	3 116,20
Scellage	970	582	388	1 504,01
TOTAUX	3 880	2 328	1 552	6 232,40

Tableau 13

Possible réduction des polluants : : il faut dans ce cas également appliquer la même réduction pour chaque position de lavage car toutes les eaux de lavage se transforment en eaux résiduaires :

$$1\,552 \text{ l/h} \times 5\,760 \text{ h/an} \times 0,01 \text{ €/l} = 123\,573,47 \text{ €/an}$$

Justification technique de chaque option :

Contraste de la technologie : l'introduction électrovalves connectées à des temporisateurs permet d'ajuster les nécessité réelles de la consommation d'eau de lavage, elle ne présente

¹¹ Réduction du débit d'eau de 40% pour chaque position de lavage.

aucune difficulté technique dans le processus et propose au contraire tous les avantages relatifs à la réduction du débit de lavage.

Effet sur la qualité du processus ou du produit : aucun effet négatif du moment que la raison de dilution de chaque position de lavage est respectée.

Exigence d'espace : l'introduction électrovalves temporisées n'entraîne aucune exigence d'espace en ce qui concerne la ligne galvanique.

Temps d'implantation : réduit, environ dix heures pour l'ensemble des cuves.

Exigences d'utilisation : aucune exigence particulière ; il faut seulement réguler le débit de lavage à l'aide de la valve intégrée dans l'élément lui-même.

Justification économique de chaque option (en €.) :

Dépenses :

- *Équipement* : 300,51 € c.u. x 4 cuves de lavage = 1 202,02 €.
- *Installation* : 10 h x 15,03 €/h = 150,25 €.
- *Ingénierie*
- *Services*
- *Mise en activité*
- *Valeur équipement à la fin de la durée de vie utile*
- *Formation*
- *Matières premières*
- *Gestion des polluants*
- *Fonctionnement*
- *Entretien*
- **TOTAL : 1 352,28 €.**

Recettes :

- *Vente équipement existant*
- *Augmentation prix de vente du produit*
- *Augmentation de la production*
- *Vente et/ou valorisation des sous-produits*
- *Économie de matières premières et auxiliaires* : 6 232,40 €/an.
- *Économie de gestion des polluants* : 123 573,47 €/an.
- **TOTAL : 129.805,87 €/an.**

Amortissement de l'investissement : 4 jours.

DESCRIPTION DES ALTERNATIVES DE MINIMISATION

Courant résiduaire analysé : solutions alcalines renfermant des huiles résiduelles.

Alternative de minimisation : réutilisation de la solution via son ultrafiltration.

Options de minimisation : implantation de deux ultrafiltrations, une pour chaque bain de dégraissage.

Autres courants concernés : eaux résiduaires des lavages des dégraissages à épurer et boues de l'épurateur.

Matières premières concernées : dégraissage par ultrasons et dégraissage chimique.

Processus ou produits concernés : préparation de la surface métallique à anodiser via électrolyte.

Économies possibles concernant la consommation des matières premières et auxiliaires : réduction de 95% de la consommation des sels et de l'eau de préparation des dégraissages.

Possible réduction des polluants : réduction de 95% du volume de la solution aqueuse alcaline renfermant des huiles.

Justification technique de chaque option :

Contraste de la technologie : la technologie d'ultrafiltration avec membranes a été testée et implantée avec succès dans des entreprises du secteur. Cependant, il est nécessaire de mettre en place des tests préalables avec des échantillons concrets du produit pollué afin d'établir la viabilité technique du système et de déterminer, dans tous les cas, le type de membrane le mieux adapté à chaque application concrète.

Effet sur la qualité du processus ou du produit : en agissant en continu sur le bain de dégraissage, l'ultrafiltration permet d'entretenir cette solution de façon constante et dans des conditions de travail optimales. On peut donc dire que cette technologie améliore la qualité du processus.

Exigence d'espace : les deux ultrafiltrations adaptées aux nécessités de l'entreprise peuvent exiger 6 m² approximativement.

Temps d'implantation : une fois la commande effectuée, il est possible que l'équipement n'arrive pas avant un minimum de deux mois, les membranes devant être importées ; environ 2-4 jours pour le montage et 5 jours supplémentaires pour les tests et la mise en marche ; le temps d'implantation peut donc atteindre 2-3 mois.

Exigences d'utilisation : la technologie des membranes exige des contrôles et des entretiens ayant pour objectif de garder celles-ci en bon état ; vous devrez donc observer à la lettre les indications du fabricant.

Justification économique de chaque option (en €.) :

Dépenses :

- *Équipement* : 2 machines x 24 040,48 € c.u. = 48 080,97 €.
- *Installation* : (comprise dans le prix des machines)
- *Ingénierie*
- *Services*
- *Mise en activité* : (comprise dans le prix des machines).
- *Valeur équipement à la fin de la durée de vie utile* :¹² 9 616,19 €.
- *Formation*
- *Matières premières* : produits de nettoyage des membranes = 240,40 €/an.
- *Gestion des polluants* : 5% de la solution se transforme en déchet huileux = 28 350 l d'ultrasons/an + 28 350 l de substances chimiques/an = 56 700 l/an de solution dégraissante ; 56 700 l x 5% = 2 835 l/an de déchets huileux ; 2 835 l x 0,10 €/l = 283,35 €/an.
- *Fonctionnement* : 901,52 €/an pour la main-d'œuvre et l'électricité.
- *Entretien* : 601,01 €/an pour la main-d'œuvre.
- *Autres*
- **TOTAL INVESTISSEMENT : 38 464,77 €.**
- **TOTAL COÛTS FONCTIONNEMENT : 2 026,29 €/an**

Recettes :

- *Vente équipement existant*
- *Augmentation prix de vente du produit*
- *Augmentation de la production*
- *Vente et/ou valorisation des sous-produits*
- *Économie de matières premières et auxiliaires*
 - 95% de dégraissage : 7 212,15 €/an x 95% = 6 851,54 €/an
 - 95% de l'eau de préparation du dégraissage : (28,35 m³ (cuve ultrasons) + 28,35 m³ (cuve chimique)) – 1,5 m³ (correspond au volume des sels achetés) = 55,2 m³ ; 55,2 m³ x 95% = 52,44 m³ a 0,7 €/m³ = 36,56 €/an.
- *Économie de gestion des polluants* : (28,35 m³ (cuve ultrasons) + 28,35 m³ (cuve chimique)) x 95% d'économies = 53,86 m³ de solution alcaline résiduaire/an ; 53 860 kg x 0,10 €/kg = 5 383,22 €/an.
- **TOTAL : 12 271,31 €/an.**

Amortissement de l'investissement : approximativement 3,7 ans.

¹² En comptant un amortissement de cinq ans.

DESCRIPTION DES ALTERNATIVES DE MINIMISATION

Courant résiduaire analysé : solutions alcalines renfermant des huiles résiduelles.

Alternative de minimisation : réutilisation de la solution via l'introduction de cuves étanches de récupération.

Options de minimisation : implantation de deux cuves, une pour chaque bain de dégraissage

Autres courants concernés : eaux résiduaires à traiter.

Matières premières concernées : dégraissage par ultrasons et dégraissage chimique.

Processus ou produits concernés : préparation de la surface métallique.

Économies possibles concernant la consommation des matières premières et auxiliaires : réduction de 70% de l'entraînement des sels et de l'eau issus des dégraissages.

Bain de processus	Perte par entraînement	Économie par récupération (70%)	Total (€/an)
Dégraissages	670,46 l	469,32 l	1,41
Eau des baigns	21,67 m ³	15,17 m ³	10,58
Eau rinçages postérieurs ¹³	485 l/h	388 l/h	1 558,10
TOTAL		1.570,09 €/an	

Tableau 14

Possible réduction des polluants : réduction du débit d'eau à épurer :

388 l/h d'eau de lavage économisés x 5 760 h/an x 0,1 €/l d'eau épurée 30 893,37 €/an.

(469,32 l de dégraissage/an + (15,17 m³ d'eau du bain x 1000 l/m³)) x 0,1 €/l = 218,18 €/an.

TOTAL : 31 109,55 €/an.

Justification technique de chaque option :

Contraste de la technologie : Cette question ayant déjà été examinée en plusieurs occasions tout au long de ce document, nous nous en remettons aux chapitres concernés.

Effet sur la qualité du processus ou du produit : disposer des moyens nécessaires pour filtrer les huiles du bain ; si ce n'est pas le cas, cette alternative n'est pas recommandée.

Exigence d'espace : s'agissant de lignes automatiques, chaque cuve de récupération implique la transformation de la fonction de certaines cuves existantes ; l'espace nécessaire ne change donc pas.

Temps d'implantation : environ une journée pour le montage.

Exigences d'utilisation : aucune condition particulière n'est nécessaire, il s'agit simplement de réaliser les opérations habituelles correspondant au type de dégraissage utilisé. En revanche, la

¹³ Dans ce cas, l'économie d'eau résulte de la réduction d'1/5 du débit de lavage sans récupération.

fréquence des contrôles analytiques sur le bain devra augmenter afin d'éviter l'éventuelle pollution huileuse.

Justification économique de chaque option (en €) :

Dépenses :

- *Équipement*
- *Installation* : 1 ouvrier x 1 journée x 8 h x 15,03 €/h = 120,20 €.
- *Ingénierie*
- *Services*
- *Mise en activité*
- *Valeur équipement à la fin de la durée de vie utile*
- *Formation*
- *Matières premières*
- *Gestion des polluants*
- *Fonctionnement* : 1/2 h/jour pour réintroduire la récupération à chaque bain x 220 jours/an x 15,03 €/h = 1 652,78 €/an.
- *Entretien*
- *Autres*
- **TOTAL INVESTISSEMENT : 120,20 €.**
- **TOTAL COÛTS DE FONCTIONNEMENT : 1 652,78 €/an.**

Recettes :

- *Vente équipement existant*
- *Augmentation prix de vente du produit*
- *Augmentation de la production*
- *Vente et/ou valorisation des sous-produits*
- *Économie en matières premières et auxiliaires* : 1 570,09 €/an ;
- *Économie de gestion des polluants* 31 109,55 €/an.
- **TOTAL : 32 679,64 €/an.**

Amortissement de l'investissement : deux jours.

DESCRIPTION DES ALTERNATIVES DE MINIMISATION

Courant résiduaire analysé : solutions acides avec métaux du processus d'anodisation.

Alternative de minimisation : réutilisation totale du bain d'anodisation.

Options de minimisation : implantation d'un équipement de retard ionique.

Autres courants concernés : eaux résiduaires à traiter

Matières premières concernées : acide sulfurique d'anodisation.

Processus ou produits concernés : aucun.

Économies possibles concernant la consommation des matières premières y auxiliaires : économie de 90% approximativement sur la consommation d'acide sulfurique et d'eau dans le bain d'anodisation.

Possible réduction des polluants : réduction de 90% du débit d'eau acide avec métaux à épurer.

Justification technique de chaque option :

Effet sur la qualité du processus ou du produit : Le faible niveau d'aluminium dissous améliore le comportement du bain.

Exigence d'espace : environ 1 m².

Temps d'implantation : environ deux jours pour le montage des conduites.

Exigences d'utilisation : une fois sa fonctionnalité clairement établie, son utilisation ne requiert aucune condition particulière si ce n'est un nettoyage périodique de l'équipement.

Justification économique de chaque option (en €) :

Dépenses :

- *Équipement :* Une machine pour les trois bains d'anodisation : 36 060,73 €.
- *Installation :* comprise dans le prix de l'équipement.
- *Ingénierie*
- *Services :* 300,51 € pour les conduites en PVC.
- *Mise en activité*
- *Valeur équipement à la fin de la durée de vie utile :*¹⁴ 721,21 €.
- *Formation*
- *Matières premières*
- *Gestion des polluants*
- *Fonctionnement :* 901,52 €/an (en comptant l'eau et l'énergie du processus de régénération).

¹⁴ En comptant un amortissement de cinq ans.

- *Entretien* : 300,51 €/an.
- *Autres*
- **TOTAL : 29 149,09 €.**
- **TOTAL COÛTS DE FONCTIONNEMENT : 1 202,02 €/an.**

Recettes :

- *Vente «équipement existant*
- *Augmentation prix de vente du produit*
- *Augmentation de la production*
- *Vente et/ou valorisation des sous-produits*
- *Économie en matières premières et auxiliaires* : 90% d'économies sur l'achat d'acide sulfurique : 22 020 l/an x 90% = 19 818 l/an ; 19 818 l/an x 0,22 €/l = 42 872,89 €/an ;
42,84 m³/an d'eau x 90% = 38,55 m³/an ; 38,55 m³/an x 0,70 €/m³ = 26,88 €/an ;
- *Économie de gestion des polluants* : 22 020 l d'acide + 42 840 l d'eau = 64 860 l/an ; 64 860 l/an x 90% d'économies = 58 374 l/an ; 58 374 l/an x 0,01 €/l = 806,92 €/an.
- **TOTAL : 5 121,70 €/an.**

Amortissement de l'investissement : approximativement 7,4 ans.

DESCRIPTION DES ALTERNATIVES DE MINIMISATION

Courant résiduaire analysé : eaux résiduaires du lavage.

Alternative de minimisation : réutilisation de l'eau de lavage des bains d'anodisation et de scellage.

Options de minimisation : implantation d'un équipement de résines d'échange ionique.

Autres courants concernés : boues résiduaires d'épuration des eaux..

Matières premières concernées : aucune.

Processus ou produits concernés : étapes de lavage des processus d'anodisation et de scellage.

Économies possibles concernant la consommation des matières premières et auxiliaires : réduction de 80% de la consommation d'eau pour les positions de lavage suivantes :

Bain de processus ou composant	Lavage simple minime avec débit (l/h)	Réduction 80% consommation d'eau (l/h)	Total économie (€/an)
Anodisations	1 940	1 552	6 232,40
Scellages	970	776	3 116,20
TOTAUX	2 910	2 328	9 348,60

Tableau 15

Possible réduction des polluants : réduction de 80% du débit d'eau à épurer pour ces positions de lavage.

Justification technique de chaque option :

Contraste de la technologie : la technologie du recyclage de l'eau via résines d'échange ionique a été implantée avec succès dans de nombreuses entreprises du secteur.

Effet sur la qualité du processus ou du produit : l'eau de lavage obtenue avec les résines présente une conductivité très faible, ce qui favorise le processus de lavage des pièces. On peut donc dire que cette technologie améliore la qualité du processus.

Exigence d'espace : un équipement de recyclage des eaux adapté aux nécessités de l'entreprise peut demander approximativement 2-3 m².

Temps d'implantation : une fois l'équipement construit (ce qui peut prendre environ un mois), environ 1-2 jours pour le montage et 2-3 jours supplémentaires pour les tests et la mise en marche.

Exigences d'utilisation : la technologie des résines est relativement solide et elle ne présente pas de grandes exigences d'entretien ou de contrôle ; en revanche, il faut éviter l'entrée de substances organiques dans la résine (par exemple les tensioactifs, les huiles, etc.) ou de bains concentrés, particulièrement le bain d'anodisation, ceci entraînant la destruction immédiate de la résine.

Justification économique de chaque option (en €) :

Dépenses :

- *Équipement* : équipement autorégénérable de 500 l de résine, avec charbon actif, résine cationique moyennement forte et résine anionique moyennement faible : 33 055,67 €.
- *Installation* : comprise dans le prix de l'équipement.
- *Ingénierie*
- *Services* : conduites d'eaux jusqu'aux cuves de lavage à recirculer : 450,76 €.
- *Mise en activité* : comprise dans le prix de l'équipement

- Valeur équipement à la fin de la durée de vie utile :¹⁵ 6 611,13 €.
- Formation
- Matières premières : produits de régénération des résines = 120,20 €/an.
- Gestion des polluants : 10 l de résine par litre sont générés sous forme d'eau résiduaire à traiter par régénération : 10 l x 500 l de résine x 2 bouteilles = 10 000 l ; 10 000 l x 0,01 €/l d'épuration des eaux et de transport et gestion des boues d'épuration = 138,23 €/an.
- Fonctionnement : 300,51 €/an pour la main-d'œuvre et l'électricité.
- Entretien : 240,40 €/an pour la main- d'œuvre.
- Autres
- **TOTAL INVESTISSEMENT : 26 895,29 €.**
- **TOTAL COÛTS DE FONCTIONNEMENT : 799,35 €/an**

Recettes :

- Vente équipement existant
- Augmentation prix de vente du produit
- Augmentation de la production
- Vente et/ou valorisation des sous-produits
- Économie en matières premières et auxiliaires : l'équipement de recyclage par échange ionique permet de réduire de 80% la consommation d'eau pour chaque position de lavage concernée : 9 348,60 €/an, selon le tableau joint.
- Économie de gestion des polluants : 2 328 l/h x 5 760 h/an = 13 409 280 l/an ; 13 409 280 l/an x 0,01 €/l x d'épuration des eaux et de transport et gestion des boues d'épuration = 185 360,21 €/an.
- **TOTAL : 194 708,81 €/an.**

Amortissement de l'investissement : 52 jours.

¹⁵ En comptant un amortissement de cinq ans.

7. CONCLUSIONS

À une époque où l'objectif visant à protéger l'environnement dans le cadre des activités quotidiennes humaines est devenu une nécessité vitale pour la société, de grandes quantités de courants résiduaux sont générées par les installations industrielles, qui ne sont pas toujours gérées de la façon qui conviendrait le mieux à l'atteinte d'un bon niveau de qualité de travail et d'environnement.

L'entrepreneur qui décide de démarrer un projet industriel doit tenir compte non seulement des aspects liés à la production mais aussi, chaque fois plus, des facteurs globalisateurs d'entrées et de sorties de matières et d'énergie. Son activité ne se retrouvera pas isolée du reste ; bien au contraire, elle fera partie d'un " écosystème " dont la durée de vie dépendra des interventions individualisées de chaque membre qui en font partie.

Le secteur d'industries de traitements de surface consomme une grande diversité de matières premières, ainsi que de grandes quantités d'eau par rapport à la taille des installations industrielles dont il dispose. En conséquence, les éléments résiduaux qu'il génère sont des quantités importantes de composés qui, mal gérés, mettent en danger le fonctionnement du système en soi.

Il y a quelques années, l'industriel de la galvanotechnie considérait les consommations importantes de matières et d'eau comme quelque chose d'indispensable pour la bonne finition de sa production ; en fait, il ne s'agissait pas là de coûts trop élevés pour son économie productive et il s'assurait ainsi un bon produit final. Avec les systèmes d'épuration en bout de ligne, on pensait disposer de la meilleure solution pour l'environnement.

Ces éléments conditionnants ont amené des unités de processus galvanique mal conçues et peu adaptées aux nécessités, présentes ou futures, des entreprises. En outre, la vision de la gestion correcte de l'environnement était partielle (ce qui peut encore être le cas aujourd'hui) : elle se limitait à introduire l'installation correspondant au traitement physico-chimique des eaux résiduaux comme prolongation de la ligne de production et à gérer, en accord avec la législation sur l'environnement, les déchets et les émissions atmosphériques sans envisager la possibilité de diminuer les quantités de ces courants résiduaux qui, d'un point de vue objectif, ne sont que des matières premières et des ressources énergétiques qui ne se sont pas transformées en produit fini, mais qui doivent être traitées comme des courants résiduaux.

Nous avons voulu avec ce document faire connaître, ainsi que mettre à la disposition des industriels du secteur, les orientations qui permettent la mise en place de l'optimisation des procédés de

production pour arriver à une gestion de l'entreprise intégrant les concepts environnementaux. Ceci signifie arriver à la minimisation des courants résiduaux conformément aux nécessités de production, et donc de façon *écoefficiente*.

En considérant l'entraînement comme la source la plus significative de perte de matières premières et d'eau, ainsi que la principale cause de la plus grande partie des eaux résiduaux et des déchets, une bonne partie des alternatives traitées tout au long de cette étude se base sur sa réduction et récupération. Ainsi, tant le chapitre sur la réduction à la source que celui de la récupération et du recyclage ont pour objectif principal d'agir sur l'entraînement dans l'unité de galvanoplastie.

Dans la section correspondant à la réduction de la pollution à la source, on a pu voir la substitution de matières premières et de procédés, l'allongement de la durée de vie des bains et la réduction des entraînements comme étant des points essentiels. On a aussi traité la question de l'introduction d'améliorations dans les systèmes de rinçage et de lavage (lavages en cascade à contre-courant, lavages étanches ou ECO, etc.).

En ce qui concerne la récupération et le recyclage à la source, on a traité des questions telles que la récupération de matières premières (dégraissage, décapage et produits d'apport), la réutilisation de l'eau (au moyen d'équipements de résines d'échange ionique et par osmose inverse), ainsi que la récupération des entraînements (par électrolyse, électrodialyse, électro-électrodialyse, osmose inverse, ultrafiltration, évaporation et échange ionique). Mis à part des solutions relativement simples et peu onéreuses, on a pu analyser d'autres possibilités plus élaborées, avec des degrés d'investissement croissants. Du fait de son importance et de ses caractéristiques propres, la section correspond aux bonnes pratiques environnementales a mérité un chapitre à part, tout comme le chapitre consacré aux alternatives de traitement d'effluents.

Par conséquent, on peut affirmer que le secteur dispose d'une grande variété et d'un grand nombre de solutions, d'un coût également très variable, qu'il s'agisse de faire des économies sur la consommation d'eau et de matières de base ou bien de réduire la génération de courants résiduaux.

Il est donc recommandable de mener une étude préalable afin de déterminer les options les plus appropriées à chaque cas. Cette étude, pour l'essentiel, doit définir les systèmes optimaux de réduction des consommations, en établissant les structures de processus, les équipements de récupération et les systèmes d'épuration.

Il s'agit, en peu de mots, de *rationaliser* une activité industrielle très satisfaisante professionnellement et pleine de défis – dans tous les domaines - encore à relever.

8. QUELQUES EXEMPLES RÉELS DES ALTERNATIVES PROPOSÉES

Voici à présent des exemples concrets d'entreprises méditerranéennes ayant implantées une ou plusieurs alternatives de minimisation. Ces exemples sont extraits des Fiches Med Clean publiées par le Centre d'Activités Régionales pour la Production Propre :

Fiche 2. Une production plus propre dans un établissement du secteur des bains galvaniques grâce à l'adoption de bonnes pratiques et à des modifications du procédé. Industrias F. Sandoval, S.L. (Espagne).

Fiche 5. Réduction des résidus au cours d'un procédé de nickelage chimique. Electroless Hoard Coat, S.A. (Espagne).

Fiche 11. Mesures pour la production propre dans une industrie d'accessoires sanitaires. Eczacibasi Yapi Gereçleri. (Turquie).

Fiche 15. Production plus propre dans l'industrie de l'aviation. Israel aviation industry (Israël).

Fiche 16. Production propre dans une entreprise de traitement de surfaces. Zincats Industrials Canovelles, S.L. (Espagne).

Fiche 19. Une production plus propre dans un secteur de finissage du métal dans l'industrie électronique. ST Microelectronics (Malte).

Fiche 22. Réduction des entraînements dans le chromage. Manuel Muñoz Clarós, S.L. (Espagne).

Fiche 30. Élimination du trichloréthylène dans la fabrication des pièces métalliques. Sasonia de Corte Fino, S.A. (Espagne).

9. REFERENCES PRINCIPALES

ADEME. *Étude technique et économique de l'utilisation des solvants dans huit secteurs industriels.* Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie. France. 1995.

AMETLLER, J. *Depuración de efluentes producidos por instalaciones de tratamiento de superficies.* Institut de Tecnologia i Modelització Ambiental. Terrassa. Junio de 1993.

BARA, J-C. *Traitement de surface. Environnement et compétitivité.* Paris. 1988.

BREUIL, J.N. *Traitement de surface. Dépollution à la source.* Cahiers Techniques de la Direction de la Prévention des Pollutions. Ministère de l'Environnement. Paris. 1986.

CORDERES, J. *Estudi i sistematització de les tecnologies de prevenció de la contaminació i producció neta en el sector de banys galvànics.* No publicat. Barcelona, 1999.

DEPARTAMENT DE MEDI AMBIENT. Generalitat de Catalunya. *Galvanotecnia i Medi Ambient. Guia pràctica per a una correcta gestió ambiental a les empreses de galvanotècia.* Barcelona, 1era i 2^a edició 1992 i 1994.

HARTINGER, L. *Handbook of effluent treatment and recycling for the metal finishing industry.* Finishing Publications, Ltd. Wiltshire. 2^e édition. 1994.

KUSHNER, J.B. *Water and waste control for the plating shop.* Gardner Publications, Inc. Ohio. 1976.

NOYES DATA CORPORATION. *Hazardous waste reduction in the metal finishing industry.* PCR Environmental Management, Inc. California. 1989.

OECD. *Managing wastes containing cyanides: guidance document.* Organisation for Economic Co-operation and development. Paris. 1992

UNEP. *Environmental management in the electronics industry. Semiconductor Manufacture and Assembly.* Technical Report n° 23. United Nations Publication. 1^{re} édition. 1994.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Guides to pollution prevention. The metal finishing industry.* Ohio. 1992.

10. ENTITES ET PERSONNES QUI ONT COLLABORÉ À L'ÉLABORATION DE CE RAPPORT

- AMBIOMA CONSULT, S.L. (BIOMA)
- EDELAMP, S.A.
- ENTHONE-OMI (ESPAÑA), SA
- ESPAÑOLA DE ELECTRÓLISIS, S.L. (FORPEZ)
- INDUSTRIA GALVÁNICA SAMA, S.A.
- MACDERMID, SA
- SIDASA, SA
- TRELLEBORG AUTOMOTIVE SPAIN, S.A.
- 3 M (ESPAÑA), SA
- USF (ESPAÑA), SA
- M. Carles Ventura
- M. José A. Ortega

11. PAGES WEB UTILES EN RAPPORT AVEC LE PROJET

<http://www.gencat.es/mediamb/>: web du Ministère de l'Environnement du Gouvernement de la Catalogne.

<http://www.cema-sa.org>: web du Centre pour l'Entreprise et l'Environnement.

<http://www.epa.gov/>: U.S. Environmental Protection Agency

<http://www.cygnus-group.com:9011> : réduction de déchets avec une attention toute particulière portée à la réduction et au recyclage à la source.

<http://www.euler.berkeley.edu/green/cgdm.html> : renseignements et études sur la production propre.

<http://www.acs.org> : la Société Chimique Américaine.

<http://www.envirolink.org> : importante source d'information en matière d'environnement reliée à de nombreuses adresses d'Internet.

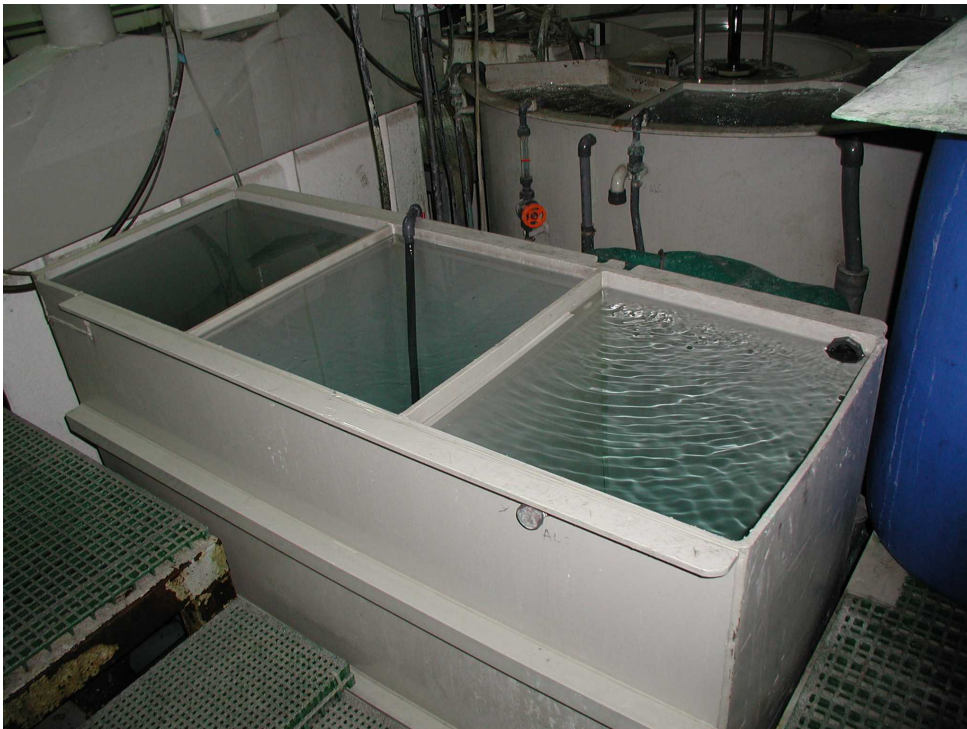
12. PHOTOGRAPHIES SUR QUELQUES ALTERNATIVES DE MINIMISATION



1 – Équipement de recyclage des eaux de lavage avec résines d'échange ionique



2 - Installation automatique de lavage avec automate programmable.



3 – Rinçage double en cascade à contre-courant.



4 – Équipement d'évaporation sous vide.



5 - Chaîne de suspension de châssis dans les bains de nickelage.



6 – Osmose inverse pour l'eau du réseau.



7 – Déminéralisateur d'eau du réseau.



8 – Installation d'oxydation de cyanures avant l'évaporation des eaux résiduelles.



9 – Sédimenteur à lames pour concentrer les polluants avant l'évaporation.



10 – Équipement de filtration des bains.



11 – Aspirations des fumées pour bains au nickel.



12 – Vue générale du passage avec plateaux de recueillement des égouttements au sol.