

TECHNOLOGIES PROPRES ET TRAITEMENT DE SURFACE

*Valérie Laforest, *Bruno Debray, **Didier Grange, *Jacques Bourgois

*École nationale supérieure des mines de Saint-Etienne - ** USF Astre

L'application des technologies propres aux ateliers de traitement de surface peut se faire suivant trois approches complémentaires que sont l'optimisation, la substitution et la modification du procédé de production par l'introduction de techniques de valorisation. Nous nous sommes plus particulièrement intéressés à cette dernière approche en développant une démarche méthodologique pour le choix des procédés de valorisation des effluents. Cette démarche qui prend en compte toutes les contraintes auxquelles sont soumis les industriels et les procédés (contraintes techniques, réglementaires, etc.) nous a amené à développer un outil informatique d'aide à la décision (3R-ETS).

The application of the clean technologies to the metal finishing workshops can be obtain by three ways : the optimisation, the substitution and the modification of the production process by, for example, the introduction of valorisation processes. We have developed a method which allows industrialists to choose the best valorisation techniques of their effluents. This method which is based upon each industrial and process constraints (technical, regulation, etc.) lead us to develop a decision support system (3R-ETS).

INTRODUCTION

Les ateliers de traitement de surface représentent une des plus grosses activités génératrices de rejets toxiques. La réglementation de plus en plus contraignante incite les industriels à adopter des solutions de réduction des rejets nocifs en mettant en place un nouveau système de gestion de leurs effluents. La façon la plus sûre est actuellement l'évolution du procédé de valorisation vers une technologie propre. Nous verrons dans cet article les différents moyens mis à disposition des professionnels du traitement de surface pour réduire leurs impacts environnementaux par l'intermédiaire de technologies propres. Nous insisterons plus particulièrement sur la méthode de choix des procédés de valorisation que nous avons mise au point en faisant ressortir les difficultés et contraintes rencontrées.

LES TECHNOLOGIES PROPRES

Le terme de technologies propres est apparu en France dans les années 70. Il désigne des techniques de production modernisées, moins polluantes, plus économiques et conformes à la législation. Depuis la fin des années 70, il recouvre toutes les actions préventives permettant la révision et la remise en cause du concept de production et de transformation, en vue d'éviter une perte, une nuisance et un danger [Maes, 1996]. Contrairement aux solutions d'épuration de fin de chaîne de production, les technologies propres résolvent le problème de pollution à la source.

L'introduction des technologies propres au sein d'un système de production permet d'allier les intérêts écologiques et économiques, d'une part, par la réduction de la consommation en matières premières (ex : réactifs chimiques), en eau et en énergie et, d'autre part, par la génération d'un minimum de déchet et d'effluents par entre autre la valorisation de ces derniers. Elles font appel à trois approches appliquées selon la nature des problèmes identifiés et la complexité des interventions requises.

L'optimisation du procédé existant

Elle a pour objectif, dans un contexte général, de réduire la consommation et le rejet en eau, la consommation de produits chimiques, d'énergie, etc. L'ajustement des paramètres par, entre autre, la sensibilisation des acteurs et la mise en place d'instruments de mesure ainsi que le ré-aménagement de la structure de l'atelier de production, permet d'en optimiser le fonctionnement.

La substitution de procédés

Elle correspond à la substitution soit de technologies de production par des procédés moins polluants, soit de matières premières par d'autres moins polluantes (moins toxiques ou moins génératrices de déchets), moins rares, moins consommatrices d'énergie et/ou moins génératrices d'impact mais ayant la même fonction.

La modification du procédé de production

La modification de l'atelier de production recouvre essentiellement la mise en place de techniques de valorisation à

l'intérieur des chaînes de traitement dans le but de régénérer, recycler ou récupérer le flux.

Les technologies propres ont une action favorable sur le processus de production, elles doivent répondre aux critères de faisabilité industrielle, technique et économique. De plus, elles ne doivent ni gêner la production ni affecter la qualité des pièces produites.

LE TRAITEMENT DE SURFACE

L'activité du traitement de surface représente toutes les actions effectuées à la surface d'une pièce dans le but de lui conférer de nouvelles propriétés physiques, chimiques ou esthétiques. Différents milieux de traitement existent (voie aqueuse, voie sèche, traitements de conversion, traitement thermochimique, etc.), nous nous sommes intéressés exclusivement aux traitements par voie aqueuse qui sont grands consommateurs d'eau et de produits chimiques souvent toxiques pour l'homme et l'environnement. Les 4500 ateliers de traitement de surface recensés en France sont d'ailleurs responsables d'environ 40 % de la pollution aqueuse toxique rejetée par l'ensemble des industries [Rigaud, 1998].

Les effets toxiques des différentes espèces contenues dans les rejets justifient la mise en place d'une réglementation spécifique destinée à limiter au maximum la teneur en espèces chimiques nocives.

Le traitement de surface est principalement régi par l'arrêté ministériel du 26 septembre 1985 [arrêté 85]. Il définit des seuils de rejets en sortie d'installation en terme, d'une part, de concentration en espèces chimiques dans les effluents et, d'autre part, de « débit » rejeté qui doit être inférieur à 8 litres par mètre carré de surface traitée et par fonction de rinçage (la fonction de rinçage est l'ensemble des rinçages associés à un bain de traitement). De plus, il préconise la mise en place de procédés de valorisation. Toutes ces recommandations s'inscrivent dans une démarche technologies propres.

Traitement de surface et procédés propres

Nous pouvons maintenant examiner comment les principes évoqués dans le premier paragraphe s'appliquent au traitement de surface.

Optimisation du procédé de production

Le principe d'optimisation du procédé existant s'applique par différents moyens notamment par l'amélioration de l'existant (sensibilisation des acteurs, introduction d'installations de mesures, etc.), la détermination des conditions opératoires optimales de fonctionnement (optimisation de l'efficacité des rinçages, ajustement des débits, etc.) et la restructuration de l'atelier de production (modification du type de rinçage, introduction d'installation de recyclage des eaux, etc.) [Laforest, 1999].

Substitution du procédé de production

Il s'agit ici de la substitution du bain polluant par un autre moins ou non polluant. Cette modification peut aussi bien être effectuée au niveau de la technique de traitement de surface que de la composition du bain de traitement.

Au niveau des produits chimiques, nous pouvons citer deux exemples : la substitution des solvants chlorés de dégraissage par des solvants non chlorés, de l'eau ou des solutions alcalines telle que l'ammoniaque; le remplacement des sels de chrome VI par des sels de chrome III dans les opérations de dépôts.

Au niveau technique, les dépôts physiques en phase vapeur peuvent éventuellement remplacer les dépôts chimiques en phase aqueuse.

La substitution d'un procédé par un autre semble souvent intéressante mais il faut néanmoins prendre garde à ne pas altérer la qualité du produit fini et à ce que la production de déchet soit effectivement moins importante et moins nocive.

La modification du procédé de production

Depuis une vingtaine d'année, la réduction de la pollution s'est exclusivement faite en fin de cycle de production [Onudi, 1997]. Bien que ces traitements soient efficaces, ils se révèlent, d'une part, relativement coûteux et, d'autre part, peu propices à une valorisation des espèces chimiques pouvant faire œuvre de matières premières secondaires. La nécessité de diminuer les impacts environnementaux a fait ressortir le besoin d'une meilleure gestion des rejets aqueux à la source par réduction de la production de polluants.

Dans le cadre du secteur du traitement de surface, la modification du procédé de production recouvre l'introduction de procédés de valorisation au sein de la chaîne de production. Ce qui permet, d'une part, de réduire les rejets à la source : limiter la quantité d'eau ainsi que la teneur en polluant arrivant en station de détoxification et, d'autre part, d'avoir la possibilité de recycler ou vendre le métal récupéré. Les techniques de valorisation qui ont pour but de recycler, de régénérer et/ou de récupérer le flux permettent de limiter :

- le volume des rejets et la quantité de flux polluant,
- les pertes en matière première,
- la consommation de réactifs,
- les coûts d'élimination des déchets.

Les deux premiers axes présentés ci-dessus ne seront pas développés dans cet article, le lecteur pourra se reporter à [Laforest, 1999]. Nous nous pencherons sur l'aspect modification du procédé et plus précisément sur la démarche de sélection des procédés de valorisation.

CHOIX DES PROCÉDÉS DE VALORISATION

L'utilisation encore rare des procédés de valorisation dans le monde industriel est due à plusieurs facteurs dont, en outre, la quantité importante d'informations non structurées, le manque de temps, le manque de moyen financier, l'hétérogénéité des critères à prendre en compte, etc. Afin d'aider les industriels à utiliser ces techniques, nous avons mis au point une méthode de sélection des procédés de valorisation qui a abouti à un outil informatique d'aide à la décision. Cette démarche se base sur différents critères que nous allons détailler dans le paragraphe suivant.

Critères de choix

Le choix d'un procédé de valorisation est une opération délicate qui doit, avant les essais sur pilote, tenir compte de toutes les contraintes aussi bien techniques, réglementaires qu'industrielles. Elles ont été définies suite à différentes études effectuées auprès de professionnels (industriels, bureaux d'études, etc.)

Les contraintes économiques

Ce sont les contraintes les plus importantes pour les industriels. Elles représentent le facteur déterminant le choix du procédé de valorisation. La sélection d'un procédé dépend des coûts d'investissement, de fonctionnement ainsi que de la rentabilité du procédé : le retour sur investissement doit être le plus faible possible.

Les contraintes d'ordonnement fonctionnel

La structure de l'atelier peut être un frein à l'implantation de procédés par manque de place. Néanmoins, ce peut être l'occasion de déclencher une phase de ré-ordonnement des chaînes de production.

Les contraintes d'ordonnement spatial

Ces contraintes sont aussi très importantes par le fait que certains procédés nécessitent un environnement particulier pour leur implantation. Les équipements nécessaires n'étant pas obligatoirement disponibles au sein de l'entreprise, il est indispensable de prendre en compte ce paramètre.

Les contraintes techniques

Chaque procédé de valorisation a ses propres conditions opératoires qui limitent leur utilisation (espèces, concentration, volume, pH, débit, température, etc.). De plus, chaque industriel a ses propres contraintes techniques qui proviennent des caractéristiques des effluents à traiter (espèces, concentration, volume, pH, débit, température, etc.). La prise en compte de ces contraintes permettra de sélectionner des procédés potentiellement applicables techniquement.

Les contraintes réglementaires

L'arrêté ministériel du 26 septembre 1985 ou l'arrêté préfectoral d'exploitation présente les seuils de rejets en terme de concentration en espèces chimiques. C'est actuellement la contrainte déclenchant l'idée de valorisation de la part des industriels.

La méthode que nous avons développée [Laforest, 1999²] permet d'aboutir à la solution de valorisation potentiellement utilisable (ensemble des procédés de valorisation possibles) en prenant en compte toutes les contraintes précédemment citées.

Le choix des procédés de valorisation

Afin d'optimiser la sélection des procédés de valorisation, nous avons classé l'ensemble des contraintes par catégories. La méthode que nous avons élaborée repose sur ce classement et est divisée en plusieurs étapes :

Phase de diagnostic

La sélection des procédés par les caractéristiques tech-

niques nécessite la connaissance spécifique de l'effluent étudié. Il est donc impératif de connaître tous les paramètres physico-chimiques de description de l'effluent (le type de cuve, la fonction de traitement, la température du bain, le pH, la différence de densité, les espèces chimiques et leur concentration ainsi que certaines propriétés spécifiques). Outre la sélection par les contraintes techniques, ces caractéristiques permettront de déterminer précisément les objectifs de valorisation des industriels.

Sélection par les objectifs

Avant de se lancer dans une sélection de type technique par comparaison des différents paramètres, nous préconisons une sélection par les objectifs.

Cette étape a pour but de faire un premier tri dans les procédés de valorisation en associant les objectifs de valorisation des procédés aux objectifs de valorisation des industriels ce qui permet de réduire le nombre de procédés à une liste conforme aux attentes premières des industriels.

Chaque procédé de valorisation a une fonction bien spécifique qui peut se traduire par des objectifs de valorisation se définissant de façon générique par les termes de régénération, récupération et recyclage.

La régénération est la réutilisation du flux dans sa fonction d'origine, le recyclage est la réutilisation du flux dans une fonction autre que sa fonction d'origine et la récupération est l'extraction de la part active ou des impuretés du bain en vue de leur réutilisation soit dans la même fonction soit dans une autre fonction.

La volonté des industriels étant le paramètre déclenchant la mise en place de procédés, il est nécessaire de prendre en considération, dans la méthode, leurs objectifs de valorisation qui sont dépendants de deux contraintes :

– Les contraintes réglementaires : chaque entreprise de traitement de surface est soumise à un arrêté préfectoral individuel basé généralement sur l'arrêté ministériel du 26 septembre 1985. Ces arrêtés imposent de plus en plus souvent le zéro-rejet liquide.

– Les contraintes techniques sont données par l'ensemble des bilans (eau et pollution) de l'atelier. Ces bilans permettent d'évaluer la quantité d'eau rejetée et la concentration de chaque espèce chimique présente dans les rejets.

Les contraintes techniques comparées aux contraintes réglementaires permettent de dégager les orientations de valorisation. Ces dernières s'expriment de diverses manières qu'il faudra comparer aux objectifs des procédés de valorisation. La définition de ces deux types d'objectifs nous a conduit à expliciter ces derniers afin qu'ils puissent être compréhensibles par les industriels. Le tableau 1 récapitule l'ensemble des objectifs des industriels ainsi que le lien avec les objectifs des procédés alors que le tableau 2 présente la liste des procédés de valorisation suivant leurs objectifs, le type de bain à traiter et leurs stratégies.

Phase de présélection des procédés

Suite à la phase de sélection par les contraintes d'objectifs, nous proposons de prendre en compte les critères tech-

Tableau 1 : Lien entre les objectifs des industriels et ceux des procédés

Objectifs des procédés	Objectifs des industriels correspondants
Régénération	Réduire la quantité d'effluent rejetée et la quantité d'eau consommée Réduire la consommation de réactifs Réduire la quantité de boues produite
Récupération	Récupération de métal, acides, bases, etc. Réduire la consommation de réactifs de détoxification Réduire la quantité de boues produite
Recyclage	Réduire la quantité d'effluent rejetée Réduire la consommation en eau

Tableau 3 : Liste des paramètres d'utilisation des procédés de valorisation

Paramètres Adaptabilité	
Le pH avec des valeurs minimales et maximales	Non
La température avec des valeurs minimales et maximales	Oui
La pression maximale qu'un procédé peut supporter	Non
La différence de densité entre les deux phases de l'effluent à traiter	Non
La quantité de matière en suspension (MES)	Oui

Tableau 2 : Récapitulatif des différents objectifs et des stratégies liés à chaque type de procédés de valorisation

Objectifs	Régénération	Récupération	Recyclage	Stratégies
Type de bain	<i>Réutilisation du flux dans sa fonction initiale</i>	<i>(de la part active ou du contaminant)</i>	<i>réutilisation du flux dans une autre fonction</i>	
Bain de traitement	Filtration (nF, µF, uF), E, ED, EED, OI, évaporation, centrifugation, extraction liquide/liquide, séparateur gravitaire E, EMB, EED EED, ED, OI, évaporation, centrifugation, filtration (uF, nF, µF)	Filtration (nF, µF, uF), E, ED, EED, OI, évaporation, centrifugation, extraction liquide/liquide E, EMB, EED E, EED EED, ED, OI, évaporation, centrifugation, filtration (uF, nF, µF)		Extraction Inversion Destruction Concentration
Bain de rinçage statique	Filtration (uF, µF, nF), E, EED, OI, évaporation, extraction liquide/liquide, électroflocculation	Filtration (uF, µF, nF), E, EED, OI, évaporation, extraction liquide/liquide E, EMB, EED E, EED	Filtration (uF, µF, nF), E, ED, EED, OI, évaporation, extraction liquide/liquide	Extraction Inversion Destruction Concentration
Bain de rinçage courant	Filtration (nF, µF, uF), OI, évaporation, EED, ED, résines, extraction liquide/liquide, électroflocculation EED, ED, OI, évaporation	Filtration (nF, µF, uF), OI, évaporation, EED, ED, résines, extraction liquide/liquide, EED, ED, OI, évaporation	Filtration (nF, µF, uF), OI, évaporation, EED, ED, résines, extraction liquide/liquide, EED, ED, OI, évaporation	Extraction Concentration

(E électrolyse, ED électrodialyse, EED électro-électrodialyse, EMB électrolyse à membrane bipolaire, uF ultrafiltration, µF microfiltration, nF : nanofiltration, OI osmose inverse)

niques que sont les paramètres limitant l'utilisation des procédés de valorisation et les caractéristiques des bains à traiter. Cette phase permet donc de sélectionner les procédés techniquement possibles. Elle réduit la liste par comparaison des caractéristiques de l'effluent à traiter aux paramètres limitant l'utilisation des procédés sélectionnés après la prise en compte des objectifs. Les paramètres d'utilisation des procédés que nous avons retenus après notre étude sur les bains de décapage et de dégraissage sont décrits dans le tableau 3.

Nous avons considéré que certains de ces paramètres pouvaient faire l'objet d'une adaptation par ajout d'un dispositif au procédé de valorisation. Pour sélectionner une solution de valorisation, nous avons considéré qu'elle ne devait transgresser aucun critère non adaptable et au plus un critère adaptable.

Nous pouvons ainsi hiérarchiser l'ensemble des procédés utilisables techniquement et qui sont conformes aux objectifs de valorisation.

Finalisation de la sélection

Après la sélection des procédés par les critères techniques

et d'objectifs, l'utilisateur doit prendre en compte les contraintes d'ordonnement, de personnel et, naturellement, l'aspect économique :

- les coûts (investissement, fonctionnement, consommation énergétique, etc.),
- le rendement,
- la durée de vie,
- l'amortissement,
- etc.

Ces informations d'ordre général ne sont pas nécessairement représentatives du cas étudié. Pour obtenir des résultats cohérents, il est nécessaire de se tourner vers des professionnels capables de dimensionner les installations et d'évaluer les coûts globaux.

DESCRIPTION DE L'OUTIL INFORMATIQUE

Les deux premières phases de sélection (objectifs et techniques) sont fastidieuses en raison du nombre de possibilités et de paramètres à prendre en compte. Afin de simplifier et d'accélérer cette phase de choix, nous avons mis au

point le logiciel de sélection des procédés de valorisation 3R-ETS (Régénération, Recyclage et Récupération des Effluents du Traitement de Surface). Ce logiciel développé à l'aide du système expert à base de règles Sherlock (mis au point par M. Caplat de l'Insa de Lyon) permet de prendre en compte les deux types de sélection précédents en se basant sur le raisonnement d'experts.

L'utilisation de ce logiciel permet d'identifier les procédés pour lesquels devront être entrepris des essais de faisabilité en milieu industriel qui restent malgré tout nécessaires. L'outil que nous avons mis au point pour deux fonctions de traitement (dégraissage et décapage) est divisé suivant les différentes étapes de la méthode :

- une phase de diagnostic (description de l'effluent),
- une phase de définition des objectifs de l'utilisateur,
- une phase de présélection,
- une phase de sélection (sélection des procédés de valorisation).

La phase de diagnostic

Elle a pour but de guider l'utilisateur dans la description de l'effluent à étudier. Ces informations permettront, d'une part, à l'utilisateur de définir plus précisément ses objectifs et, d'autre part, de guider la sélection des procédés par comparaison avec leurs paramètres d'utilisation. Les paramètres sont soit de type physico-chimique (pH, température, pression, différence de densité, quantité de MES, débit, etc.) soit de type technique (type de bain, fonction du bain, etc.). La figure 1 représente la page écran de saisie du pH de la solution.

Figure 1 : Écran de saisie du pH de l'effluent à traiter

Nous avons choisi de faire la description de tous les paramètres en début de session afin, d'une part, de pouvoir garantir la prise en compte de toutes les possibilités sans éliminer de procédés par manque d'informations et, d'autre part, d'homogénéiser et de simplifier la saisie des données par l'utilisateur afin qu'elle ne soit pas redondante.

Phase de définition des objectifs

La phase de définition des objectifs est la première étape dans la sélection des procédés de valorisation. Elle a pour but principal d'aider l'utilisateur à définir ce qu'il souhaite faire de ses effluents. Différentes possibilités lui sont proposées qui explicitent les objectifs des procédés afin qu'ils soient compréhensibles par les utilisateurs du logiciel. La réponse à ces questions va permettre de faire la correspondance avec

les objectifs des procédés et en sélectionner une certaine partie. La figure 2 donne un exemple de question posé à l'utilisateur.

Figure 2 : Écran de description des objectifs

La phase de présélection

Cette phase a pour objectif de faire une première sélection des procédés de valorisation applicables. Les applications que nous avons développées pour élaborer l'outil ont mis en évidence la nécessité d'approfondir la présélection en prenant en considération, outre les objectifs et les types de bain, d'autres paramètres tels que la fonction de traitement et les paramètres spécifiques aux fonctions de traitement (par exemple relargant ou dispersant dans le cas d'un bain de dégraissage). Cette présélection faite, nous pouvons passer à l'étape de sélection des procédés par les caractéristiques physico-chimiques.

La phase de sélection

Cette phase a pour objectif de sélectionner les procédés effectivement applicables sur des critères essentiellement physico-chimiques.

Par l'intermédiaire des règles de sélection découlant du raisonnement des experts qui permettent de confronter les paramètres de description de l'effluent et ceux d'utilisation des procédés, il est possible d'établir une liste de techniques de valorisation applicables. À partir de l'adaptabilité des différents paramètres, l'outil attribue une note à chaque procédé (0, 1, 2). Les procédés sont ainsi classés par ordre d'applicabilité (0 : non applicable, 1 : nécessite des adaptations, 2 : applicable).

Finalisation de la sélection

La finalisation de la sélection est laissée à l'attention des utilisateurs qui garderont ainsi une certaine liberté de choix

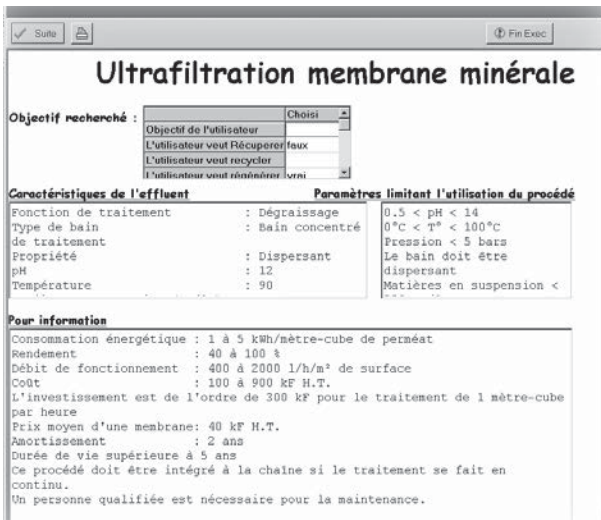


Figure 3 : Fiche résultat de l'outil 3R-ETS

du procédé de valorisation applicable. Elle prend en compte tous les critères tels que les contraintes de structures, de personnels et économiques. La figure 3 représente une fiche récapitulative type d'un procédé de valorisation retenu. Elle permet aux utilisateurs de visualiser, d'une part, l'ensemble

des informations concernant la sélection du procédé (paramètres de l'effluent et paramètres limitants) et, d'autre part, toutes les informations nécessaires à la sélection finale (coûts, durée de vie, contraintes de personnel, etc.)

CONCLUSION

La méthode de sélection que nous venons de décrire, schématisée sur la figure 4, permet d'établir une liste de procédés de valorisation applicables à un effluent en tenant compte des exigences de l'utilisation concernant ses objectifs et ses contraintes techniques et économiques. La mise en œuvre de cette méthode fait appel à un nombre important de données et de notions concernant d'une part les procédés de valorisation et, d'autre part, l'outil industriel. Le logiciel 3R-ETS que nous avons développé à partir de la méthode permet de gérer la variabilité des informations, le nombre de paramètres mais aussi de réduire le temps nécessaire à l'établissement d'une solution.

* **Valérie Laforest, Bruno Debray, Jacques Bourgois**
ENSM.SE - Centre Site - 158, cours Fauriel - 42023 Saint-Etienne cedex 2

** **Didier Grange,**
USF Astre - ZI avenue Beaunier - BP 42 - 42161 Andrézieux Bouthéon cedex

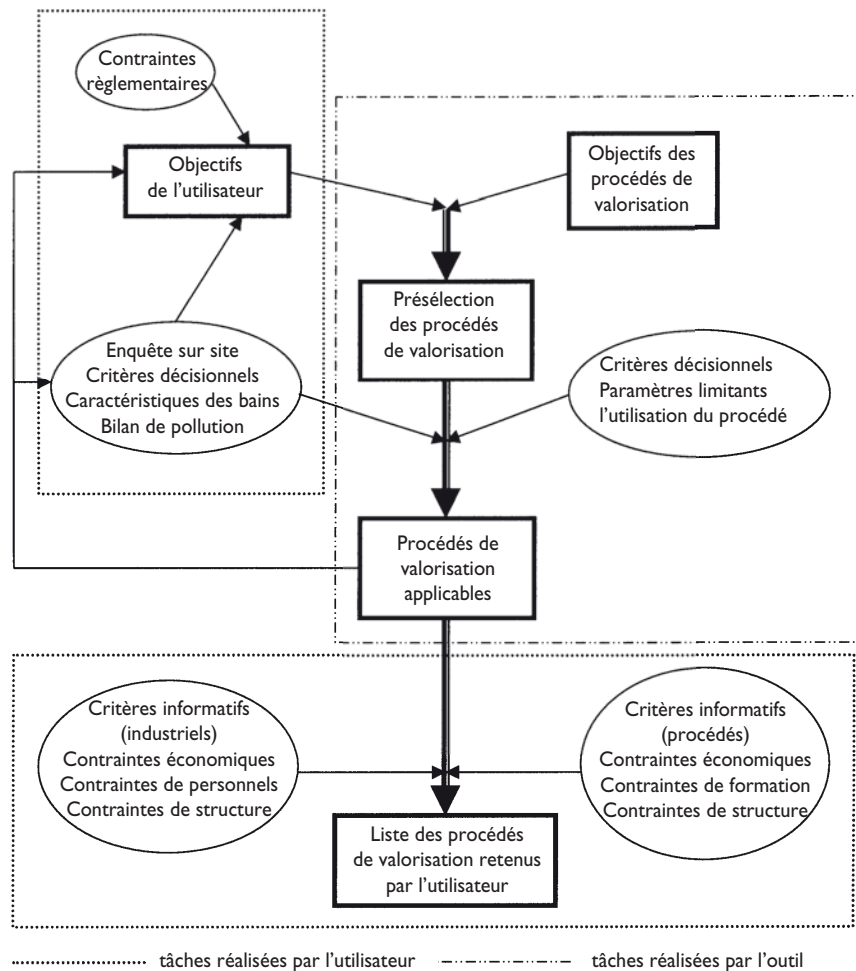


Figure 4 : Méthode de choix des procédés de valorisation des effluents industriels issus des ateliers de traitement de surface

Bibliographie

[arrêté 85] Arrêté du 26 septembre 1985, Ateliers de traitement de surface, J.O. du 16 novembre 1985.

[Laforest, 1999] Laforest V., Debray B., Bourgois J., « Méthode de réduction des rejets aqueux des ateliers de traitement de surface », *Déchets, Sciences & Techniques*, n° 13, 1^{er} trimestre 1999, pp 41-45.

[Laforest, 1999 (2)] Laforest, V. (1999), *Technologies propres. Méthodes de minimisation des rejets et de choix des procédés de valorisation des effluents. Application aux ateliers de traitement de surface*, Thèse de Doctorat en Sciences et Techniques du Déchet, ENSM.SE – Insa de Lyon, 280 p.

[Maes, 1996] Maes M., *Technologies propres et sobres – l'économie émergente*, Ed. Pierre Johanet et fils, oct.96, 348p.

[ONUDI, 1997] *Une production industrielle plus propre et plus sûre : le programme des centres nationaux pour une production plus propre*, Organisation des Nations Unies pour le Développement Industriel (Onudi), 1997, 15p.

[Rigaud, 1998] Rigaud J., Girard L.-M., *Traitement de surface, Épuraton des eaux*, Éditions SITS, 1998, 278 p.