

MÉTHODE DE RÉDUCTION DES REJETS AQUEUX DES ATELIERS DE TRAITEMENT DE SURFACE

Valérie Laforest, Bruno Debray, Jacques Bourgois
ENSM.SE, Centre Simade, département ingénierie de l'environnement, Saint-Étienne

Les ateliers de traitement de surface sont générateurs de grandes quantités d'effluents liquides chargés en produits chimiques souvent toxiques. Afin de limiter l'impact de cette activité sur l'environnement et d'aider les industriels à respecter les contraintes réglementaires, nous avons mis au point une méthode d'optimisation des rejets en eau. Ce travail a débouché sur le développement d'un outil informatique support de la méthode.

The metal finishing industries generate a large quantity of wastewater usually polluted by toxic chemicals. In order to reduce the effluents and to respect the laws, we have built a method which helps professionals to reduce the amount of wastewater. Afterwards, a computer tool was developed in order to carry out the optimisation.

INTRODUCTION

Les réglementations (arrêté du 26 septembre 1985, loi du 13 juillet 1992 et arrêtés préfectoraux), la volonté de réduire la redevance pour pollution mais également l'amélioration de la qualité de la production, la recherche d'économies, la valorisation d'une image de marque plus « verte » et la recherche d'une meilleure qualité de vie pour le personnel et le voisinage ont amené peu à peu les industriels du traitement de surface à se pencher sur leurs rejets et leurs déchets^[Breuil 92]. Pour dépolluer, les industriels sont tentés d'installer des équipements de dépollution en bout de chaîne, ce qui représente des frais d'investissement et de fonctionnement élevés. Une autre position consiste à chercher des solutions qui s'appliquent directement aux procédés de fabrication. Les technologies propres sont une alternative aux rejets polluants. Une technologie propre est un procédé de fabrication permettant l'utilisation la plus rationnelle possible des matières premières et de l'énergie, la réduction de la quantité d'effluents polluant l'environnement, et ce à un coût économiquement acceptable. Adopter une technologie propre c'est opter pour un procédé de fabrication non polluant^[Tech]. La première étape dans la mise en place des technologies propres est l'optimisation de la chaîne de produc-

tion afin de réduire les rejets engendrés par les traitements. C'est dans cette optique que nous avons mis au point une démarche de raisonnement pouvant aider les industriels à réduire leur quantité d'effluents aqueux.

LE TRAITEMENT DE SURFACE – GÉNÉRALITÉS – PROBLÉMATIQUE

Le traitement de surface a pour objectif la modification de la surface de la pièce dans le but de lui conférer de nouvelles propriétés (nouvel aspect, protection contre la corrosion...). Cet objectif peut être atteint par le biais de procédés chimiques ou électro-chimiques nécessitant une grande quantité d'eau et de réactifs afin de donner à la pièce la qualité de traitement voulue. De ce fait, elle génère de grandes quantités d'effluents aqueux souvent toxiques pour l'environnement¹ et pour l'homme. C'est dans le but de réduire ces effets que l'arrêté du 26 septembre 1985 a été élaboré^[arrêté85]. Outre les restrictions en terme de limitation de concentrations d'espèces, il précise que les rejets en eau doivent être inférieurs à 8 litres par mètre carré de surface traitée et par fonction de rinçage². Plusieurs questions peuvent être posées : d'où viennent les problèmes liés au rejet des ateliers de traitement de surface? Quels sont les moyens à mettre en œuvre pour y remédier? Quelle démarche doit-on suivre? C'est à ces questions que nous allons répondre dans la suite de cet article.

De par la configuration des ateliers (suites de bains de traitement et de bains de rinçage) et les phénomènes liés aux traitements (entraînement, surverse, évaporation...), les rejets sont importants. La limitation de ces rejets permet de réduire la consommation en eau voire en produits chimiques et est donc un gain économique pour l'entreprise.

QUELS SONT LES MOYENS À METTRE EN ŒUVRE POUR LIMITER LES REJETS EN EAU?

Deux types d'actions peuvent être mis en œuvre. Il est possible d'agir d'une part sur l'entraînement et, d'autre part, sur les postes les plus impliqués dans la consommation et les rejets en eau c'est-à-dire les bains de rinçage.

Agir sur l'entraînement

L'entraînement est la quantité de liquide entraîné par la pièce lors de son passage d'un bain à un autre. Ce liquide chargé d'espèces chimiques va polluer les bains suivants et cette pollution se retrouvera dans les rejets de l'atelier^[Loire85]. La première possibilité pour réduire les rejets en polluants et en eau est de limiter et récupérer la quantité de produits entraînée par la pièce. Pour cela, des actions sont envisageables sur (figure 1) :

- la position des pièces sur les montages,
- la conception et le revêtement des cadres et tonneaux,
- la viscosité du bain (qui peut-être diminué soit par apport de faible dose de tensio-actifs soit par une augmentation de la température),
- la vitesse d'émersion des pièces (temps d'égouttage).

La modification d'un de ces facteurs influe fortement sur l'entraînement et peut le diviser par 2 à 5 induisant la réduction dans une proportion identique des consommations en eau^[Bara88]. En effet, comme les bains de rinçage sont moins pollués, les vidanges peuvent être espacées, ce qui réduit les débits.

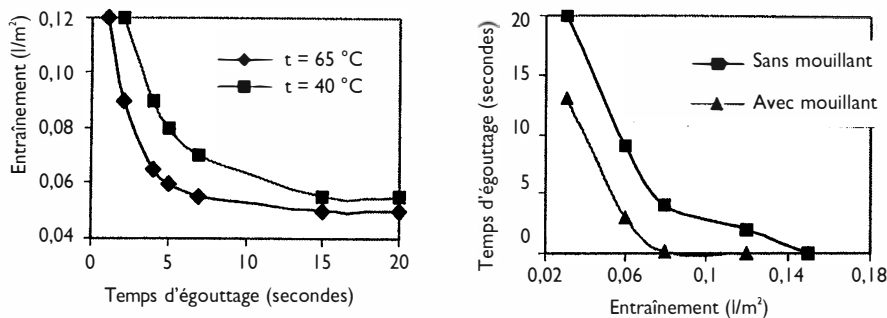


Figure 1 : Comparaison des entraînements en fonction des temps d'égouttage et de la viscosité du bain^[Loire 85]

Recyclage des bains de rinçage pour compenser l'évaporation

La récupération après un bain chaud peut se faire par réintroduction des eaux de rinçages dans le bain de traitement pour compenser son évaporation. Selon plusieurs facteurs tels que la température du bain, la surface et le nombre de rinçages statiques, la récupération de produit peut être comprise entre 70 et 99 %^[Bara 88].

Agir au niveau de la fonction de rinçage

La fonction de rinçage est l'ensemble des bains de rinçage associés à un bain de traitement. Les rinçages sont regroupés en 5 grandes familles :

- les rinçages morts ou statiques qui ne sont pas alimentés en eau mais sont renouvelés périodiquement ;
- les rinçages courants qui sont alimentés par un courant continu d'eau ;
- les rinçages cascades qui sont des cuves à plusieurs étages dont le courant d'eau est commun à chacun d'eux et dans lesquels la pièce passe à contre courant par rapport à l'eau ;

- les rinçages éco qui sont utilisés avant et après le bain de traitement. Ils ne sont généralement jamais vidangés ;
- les rinçages par aspersion de type douchette qui permettent de rincer très efficacement les pièces.

Ils ont pour objectifs (i) de limiter la pollution par entraînement dans les bains suivants, (ii) d'arrêter l'effet chimique des produits sur la surface de la pièce, (iii) de rendre la surface de la pièce propre et apte à être traitée par les produits chimiques de l'opération suivante.

L'objectif premier de la fonction de rinçage est d'éviter la contamination des bains de traitement les uns par les autres. Pour cela, à la pellicule de liquide qui recouvre la pièce à la sortie d'un bain, doit être substitué un film dilué dont la nature (concentration en éléments indésirables pour le traitement suivant) est satisfaisante. C'est pour cela que les cuves de rinçage sollicitent beaucoup d'eau et qu'elles sont très souvent à l'origine du gaspillage (95 % de l'eau est utilisée pour rincer la pièce entre deux traitements successifs). Il est notamment courant de rincer les pièces plus que ne l'impose le procédé.

Ensuite, pour une même efficacité de rinçage, la répartition des débits et la structure des bains peut avoir une grande influence sur les rejets en eau.

Il y a donc plusieurs facteurs de surconsommation en eau et donc plusieurs moyens pour réduire les effluents liquides : en optimisant l'efficacité des rinçages, en ajustant les débits, en jouant sur la structure des bains.

Afin de pouvoir évaluer le bon fonctionnement des rinçages associés à un bain de traitement, le rapport de dilution a été défini comme la dilution du film de liquide sur la pièce en sortie de rinçage. Son

expression est le rapport entre la concentration de la pellicule à la sortie du bain de traitement précédent le rinçage et celle à la sortie du dernier stade de rinçage avant le traitement suivant. La comparaison de la valeur de ce rapport de dilution avec des valeurs minimales expérimentales permet d'évaluer l'efficacité des rinçages^[Loire85].

Une approche économe

Comme nous l'avons déjà mentionné ci-avant, il est commun de rincer plus que nécessaire. Par soucis d'économie d'eau, la première approche se situe alors au niveau des efficacités de rinçage. Il s'agit de réduire les rapports de dilution au strict minimum imposé par le procédé. Les valeurs optimales sont généralement dictées par l'expérience et évoluent au cas par cas. Des valeurs indicatives sont proposées par la littérature^[Loire85] (tableau 2). Les débits correspondant aux nouveaux rapports de dilution sont calculés à partir des formules données dans le tableau 1.

Ajustement des débits des rinçages courants

Dans le cas où la fonction de rinçage est composée de plu-

Tableau 1 : Rapport de dilution par type de rinçage
(e est l'entraînement (l/h), V, le volume vidangé (l/h), Q est le débit (l/h))

Type de rinçage	Propriétés	Comportement en dilution
Rinçage statique	Pas de courant d'eau Vidangé périodiquement	$R_d = \frac{C_B}{C_M} = \frac{1}{1 - \exp\left(-\frac{e}{V_v}\right)}$ R_d : rapport de dilution à la vidange Sans vidange (cas général). $R_d = 2$ Avec vidange (cas exceptionnel)
Rinçage éco	Utilisé avant et après le bain de traitement Rinçage statique En général, un rinçage éco n'est jamais vidangé	$R_d = \frac{2}{1 - \exp\left(-\frac{2e}{V_v}\right)}$
Autres rinçages	Rinçage à débit d'eau Rarement vidangé - rinçage cascade - rinçage courant - rinçage par aspersion	$R_d = \left(\frac{Q}{e}\right)^n$
Fonction de rinçage	Ensemble des bains de rinçage suivant un bain de traitement	$R_{df} = \prod R_d$

Tableau 2 : Valeurs optimales des rapports de dilution par type de traitement

Type de traitement	Rapport de dilution
Préparation de surface (dégrossissage, décapage...)	500 – 5000
Après la plupart des bains de dépôts	5000 – 10000
Après passivation (au Cr VI)	1000 – 2000
Après phosphatation, anodisation de l'Al...	2000 - 5000

sieurs rinçages courants, la répartition des débits de ceux-ci a une influence notable sur d'une part la qualité de l'eau en sortie et d'autre part sur la quantité d'eau consommée. Une fonction de rinçage dont l'efficacité est R_d peut être composée de rinçages statiques dont le produit des rapports de dilution R_{ds} est connu et d'un certain nombre de rinçages courants (le nombre d'étages : n et l'entraînement : e) dont on veut déterminer les débits au plus juste. L'équation E_i suivante permet d'ajuster les débits afin que ceux-ci soient minima pour une efficacité de rinçage optimale. Cette équation a été déterminée à l'aide de l'optimisation par contrainte de Lagrange^[Hiriart 96]. Pour cela, deux hypothèses ont été émises, d'une part, le rapport de dilution de la fonction de rinçage est connu et d'autre part, le rapport de dilution de chaque rinçage statique composant la fonction de rinçage est connu.

$$q_i = \left[R^{1-\sum n_i} \times \prod \left(\frac{e_i}{n_i} \right)^{n_i} \right]^{\frac{1}{\sum n_i}} \times n_i \times R \quad (E_i)$$

Où i est le numéro du rinçage courant, q est le débit, R est le rapport entre le rapport de dilution de la fonction de rinçage et le produit des rapports de dilution des rinçages statiques, e est l'entraînement (l/m²), n est le nombre d'étages

Aménager les structures des rinçages

La méthode la plus efficace pour réduire les rejets est la modification de la structure des rinçages. L'utilisation de rinçages cascade à contre-courant est, de loin, la solution la moins coûteuse en eau.

Le tableau 3 explicite bien ce phénomène. On remarque que

les gains deviennent très importants lorsque le nombre d'étages augmente, en effet, en optimisant les rinçages, les débits peuvent être divisés par des facteurs pouvant aller jusqu'à plus de 100.

Pour les bains faiblement chauffés (< 40 °C), les rinçages éco sont très utiles et permettent de diminuer notablement les entraînements (figure 2).

Tableau 3 : Influence des structures de rinçage sur la quantité d'eau consommée [Bara 88]

Rd	1000				5000			
	1	2	3	4	1	2	3	4
$\frac{Q}{e} = \sqrt[n]{R_d}$	1000	31,6	10	5,6	5000	70,7	17,1	8,4

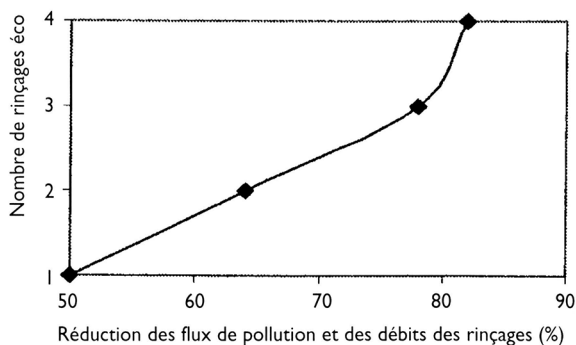


Figure 2 : Influence du nombre de rinçage éco sur le flux de pollution et le débit des rinçages^[Loire 85]

Implantation des résines échangeuses d'ion

Les résines échangeuses d'ions permettent d'une part de recycler l'eau des rinçages courants lorsqu'elles sont utilisées en circuit fermé ainsi que des rinçages statiques peu chargés et d'autre part de retenir la pollution. Elles permettent d'aboutir à un rejet-zéro lorsque leur régénération est effectuée à l'extérieur de l'atelier.

QUELLE DÉMARCHE DOIT-ON ADOPTER POUR RÉDUIRE LES REJETS EN EAU ?

Pour faciliter le travail des industriels, nous proposons une démarche méthodique permettant d'examiner toutes les possibilités de minimisation des effluents de la plus simple à la plus contraignante.

La première étape dans la minimisation des rejets est la détermination des objectifs d'optimisation du process. Les premiers objectifs sont généralement dictés par la réglementation, en particulier l'arrêté d'exploitation de l'installation. Celui-ci peut imposer les valeurs des textes nationaux (arrêté du 26 septembre 1985) ou être encore plus contraignant. Dans les cas extrêmes un « rejet-zéro » peut être demandé. Cette étude peut aussi avoir pour objectif la mise en place de la norme Iso 14000 ou une étude déchet.

Avant l'évaluation des rejets et l'optimisation de la chaîne, il est nécessaire de décrire l'atelier par les différentes entités (chaîne, cuve, gamme) qui la composent. Les chaînes sont composées de suite de cuves qui, associées entre elles par type de traitement, forment des gammes. Chacune de ces entités doit être décrite par ses paramètres physico-chimiques (tableau 4).

Tableau 4 : Liste des paramètres de description des différentes entités composant un atelier

Chaîne	Cuve	Gamme
Liste des bains :	- volume	- nombre de fonctions de rinçage
- de traitement	- température	- surface de pièces traitée
- de rinçage statique	- temps de fonctionnement	-...
- de rinçage courant	- entraînement	- débit
- de rinçage éco	-...	-...

Après une description totale de l'atelier, la première étape est le calcul du rapport de dilution afin de se rendre compte de l'efficacité de la fonction de rinçage. Celui-ci est modifié suivant l'efficacité désirée ce qui entraînera une modification des débits des rinçages courants composants la fonction de rinçage étudiée. La répartition des débits est calculée à l'aide de l'expression E₁. L'optimisation peut s'arrêter à cette étape si le calcul des rejets en eau effectué à l'aide de l'équation E₂ donne une valeur inférieure à la valeur limite choisie (8 litres par mètre carré de surface traitée et par fonction de rinçage dans le cas général).

$$B_{eau} = \sum(a_i r_i \times (V_i \times F_i + Q_i \times W_i) + V_{reg} \times x_i) + A \quad (E_2)$$

Où B_{eau} est le bilan eau en m³/an, i est le numéro de la cuve, V est le volume en m³, F est la fréquence de vidange par an, Q est le débit en m³/h, W est la durée de fonctionnement en h/an, V_{reg} est le volume de régénération de la résine, A est la quantité d'eau rejetée par les postes annexes.

a, r, x = 0 ou 1 respectivement s'il y a compensation, recyclage sur résine, si la résine est régénérée sur place ou non

Dans le cas contraire, l'étape suivante est la modification de la structure qui, dans un premier temps, est faite par la

modification du type de rinçage puis, si nécessaire, par l'introduction de résines échangeuses d'ions. La démarche est résumée sur la figure 3.

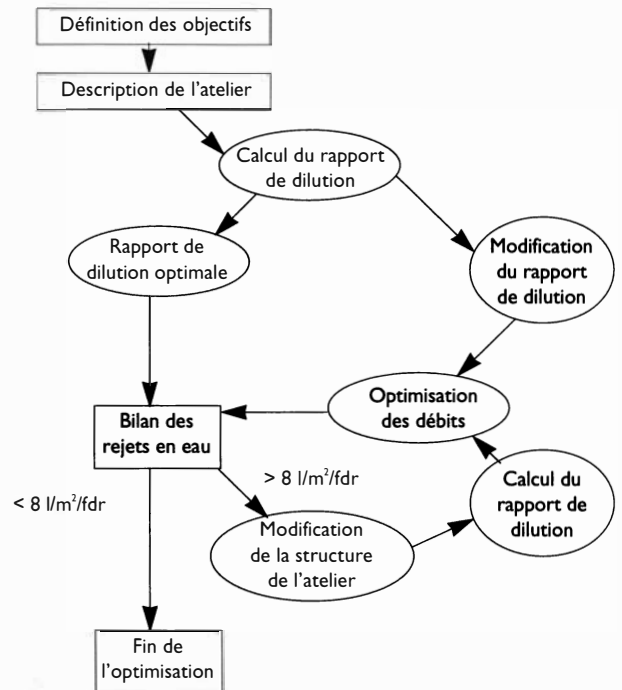


Figure 3 : Récapitulatif de la démarche pour la réduction de rejets aqueux des ateliers de traitement de surface

ÉTUDE DE CAS

Afin d'illustrer notre démarche, nous avons étudié le cas réel suivant : chaîne de nickelage au tonneau (tableau 5)

L'atelier traite 10 600 m²/an avec un rythme de production de 16 h/j, 5 j/sem et 45 sem/an. L'entraînement est de 0,3 l/m².

Le bilan des rejets en eau de l'atelier donne une valeur de 3 779 m³/an alors que les rejets autorisés sont de 254,4 m³/an (calculés sur la base de 8 litres par mètre carré de surface traitée et par fonction de rinçage). L'atelier rejette donc une quantité d'effluents très supérieure à celle autorisée. La première étape est le calcul des rapports de dilution de l'atelier avant toute modification (tableau 6). On passe ensuite à l'étape d'ajustement des rapports de dilution qui va permettre d'optimiser l'efficacité des rinçages et donc les débits. Pour cela, il suffit de fixer les rapports de dilution des fonctions de rinçage. Les rapports de dilution des rinçages statiques sont, eux aussi, définis, ce qui permet de calculer les rapports de dilution des rinçages courants et donc les nouveaux débits de ces derniers.

Cette modification fait passer les rejets en eau de 3 779 m³/an à 441,4 m³/an qui restent toujours supérieurs aux 254,4 m³/an autorisés.

La deuxième étape dans l'amélioration du process est la

Tableau 5 : Description de l'atelier de nickelage au tonneau

Nature du bain	Température (°C)	Volume (l)	Fréquence de vidange	Débit (l/h)
Dégraissage (a)	40	800	1/sem	0
Rinçage cascade double (b)	ambiante	800	1/an	650
Dépassivation (c)	ambiante	800	1/sem	0
Rinçage cascade double (d)	ambiante	800	1/an	140
Nickelage (e)	55	2500	0	0
Rinçage mort (f)	ambiante	800	2/an	0
Rinçage cascade double (g)	ambiante	800	0	220
Rinçage statique (h)	ambiante	600	1/2 j	0

réduire leur rejet en partant d'une technique n'entraînant pas d'investissement pour finir par des techniques plus coûteuses. Elle a, de plus, permis la mise au point d'un outil informatique capable de gérer rapidement les études entreprises.

Valérie Laforest, Bruno Debray, Jacques Bourgois,
ENSM.SE - Centre Simade - Département ingénierie de l'environnement
- 158, cours Fauriel - 42023 Saint-Étienne cedex 02

Nous tenons à remercier USF Astre qui nous a aidé dans cette étude.

Tableau 6 : Tableau récapitulatif des résultats. En caractère normal : résultats calculés; en caractère gras : valeurs imposées

Type de bain	a	b	c	d	e	f	g	h
Nombre d'étages		2		2		2		
Rd actuel	5,46.10 ⁵	5,46.10 ⁵	2,53.10 ⁴	2,53.10 ⁴	1,61.10 ⁴	1,16	62,5.10 ³	22,3
Rd optimisé	2000	2000	1500	2000	5000	2	113,6	22
Débites (l/h)		39,5		34,08		9,38		

Tableau 7 : Récapitulatif des résultats après modification de la structure de l'atelier. En gras : valeurs données, en italique : valeurs modifiées, en clair : valeurs calculées

Type de bain	a	Rinçage cascade triple	c	Rinçage cascade triple	e	f	Rinçage cascade triple	h
Nombre d'étages		3		3			3	
Rapport de dilution	2000	2000	1500	1500	5000	2	113,6	22
Débites (l/h)		11		10			4,26	

modification de la structure de la chaîne. Nous remplaçons ici les rinçages cascade double par des rinçages cascade triple. Les résultats de cette modification sont résumés dans le tableau 7.

Cette nouvelle étape permet de réduire les rejets jusqu'à une valeur de 234 m³/an qui est inférieure aux 254,4 m³/an autorisés. Les rejets de l'atelier sont ainsi inférieurs au seuil réglementaire.

OUTILS INFORMATIQUES

La quantité d'information à traiter rend toute cette étude fastidieuse manuellement. Afin de faciliter et d'accélérer le traitement des données, nous avons en collaboration avec USF Astre (l'utilisateur) développé un outil informatique capable de réaliser toutes les tâches précédemment décrites. L'outil élaboré à l'aide d'un système de gestion de base de données permet une réactualisation aisée et, grâce à une interface ergonomique, il est facile d'utilisation^[Laforest 98].

CONCLUSIONS

Notre étude a permis de hiérarchiser les techniques de réduction des rejets issus des ateliers de traitement de surface et de proposer une démarche méthodique pour l'optimisation d'une chaîne. Elle permet d'aider les industriels à

Notes :

1. En France, on dénombre environ 4400 ateliers de traitement de surface qui sont responsables de plus de 35 % de la pollution des eaux par les métaux

2. Une fonction de rinçage est l'ensemble des rinçages associés à un bain de traitement

Bibliographie

- [Arrêté 85] Arrêté du 26 septembre 1985, Ateliers de traitement de surface, JO des 16 novembre 1985 et 8 novembre 1990.
- [Bara 88] Jean-Claude BARA, *Traitement de surface, Environnement et compétitivité*, Editions Eyrolles, 1988, 193 p.
- [Hiriart 96] Jean-Baptiste Hiriart-Urruty, *L'optimisation*. Edition Que sais-je? Presses Universitaires de France, octobre 1996, 128 p, n° 42973.
- [Laforest 98] V. Laforest, D. Grange, J. Bourgois, *Gestion de l'eau dans les ateliers de traitement de surface, L'Eau, l'Industrie, les Nuisances*, avril 1998, n° 211, pp 46-49.
- [Loire 85] Cahiers techniques de la direction de la prévention des pollutions n° 18, *Traitement de surface : dépollution à la source*, Agence de Bassin Loire-Bretagne, 1985, 112 p.
- [Tech] <http://bourgogne.arist.tm.fr/technop/TPSTOPO.HTM>