

ETUDE DE FAISABILITE

VALORISATION DES EAUX DE LAVAGE DE LA LAINE DES
PYRÉNÉES

août 2020

Table des matières

1	Introduction.....	4
1.1	Quel lavage de laine pour quel(s) marché(s) ?.....	4
1.2	Le traitement des effluents.....	5
2	Description des constituants des eaux de lavage et paramètres influant sur leur composition.....	5
2.1	Composition de la toison.....	5
2.2	Composition chimique et caractéristiques physiques de la graisse de laine et du suint.....	8
2.2.1	La graisse de laine.....	8
2.2.2	Le suint.....	9
2.2.3	La contamination microbienne.....	10
2.3	Attentes du lavage de la laine.....	10
3	Les modes de lavage de la laine.....	11
3.1	Les principes de lavage.....	12
3.2	Le lavage par solvant.....	12
3.3	Le lavage par saponification et émulsion.....	12
3.3.1	L'impact environnemental.....	13
3.3.2	Les détergents.....	15
	La saponification.....	15
	Les détergents synthétiques.....	15
	Le lavage au suint.....	16
3.3.3	Consommation d'eau et d'énergie.....	16
3.3.4	Pollution des rejets.....	17
	Déchets ou sous-produits.....	19
4	Aspects réglementaires.....	20
4.1	Les installations classées pour la protection de l'environnement.....	20
4.1.1	Le cadre réglementaire des Installations Classées Pour l'Environnement ICPE.....	21
4.1.2	Présentation des BREFs et MTD.....	22
4.1.3	Les BREFs.....	22
4.1.4	Les MTDs.....	22
4.1.5	Révision des BREF et MTD TEXTILE.....	23
4.1.6	Consulter le BREF Textile.....	23
4.2	Les redevances pour pollution de l'eau d'origine non domestique et prélèvement sur les ressources en eau.....	24
4.3	Demande d'agrément d'un lavage de laine en suint.....	25
5	Adapter le lavage à son environnement.....	25
5.1	Acquérir une vision étendue du lavage de la laine.....	25
5.2	Les catégories de lavage de laine.....	26
5.2.1	Notions de traitement des eaux.....	26
5.2.2	Lavage de plusieurs tonnes/jour – plusieurs milliers de tonnes /an.....	28
5.2.3	Moins de 200t en suint/an, hors catégorie IED ?.....	31
5.2.4	Les lavages d'une capacité inférieure à 500 kg/jour.....	32
	L'exemple du lavage de Souvigny (03).....	33
	Les équipements de lavage.....	33
6	Analyse des voies de valorisation potentielles.....	35
6.1	l'extraction de la lanoline.....	35
	Principe de fonctionnement.....	36
	Incidence de la nature des laines.....	37
	Graisse résiduelle dans les effluents après centrifugation.....	39
	Pollution résiduelle.....	39

Traitement après extraction de la graisse de laine et épuration des bains.....	39
Approche économique.....	40
Le cas de Traitex.....	43
6.2 La méthanisation.....	43
Le lagunage anaérobie.....	43
digesteur anaérobie.....	44
Traitement des effluents et production de biogaz pour un lavage de 90t/an.....	45
6.3 Le compostage et l'épandage.....	45
6.3.1 le compostage.....	45
6.3.2 Épandage.....	48
7 Conclusions et alternatives.....	49
7.1 Lavage par solvant.....	49
7.1.1 Quels avantages ?.....	50
7.1.2 Quelques procédés.....	50
7.1.3 Lavage par solvant et IED.....	51
Wool Dry Scouring.....	52
Incidence de la nature des laines traitées.....	53
Pesticides.....	53
Données concernant le projet.....	54
7.2 Un lavage biologique.....	54
8 Annexes.....	56

1 Introduction

Le projet ORHI vise à contribuer à l'évolution du secteur agroalimentaire du territoire POCTEFA vers une Économie Circulaire en promouvant des Synergies inter-entreprises, en identifiant des solutions innovantes, et en soutenant leur développement sur le territoire. ORHI se centre sur les ressources « matière organique » et « plastique » de la chaîne de valeur agroalimentaire. Dans le cadre de l'accompagnement d'un projet, cette étude a pour objectif d'évaluer la faisabilité et l'opportunité de valoriser les eaux de lavage des laines « rustiques » des Pyrénées (races Manex, Tête rousse, Basco-béarnaise, Tête noire, Latxa).

1.1 Quel lavage de laine pour quel(s) marché(s) ?

La question du lavage local de la laine prend son sens dans la valorisation de laines locales. Cette activité revêt toutefois des réalités très différentes sous la même appellation. Prenons quelques exemples :

- La filature cent-cinquantenaire de Niaux en Ariège dispose de son propre lavage de laine de petite capacité (100 kg de laine lavée/jour, quelques jours par mois) suffisant à ses propres besoins. La ligne de lavage ne pourrait toutefois pas constituer un modèle reproductible pour une nouvelle installation à laquelle s'appliquerait pleinement la réglementation actuelle.
- les lavages en continu de Saugues en Haute Loire (1t de laine lavée /jour) ou [Traitex en Belgique, près de Liège](#) (18 t de laine lavée /jour) sont adaptés au lavage à façon des laines européennes (laines grossières et colorées par exemple) en respectant la législation actuelle. Toutefois, alors que les capacités de lavage globales offertes en France et en Europe sont très inférieures aux quantités de laines produites dans nos régions d'élevage, ces 2 lavages ne fonctionnent qu'à 50 % de leur capacité, faute de demande supérieure.

La productivité des installations de lavage détermine largement le coût de lavage, par une plus grande rationalité du process, plus efficient en eau et en énergie sur les grandes installations modernes. Sur un marché mondial comme celui de la laine, les installations bénéficiant des capacités de lavage les plus élevées et les plus modernes sont situées à l'autre bout du monde. Elles disposent souvent également des exigences environnementales et des coûts de main d'œuvre les plus bas. L'incidence du transport maritime en container est très faible.

Rien de surprenant donc à ce que même sur des marchés récents basés sur des valeurs écologiques et de notions de développement durable comme ce fut le cas pour le marché de l'isolation des maisons en laine de mouton, la production industrielle ait évolué rapidement de la transformation vertueuse de laines locales lavées localement, vers des productions pour part ou en totalité réalisées à partir de laines dont la provenance et le lieu de lavage importent peu, pourvu que le prix matière en soit réduit. Le commerce mondial de balles de laine lavée et l'offre en laine recyclée (litterie) facilitent cette approche. L'argument « laine locale » et « soutien aux éleveurs » n'en est même pas affecté, pourvu qu'on y incorpore en mélange une part de laines locales !

Les capacités de lavage industriel étaient estimées en France à près de 10 000 t et à de 12 000 t de laine lavée en Espagne en 1995. Elles ne sont plus que de l'ordre de 200 t aujourd'hui en France. Plusieurs récents projets de maintien ou de relance des capacités de lavage ont échoué, faute d'ancrage solide des bénéficiaires. [Le lavage-peignage de La Môle acquit ainsi une station de traitement des eaux](#) qui ne fonctionna en tout et pour tout que moins d'un mois. [Le lavage industriel de Sisteron](#) projeté sur le marché de l'isolation écologique ne vit jamais le jour.

Face à la raréfaction des lieux de lavage en France et en Europe, préoccupante pour les filières de transformation de laine en lien avec leurs territoires d'élevage, la rencontre européenne sur le lavage de la laine en 2015 à Saugues (43) permet de faire un état des lieux de la complexité des facteurs concourant à la disparition des capacités de lavage dans toute l'Europe. Elle permet d'aborder tous les aspects de cette activité, à une échelle artisanale, amateur ou dans sa plus grande dimension industrielle.

Ce fut également le point de départ pour le déplacement et la modernisation de la [colonne de lavage de Saugues](#) afin de l'adapter en tous points aux exigences réglementaires actuelles.¹

1.2 Le traitement des effluents

Par principe, le lavage de la laine est une opération visant à séparer la fibre des constituants sécrétés par le mouton, le suint, les souillures et matières végétales ou autres emprisonnée dans la toison ainsi que des composés chimiques issus de l'élevage. Il s'agit d'une préparation de la fibre nécessaire avant une transformation ultérieure.

Il existe plusieurs principes de lavage mais le lavage par bain requérant des quantités d'eau et d'énergie importantes pour chauffer l'eau constitue le mode pratiqué quasiment universellement, qu'il s'agisse de laver quelques centaines de gramme de laine dans des seaux, quelques kg dans une machine à laver ou quelques tonnes dans une ligne de lavage en continu.

Les effluents produits dans les bacs de lavage, même s'ils sont majoritairement d'origine naturelle, représentent une lourde charge de pollution potentielle pour l'environnement dans une approche industrielle. C'est la raison pour laquelle le lavage de laine est strictement encadré par la réglementation européenne dès lors que les capacités de lavage excèdent 500 kg/jour.

L'empreinte écologique d'un lavage de laine à son environnement pourrait reposer d'une part sur l'évaluation des ressources en eau et en énergie qui lui sont nécessaires et d'autre part à la nature et la quantité de ses rejets. On pourra alors évaluer la capacité de l'environnement à fournir les ressources nécessaires et à assimiler les rejets produits, avec ou sans traitement sur site.

2 Description des constituants des eaux de lavage et paramètres influant sur leur composition

Le mode de lavage classique est basé sur la dissolution du suint et en particulier de la graisse de laine dans l'eau, gros producteur d'effluents difficiles à traiter.

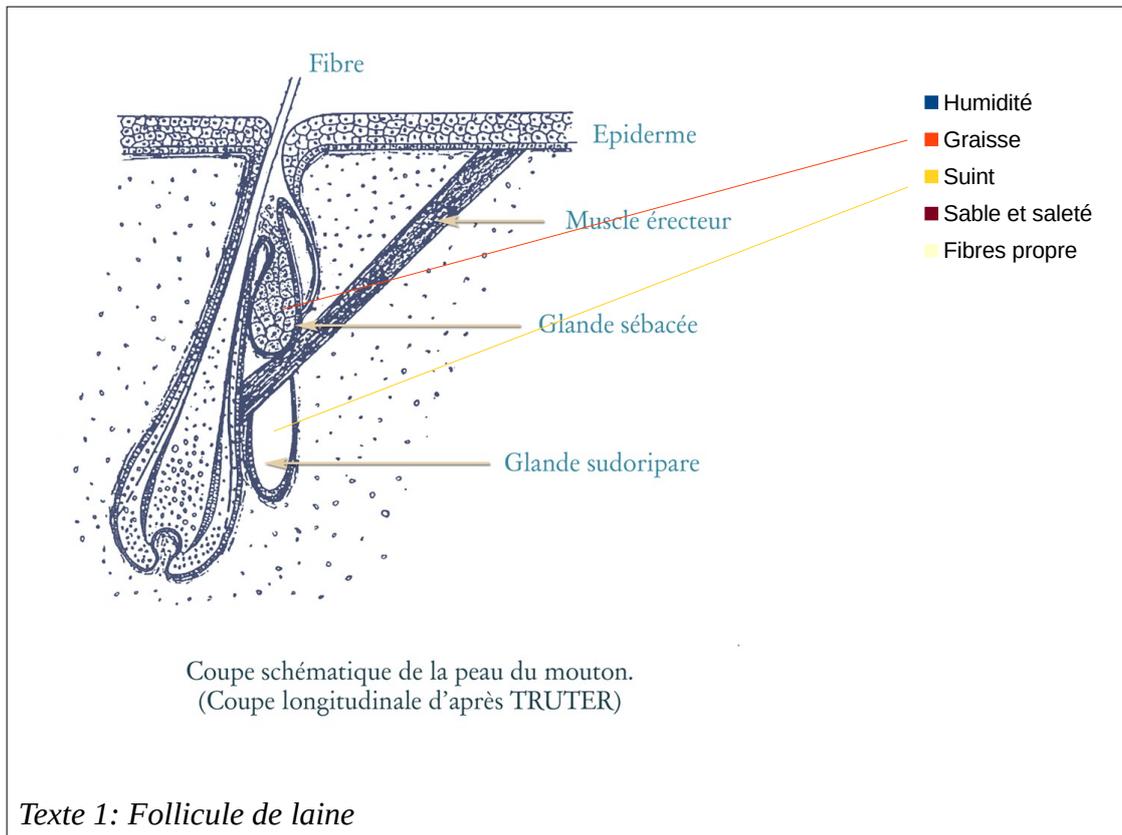
En premier lieu, nous ferons un état des constituants de la toison et de leurs propriétés physiques. L'on pourra ainsi comprendre ce qu'il se passe au cours du lavage classique (indifféremment des volumes traités), les paramètres indispensables à son bon déroulement et la nature et la charge de pollution des effluents produits dans les bains de lavage et de rinçage.

2.1 Composition de la toison

Le lavage de la laine constitue la première étape dans le processus de transformation de la laine. Cette opération, combinant de nombreuses techniques, vise à écarter toute matière ou substance présente dans la toison de l'animal, en causant le moins de dommages possibles à la fibre de laine.

Les impuretés présentes dans la toison peuvent être considérées selon 3 catégories, **sécrétées naturellement par l'animal, acquises et appliquées**.

- **Les sécrétions naturelles** consistent en la graisse de laine et le suint. Elles sont produites par les glandes sébacées et sudoripares associées à la poussée de la fibre dans le follicule. La graisse de laine gaine la fibre et la protège. En réalité, on distingue techniquement le suint et la graisse de laine non par l'origine des sécrétions mais par leur solubilité dans l'eau. Le suint représente la part des sécrétions spontanément soluble dans l'eau, la graisse de laine la part insoluble. Le suint sèche sur la peau et la laine. La graisse de laine agglutine les impuretés dans la toison.



- **les souillures de la toison résultant des conditions d'élevage** et de tonte : matières végétales et minérales, paille, foin, matières fécales, terre, sable, poussière. Certaines parties de la toison particulièrement souillées peuvent avoir été écartées par une opération de tri préalable à l'opération de lavage, lors du chantier de tonte par exemple. Les particules végétales et minérales qui ne sont pas agglutinées ou emprisonnées dans les fibres sont éliminées par procédé sec, par battage, avant le processus par bains. Toutefois, les matières végétales prises dans les fibres résisteront au battage et au lavage. Des batteurs et des tamis pourront encore en éliminer de la laine sèche mais c'est parfois insuffisant, notamment pour des laines destinées à la filature. Certains lots de laine justifient le recours à une opération complexe et couteuse de lavage-carbonisage, processus chimique d'élimination des matières végétales ou à une épuration mécanique « open-top » avant d'être introduits dans un processus de filature cardée.

- **les substances appliquées** lors la conduite de l'élevage telles que les marques de peinture d'identification, des résidus d'insecticides, d'acaricides ou de régulateurs de croissance d'insectes qui sont utilisés en tant que remèdes vétérinaires pour protéger le mouton contre les ectoparasites tels que les poux, acariens, mouches bleues, etc. Ces traitements, présents en tant que traces, sont très difficiles à séparer des autres contaminants et à éliminer. Ils déprécient les laines et matières contaminées du fait de leur toxicité environnementale avérée ou soupçonnée.

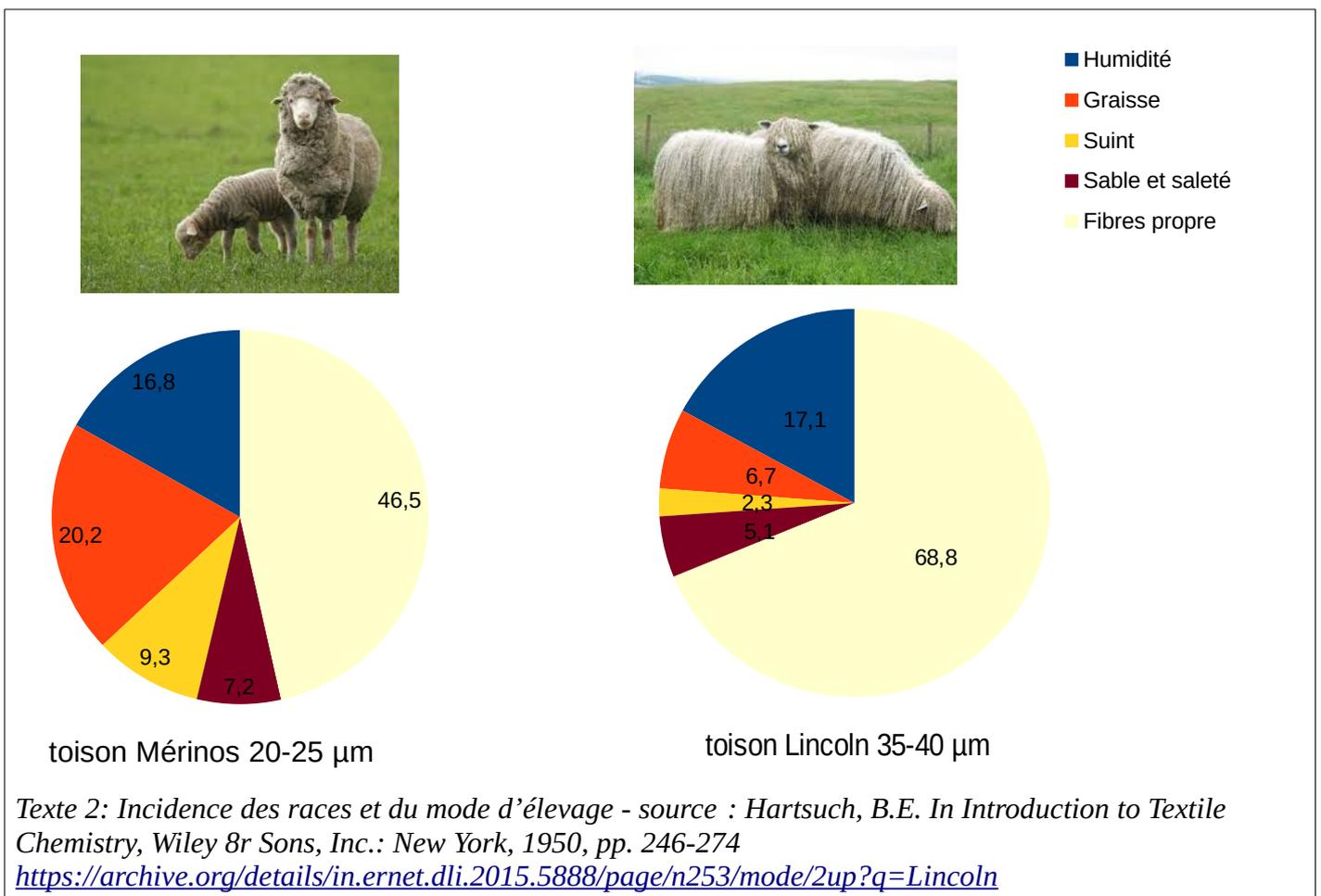
- Pour être complet, la laine possède une forte affinité à l'eau, qui se traduit par une part d'humidité dans la toison, variable selon l'hygrométrie ambiante. Elle représente typiquement de 10 à 20 % du poids de la toison.

Variations selon les races de moutons

La part relative des composés de la toison est variable selon les conditions d'élevage et tout particulièrement selon la race des moutons.

Graisse de laine 2 à 25 % de la laine brute
 Suint (sueur séchée) 2 à 12 % en poids de la laine brute
 Salissures 5 à 45 % en poids de la laine brute

La teneur en fibres propres de la laine brute est habituellement de l'ordre de 60 à 80 %, mais peut varier de 40 à 90 % (source BREF textile page 61).



Les ratios de graisse et de suint varient typiquement avec la finesse des laines, caractéristique dépendant essentiellement de la race. Des laines fines ont une densité folliculaire très élevée et de ce fait des sécrétions folliculaires plus abondantesⁱⁱ. Le suint représente environ 7 à 8% du poids de la toison dans les laines grossières, un taux plus élevé que les laines fines. Les laines de la race mérinos (finesse ou diamètre des fibres 20 à 25 µm), principalement utilisée dans l'habillement, sont plus chargées en graisse, généralement 13 %, que des laines grossières du type de celles employées pour les tapis qui contiennent en moyenne environ 5 % de graisse, comme ici la race Lincoln (finesse 35-40 µm)

C'est encore vrai pour les laines pyrénéennes, dont la teneur en fibres propres dans une toison, ce qu'on appelle le rendement au lavage, est de l'ordre de 65-70 % (Manex, Basco-béarnaise) pour une finesse de laine de

l'ordre de 40 μm^{iii} . Elles figurent parmi les laines à tapis et sont peu grasses comme les laines de la race Lincoln présentée ci-dessus.

Le mode d'élevage, en plein air ou en bergerie, aura également une incidence sur le rendement des laines au lavage. En effet, les troupeaux de bergerie, du fait de la température dans les locaux d'une part, de la protection aux intempéries dont ils bénéficient d'autre part, épargnés des intempéries et ainsi du « lessivage » des toisons de leurs souillures et composés solubles, auront des laines plus chargées en sécrétions en suint et en graisse de laine. Par exemple, les laines Lacaune, d'une finesse de 28-30 μm , peuvent être classées à la collecte selon les catégories « bergerie », « plein-air » ou « semi-plein-air » avec des rendements estimés après lavage (ratio de fibres propres après lavage) respectivement de 35-40 %, 40-45 % et 50-55 %. (^{iv}source Jean Rouanet)

Les variations de rendement seront d'autant plus importantes que les laines seront plus fines et naturellement plus grasses, ce qui n'est pas caractéristique des laines des Pyrénées que nous étudions.

Il s'agit là d'un critère de négociation des laines collectées auprès des éleveurs qui trouve là sa justification. Un bon rendement est bénéfique pour le transformateur qui y verra une réduction des quantités de laine brute nécessaire à une même production. En matière de gestion des déchets de lavage, cela signifie également moins de matières à éliminer d'un lot de laine au cours du lavage pour une même quantité de laine propre obtenue en sortie de lavage.

2.2 Composition chimique et caractéristiques physiques de la graisse de laine et du suint^v

2.2.1 La graisse de laine

Lorsqu'elle est extraite des bains de lavage, elle a une couleur jaune sale et une odeur de mouton. La graisse de laine brute doit être raffinée pour le moindre usage dans ses différents domaines d'application. Purifiée, elle est connue sous le nom de lanoline. Son point de fusion est à 35-40 °C. Elle est insoluble dans l'eau, mais peut être facilement émulsifiée avec de l'eau chaude et un détergent pour faciliter sa séparation de la fibre.

Elle est soluble dans des solvants organiques apolaires, tels que le dichlorométhane ou l'hexane. La graisse de laine (techniquement c'est en fait une cire) est un ester d'acides gras de haut poids moléculaire. Les alcools sont des stérols, alcools de triterpènes et alcools de cire. Le composé principal (cholestérol $\text{C}_{27}\text{H}_{45}\text{OH}$) représente 30-40 % de la partie insaponifiable de la graisse de laine. La part saponifiable contient les esters d'acides gras saturés tels que des acides cérotiques, acides stéariques et palmitiques, avec de petites quantités d'acides gras libres.

La lanoline

La lanoline est d'une couleur jaune pâle, d'une consistance cireuse aux propriétés émoullissantes (adoucissantes). Elle fond à 36 – 42°C. Elle est insoluble dans l'eau mais peut être mélangée sans séparation à deux fois son poids d'eau, est légèrement soluble dans l'alcool chaud et facilement soluble dans l'éther et le chloroforme. Elle se mélange et se combine bien avec pratiquement tous les autres produits cosmétiques et pharmaceutiques en raison des fortes propriétés émulsifiantes et pénétrantes de la lanoline. Sa propriété adhésive en fait un excellent candidat pour une utilisation comme plastifiant dans les adhésifs et les résines. Outre leur utilisation dans les industries cosmétiques et pharmaceutiques, les dérivés de la lanoline sont couramment utilisés dans de nombreux secteurs industriels, tels que les plastiques, les lubrifiants, les huiles textiles, le béton, les peintures et les encres.^{vi} La lanoline peut être saponifiée pour produire des acides gras de laine et des alcools de laine qui peuvent servir de source de cholestérol pouvant être utilisé comme matière première pour la production de vitamine D.

La société Stella en Belgique à Mouscron, tout près de Tourcoing, est l'un de ces raffineurs spécialisés dans la chimie de la graisse de laine. [En savoir plus](#)

2.2.2 Le suint

Le suint est le constituant de la toison soluble dans l'eau. Le suint se forme lorsque la transpiration sèche sur la fibre et, contrairement à la teneur élevée en sodium de la sueur humaine, se compose principalement de sels potassiques d'acides gras et de peptides (Truter, 1956; Hoare et Stewart, 1971). Il contient également d'autres métaux, des matières inorganiques se présentant sous forme de sels principalement d'acides organiques solubles dans l'eau, des peptides sécrétés ou dérivés de la laine, des composants hydrosolubles ou facilement émulsifiés, des sécrétions des glandes sébacées et des substances solubles provenant de contaminants tels que la saleté et de matière végétale, d'urée et matières colorantes. La teneur en potassium du suint est d'environ 25 à 30% et ne varie pas de façon significative entre les races, représentant 90% des cations présents (Stewart, 1988; Bateup et al., 1996). Le suint comprendra un certain nombre de substances qui ne peuvent être considérées comme de véritables produits physiologiques, tels que les composés produits par la dégradation photochimique de la fibre et les sécrétions glandulaires modifiées par des réactions photochimiques. Les solutions de suint étant d'excellents milieux pour le développement de bactéries et de champignons, il y aura également des produits de métabolismes microbiens dans les solutions macérées (Stewart, 1988).

C'est le suint qui donne à la toison son odeur puissante de mouton. La lanaurine, un pigment biliaire, lui donne sa couleur caractéristique brun-rouge.

Les sels solubles d'acides carboxyliques représentent 65 % des constituants du suint. La partie acide organique inclut des acides formiques, acétiques, propioniques, butyriques, valériques, oxaliques, succiniques, glutariques*, maliques, glycoliques, citriques* et autres. Certains des composés organiques isolés du suint sont cités en annexes. Le principal élément minéral est le potassium comprenant 60% du résidu de suint calciné. 8

Le suint est soluble dans des solvants polaires, tels que l'eau et l'alcool. Son pH varie de 5,5 à 8,4 pour les laines mérinos et de 6,9 à 10,0 pour les laines croisées.

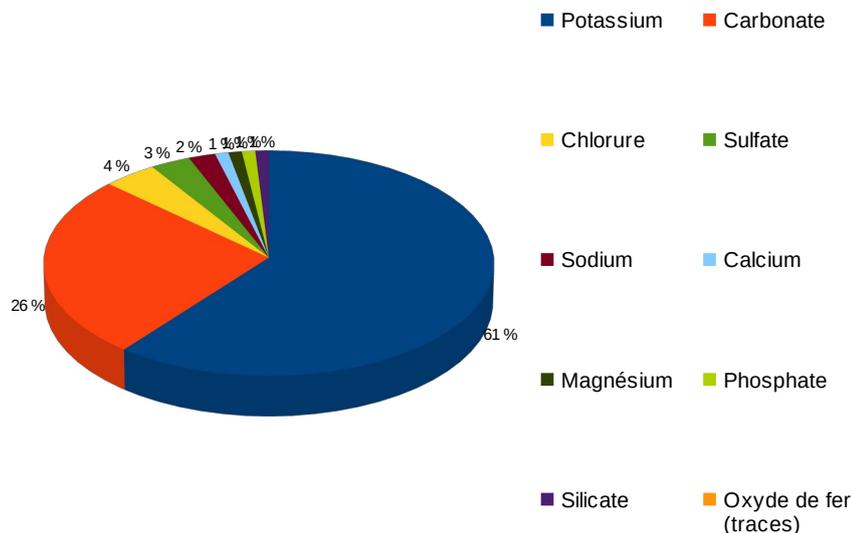


Figure 1: composition du suint après calcination

2.2.3 La contamination microbienne

La laine en tant que toison sur le mouton, au cours des nombreuses étapes de fabrication et à l'usage, est soumise continuellement à la contamination par des microorganismes. Cette flore bactérienne peut comporter des organismes pathogènes, tout comme des bactéries non pathogènes, capables de se multiplier rapidement dans des conditions favorables. Le problème devient visible lorsque la laine développe une teinte de moisissure qui peut accompagner de perte de résistance ou d'autres formes de dégradation. La moisissure se formera dans le stockage de laine quand les balles deviennent humides. Le tableau ci-dessous présente les quantités comparées en moisissures et en bactéries présentes dans la laine humide et sèche.^{vii}

Tableau 1: Numération des bactéries et moisissures par gramme de laine ^{viii}

	Laine brute	Laine battue	Laine lavée humide	Laine lavée sèche
Moisissures	2 700	36 000	300	300
Tous types de bactéries	1 200 000	17 000 000	65 000 000	3 400 000
Spores de bactéries	190 000	210 000	100 000	110 000

Le battage diffuse les moisissures et bactéries et il en résulte une répartition plus large des spores à la surface des fibres. Dans le cas des moisissures, le dégraissage élimine sensiblement la majeure partie du contaminant; mais conduit à une numération en bactéries plus élevée en raison de la redistribution sur une plus grande surface. Seul un lavage suivi d'un séchage à la chaleur a été efficace pour inactiver la contamination bactérienne. On a révélé que dans les lavages de laine modernes à détergents éthoxylates à 65°C, la plupart des organismes sont tués avant qu'ils n'atteignent le bain de peroxyde (eau oxygénée utilisée pour blanchir les laines)²⁰. Grâce au processus de séchage, le nombre total de bactéries de tous types est passé de 65 000 000 à 3 400 000. Cela suggère que le chauffage de la fibre pour le séchage a agi comme une pasteurisation et a inactivé les formes végétatives les moins résistantes à la chaleur.

Dans le Tableau 2 on a relevé dans des études conduites en stockage simulé, le nombre moyen de bactéries et champignons dans 30 laines lavées, avant et après stockage.

Tableau 2: Nombre de Micro-organismes sur laine lavée (Nombre moyen / gramme²¹)

	Avant de stockage	Après stockage
Bactéries	$10^3 - 10^4$	10^9
Champignons	$<10^2$	10^2

Dans des conditions favorables, la présence de plus de 10^4 et 10^3 bactéries par gramme de laine peut provoquer la biodégradation de la laine alors que les dommages causés par une attaque fongique étaient moins aigus.

2.3 Attentes du lavage de la laine

Le lavage de la laine constitue l'opération de préparation des fibres de laine indispensable avant toute transformation industrielle. En anglais on utilise le terme « wool scouring » signifiant « récurer la laine », plus évocateur de l'intensité des multiples taches conduisant à libérer les fibres de l'ensemble des contaminants dont nous venons de faire l'inventaire précédemment. Les lots de laine lavée sont éventuellement contrôlés selon des standards internationaux afin d'évaluer les teneurs résiduelles en matière minérale, matière végétale et en graisse.

Selon les exigences de transformation dans les filatures, cardes et peignages modernes, la laine lavée avec une teneur en graisse résiduelle comprise entre 0,4 et 1 % est généralement considérée comme optimale. (BREF page 347)

Toutefois, les seuils de « décontamination » des fibres sont variables selon la destination du lot de laine lavée :

- des laines destinées à la matelasserie traditionnelle s'accommoderont par exemple d'un taux de gras résiduel dans la laine lavée plus élevé (2–4% source Jean Rouanet^{ix}) que si elles sont destinées au textile ou à l'industrie du non-tissé. Les fileuses au rouet ou les filatures anciennes sont tolérantes sur le taux de gras des laines, offrant plus de douceur et facilitant alors le filage. Au contraire, les cadences élevées des filatures modernes s'associent à de plus grandes exigences quant à l'homogénéité des caractéristiques d'un lot de laine et à un faible niveau de gras résiduel. Le standard international des laines lavées à fond répond à cette demande.

- Le matelassier portera une importance toute particulière à l'odeur de la laine lavée dépendant du processus de lavage, mais aussi à la résilience (le ressort, le gonflant) des laines, éventuellement affectée par le battage intensif des laines pour en extraire les particules végétales et minérales.

- les matières textiles les plus nobles ne toléreront pas la contamination du lot de laine lavée avec des matières végétales résiduelle ou avec des fibres provenant d'un lot lavé précédemment, malgré le soin apporté aux nettoyage des équipements entre deux lots de laine successifs. On peut par exemple imaginer comment le soin apporté à constituer un lot de finesse ou de couleur homogène provenant de moutons mérinos ou d'une sélection de laines de races de couleur peut être affecté par une infime proportion de laine résiduaire provenant d'un lot antérieur. Ces fibres étrangères se retrouveront inmanquablement dans le produit fini. Le risque en est d'autant plus grand que la taille du lot à laver est modeste en regard des capacités de production des installations. Le transit entre deux lots consécutifs pour permettre le nettoyage et pour préserver l'intégrité des lots a de nombreuses incidences sur le coût du lavage (suspension de la production occasionnant consommation d'énergie pour maintenir la chaleur des bains et du séchoir et temps de travail supplémentaire).

3 Les modes de lavage de la laine

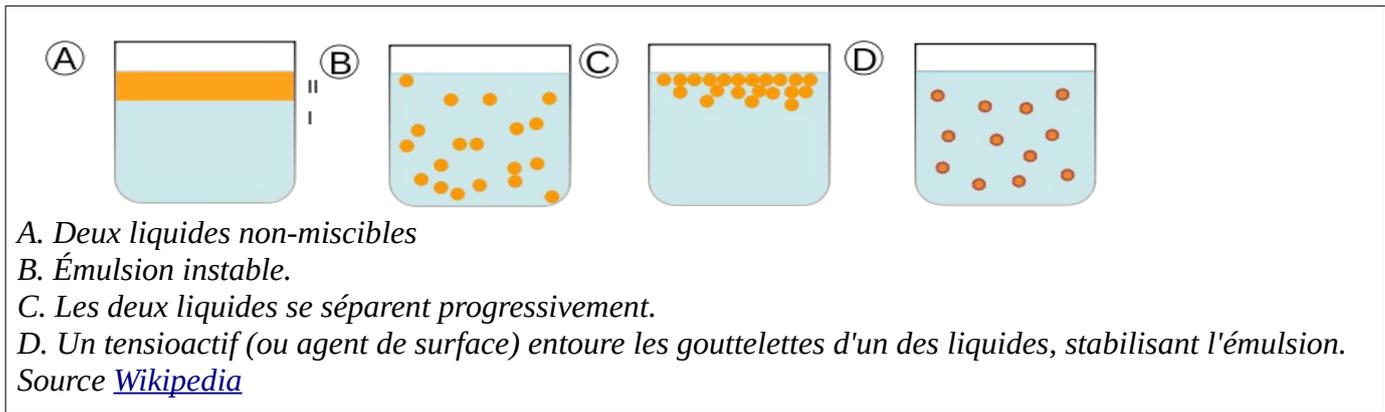
Pour comprendre l'élimination de la graisse de laine, il est important de noter que les huiles, les corps gras et les graisses:

- sont insolubles dans l'eau
- sont solubles dans des solvants organiques, tels que le white spirit.
- forment des émulsions lorsqu'elles sont secouées dans de l'eau contenant du savon ou un détergent. Une émulsion est la dispersion d'un liquide dans un autre. Par exemple, le lait est une émulsion

Ainsi, une huile, un corps gras ou une graisse peut être éliminée par l'une des méthodes suivantes:

- Transformation de l'huile, du corps gras ou de la graisse en savon à l'aide d'un alcali. C'est ce qu'on appelle la saponification. La matière grasse contenue dans l'huile ou la graisse est transformée en savon par l'action de l'alcali (mais en ce qui concerne la laine, trop d'alcali et/ou trop longtemps peut l'endommager).
- Émulsification avec du savon ou un autre agent tensioactif, tel qu'un détergent. L'émulsification signifie que la graisse est dispersée sous forme de micro-gouttelettes dans un autre liquide (Au cours du lavage de la laine, l'autre liquide est l'eau).
- Dissolution de l'huile, le corps gras ou la graisse avec un solvant organique.

[En savoir plus en 4 pages sur la saponification, les tensio-actifs ou détergents](#)



3.1 Les principes de lavage

Le lavage de la laine doit séparer les fibres non seulement de la graisse de laine, mais également du suint et de la saleté. Pour ce faire, le lavage de la laine utilise l'une des deux techniques, le lavage par solvant ou le lavage à l'eau :

- Le lavage par solvant élimine la graisse de laine par dissolution et tout à la fois le suint et les impuretés par dispersion.
- Le lavage à l'eau élimine la graisse de laine par saponification et/ou émulsification, le suint par dissolution et les impuretés par dispersion.

3.2 Le lavage par solvant

La technique de lavage par solvant a été expérimentée en différentes parties du monde à partir des années 1950 mais n'a pas connu un très grand succès.

Dans un lavage par solvant, le solvant dissout la graisse de laine efficacement, mais il est inefficace dans le retrait du suint, des saletés et des matières protéiniques. Cette opération nécessite un processus complémentaire pour leur élimination. Le dégraissage par solvant constitue une solution séduisante, permettant de récupérer la quasi-totalité de la graisse de laine des toisons et d'éviter le problème du traitement des effluents chargés de graisse de laine que l'on rencontre sur les lavages de laine conventionnels.^x Toutefois, selon la technique utilisée, le lavage par solvant est sujet à controverses quant à la qualité du lavage obtenu et du fait de la nocivité éventuelle pour la santé et l'environnement des émissions et résidus de solvants utilisés.^{xi xii}

Le nombre de lavages industriels basés sur le principe de dégraissage par solvant est infime à l'échelle mondiale. Il semble qu'il n'y en ait plus en Europe actuellement.

C'est pourtant une pratique standard en laboratoire afin de mesurer le taux de gras résiduel et séparer les autres contaminants dans des échantillons de laine lavée ou dans l'analyse d'échantillons de laine en suint (Soxhlet extraction).

3.3 Le lavage par saponification et émulsion

C'est le principe de lavage universel et intemporel, que l'on lave une toison dans sa baignoire (si si, ça se fait !) ou dans une ligne de lavage d'une capacité de 5 tonnes de laine en suint à l'heure. Il y a des constantes, quelque soit la capacité de lavage recherchée :

- le lavage comporte une phase de lavage, une phase de rinçage et éventuellement au préalable une phase de trempage.
- la température des bains : Le point de fusion de la graisse de laine se situe aux alentours de 40°C. La température de 40°C est donc la température minimale pour faire fondre et éliminer la graisse. Les détergents synthétiques non ioniques, s'il y a lieu, perdent en efficacité plus rapidement en-dessous de 60°C, les températures de lavage et de rinçage sont donc habituellement comprises entre 55 à 70°C. ^{xiii}
- par principe, les volumes d'eau nécessaires sont importants. Les installations traditionnelles nécessitent de grandes quantités d'eau et d'énergie. On relève des consommations d'eau de 20-30 l/kg de laine en suint^{xiv}, même si l'optimisation des lignes de lavage modernes permet des consommations nettes beaucoup plus faibles par le recyclage des bains. La dureté de l'eau doit être considérée selon le choix du détergent et la présence d'ions métalliques tel que le fer peut affecter la teinture de la laine lavée.
- la charge de pollution des effluents produits est élevée.

3.3.1 L'impact environnemental

Les principaux problèmes environnementaux associés à ce procédé de lavage de la laine sont dus aux rejets dans l'eau. Toutefois, les déchets solides, les boues produites et les émissions dans l'atmosphère doivent également être pris en considération.

Quelques notions à connaître :

Matière oxydable, Matière organique carbonée ou azotée (substance d'origine biologique) [MO] : Les matières oxydables constituent l'essentiel de la partie biodégradable de la pollution organique rejetée. Pour les éliminer, les bactéries présentes dans le milieu utilisent l'oxygène dissous dans l'eau. Des déversements importants de matière organique peuvent entraîner des déficits notables en oxygène dissous, perturbant ainsi l'équilibre biologique d'un cours d'eau.

Demande chimique en oxygène [DCO] : Consommation en oxygène par les oxydants chimiques forts pour oxyder les substances organiques et minérales de l'eau. La demande chimique en oxygène (DCO) permet d'évaluer la charge polluante des eaux usées.

Demande biologique en oxygène [DBO] : Quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder les matières organiques (biodégradables) par voie biologique (oxydation des matières organiques biodégradables par des bactéries). La demande biologique en oxygène (DBO) est un indice de pollution de l'eau qui permet d'évaluer la fraction biodégradable de la charge polluante carbonée des eaux usées, et est en général calculée au bout de 5 jours à 20°C et dans le noir : on parle alors de DBO5.

Matière en suspension [MES] : Particule solide, minérale ou organique, en suspension dans l'eau. L'eau apparaît trouble et colorée.

Equivalent habitant [EH] : Unité d'évaluation de la pollution organique des eaux représentant la quantité de matière organique rejetée par jour et par habitant. Cette unité de mesure permet de comparer facilement des flux de matières polluantes. Parmi les paramètres caractérisant une pollution, celle traitée dans les stations de traitement des eaux usées est quantifiée par l'équivalent-habitant. L'équivalent-habitant est défini, par l'article R2224-6 du Code général des collectivités territoriales, comme la charge organique biodégradable ayant une demande biochimique d'oxygène en cinq jours (DBO5) de 60 grammes d'oxygène par jour. (soit encore 135 g de la demande chimique en oxygène (DCO), 15 g d'azote total Kjeldahl (NTK) et 4 g de phosphore total dans une quantité quotidienne moyenne de 120 litres d'eau usée.

(Source : [Glossaire sur l'Eau et les Milieux Aquatiques](#))

Pour un lot de 1000 kg de laine grossière en suint, afin d'obtenir 700 kg de laine lavée, on estime que ce ne sont pas moins de 150 kg de saleté, 80 kg de suint et 50 kg de graisse qui seront libérées dans les eaux de lavage et de rinçage (BREF 2003, page 73).

L'élimination des contaminants présents dans la toison brute conduit au rejet d'effluents dont les principales sources de pollution sont :

- les substances organiques hautement concentrées en suspension et en solution, en même temps que la salissure (impuretés) en suspension,
- les micro-polluants provenant des médicaments vétérinaires administrés aux moutons pour les protéger contre les parasites externes. On retrouve également des détergents dans les effluents aqueux, qui contribuent à l'augmentation de la demande chimique en oxygène des effluents (DCO).

La charge de pollution organique potentielle occasionnée par le lavage de notre lot de 1000 kg de laine grossière en suint correspond à une quantité de DCO (Demande Chimique en Oxygène) de 315 kg dans les effluents (315 g DCO/kg de laine grossière en suint).¹ De tels effluents de lavage de laine correspondraient, selon l'unité utilisée en matière d'épuration des collectivités (unité équivalent-habitant EH), aux rejets domestiques de 2300 habitants. En conséquence,

Si aucune mesure n'est prise en amont pour réduire la quantité des rejets, un lavage d'une capacité de 1 tonne de laine grossière en suint/jour représente donc une menace environnementale par la seule teneur organique de ces effluents d'une pollution journalière équivalente à une population de 2 300 habitants.

De fait, le lavage de la laine représente potentiellement l'activité la plus polluante de l'ensemble de l'industrie textile.

Depuis les années 70, l'accroissement des considérations environnementales et des coûts de l'énergie a conduit les exploitants et les constructeurs d'équipements de lavage à prendre en compte à leur source les consommations en eau et énergie ainsi que la nature et la quantité des rejets et leur traitement. La question du traitement des eaux est aujourd'hui aussi fondamentale que l'activité de lavage de la laine en elle-même.

À titre d'exemple, le lavage de La Môle Industrie à Mazamet, d'une capacité de 10t laine lavée/jour, investit 1 million d'Euros en 2001 dans la construction d'une station de traitement des eaux, largement subventionnée par les collectivités locales, afin de se mettre en conformité avec la réglementation sur les installations classées selon la directive IPPC (La Môle Industrie cessa son activité en 2003, peu après la mise en exploitation de cette centrale de traitement).

Le Projet Alpes Provence Laine pour sa part, labellisé Pôle d'Excellence Rurale en 2011, projetait dans son dossier PER^{xv} 2010 un investissement de 480 000 € HT pour une colonne de lavage d'une capacité de 3t de laine en suint/jour et 360 000 € HT pour l'unité de traitement des effluents de lavage par évaporation/condensation.

¹ hypothèse retenue dans BREF TEXTILE 2003 - 4.10.10 Traitement des eaux usées générées par les installations de lavage de la laine pages 566-567 - Règle de calcul de la DCO théorique selon la teneur en contaminants de la toison page 73

3.3.2 Les détergents

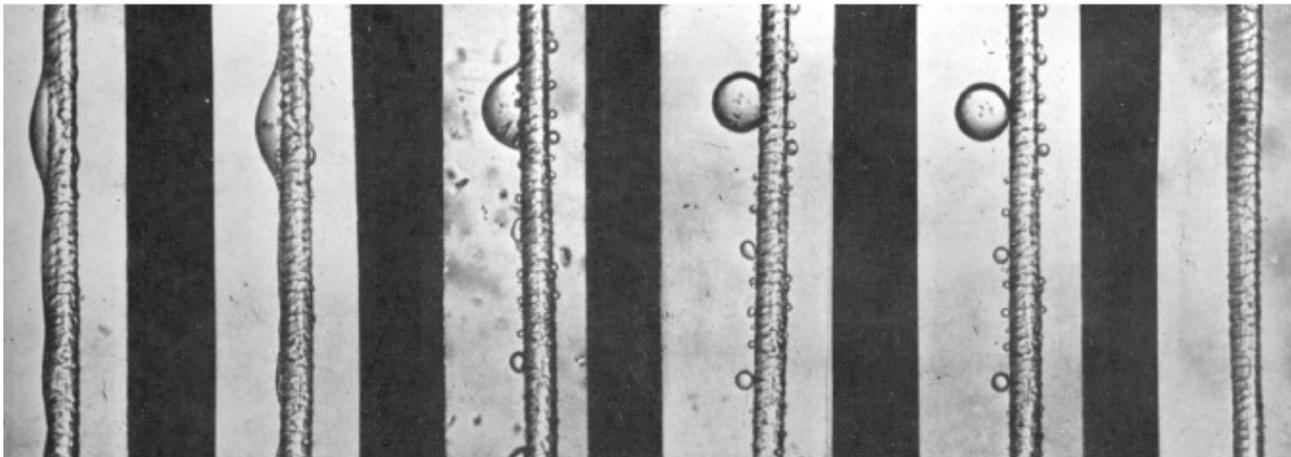


Figure 2: [processus de séparation du film de graisse de la fibre par l'action d'un détergent - Wood 2011-](#)

Le rôle des détergents/tensioactifs est de séparer les gouttelettes grasses de leur support - la fibre - afin de les mettre en solution par émulsion sous l'effet de l'agitation.

Afin d'obtenir l'émulsification de la graisse, les cuves de lavage reçoivent un détergent et souvent du carbonate de sodium ou d'autres alcalis, qui agissent en tant qu'adjuvants. Généralement les concentrations en détergent et en adjuvant sont les plus élevées dans la première cuve, et décroissent dans les cuves qui suivent.

Les tensio-actifs synthétiques non-ioniques constituent les détergents principalement utilisés par les laveurs de laine, à savoir les éthoxylates d'alcool.

(...) L'étape finale consiste à rincer la laine par un passage dans des cuves qui ne contiennent que de l'eau.^{xvi}

La saponification

Les lavages anciens pratiquent plus généralement le lavage par saponification, plus approprié semble-t-il aux laines croisées ou grossières. L'implantation des grands lavages de laine était alors fondée sur l'accès à une eau douce en quantités suffisantes, condition impérative pour ce principe de lavage, en raison de l'insolubilité des savons de calcium et de magnésium. Le recours aux détergents synthétiques à partir des années 60 a permis de s'affranchir de cette exigence en eau douce.

L'assistance d'un alcali, généralement du carbonate de soude, est nécessaire dans l'émulsification de la graisse de laine et de la saleté et pour réaliser une saponification partielle des acides gras libres de la graisse de laine avec formation de savons naturels. Il est nécessaire d'ajouter des quantités importantes de savon en complément aux savons naturels formés par saponification pendant le processus de lavage.

Le lavage de la laine avec du savon et des alcalis est un processus qui doit être entrepris avec un certain soin en raison de la sensibilité de la laine aux dommages causés par les alcalis.

La masse de saponification au cours du processus de lavage est fonction de la teneur en acides gras libres contenus dans la laine, variable selon la nature et l'origine de la laine.^{xvii}

L'émulsion ainsi obtenue est plus facile à déstabiliser par acidification afin de récupérer la graisse (*craquage à l'acide*) au cours du traitement des effluents que l'émulsion obtenue avec des détergents synthétiques.

Les détergents synthétiques

Ils sont actifs indépendamment de la dureté de l'eau. À l'origine, ils étaient anioniques et il a été constaté que l'alcali était encore nécessaire pour éviter une perte excessive de détergent par adsorption sur la laine.

L'introduction ultérieure de détergents non ioniques a supprimé cette contrainte et la laine a pu être lavée avec ces seuls détergents.

Le résultat de ce processus d'émulsification de la graisse (qui a lieu principalement à environ 60°C, au-dessus de la température de fusion de la laine de laine) est une dispersion extrêmement stable de graisse de laine et de saleté qui défie la plupart des méthodes conventionnelles de désémulsification et de séparation de phases. Cette stabilité de dispersion complique grandement les problèmes de traitement des effluents.^{xviii}

Certains détergents synthétiques ont été retirés en raison de leur faible biodégradabilité ou de leur toxicité pour l'environnement.^{xix xx}

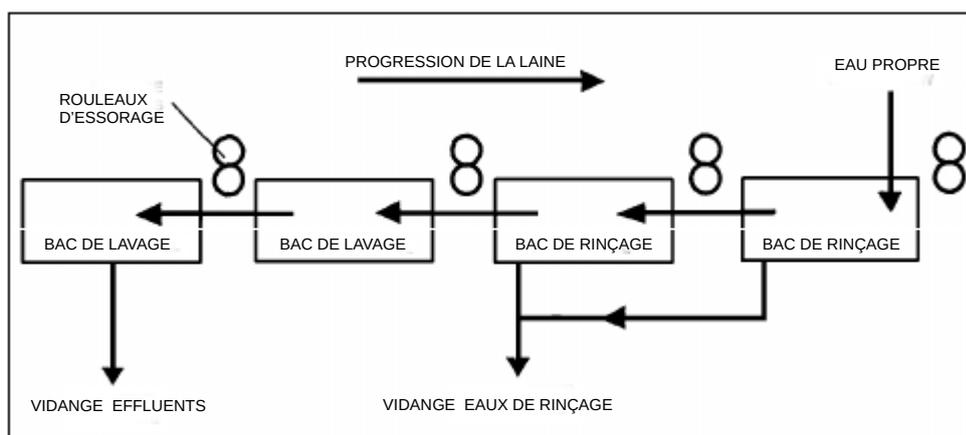
Le lavage au suint

Le suint en solution aqueuse offre des propriétés de détergence qui sont connues depuis très longtemps. En effet, les sels potassiques du suint réagissent avec d'autres composés des toisons et produisent des savons à pH naturel des eaux suintées, plus alcalines pour les laines croisées que pour les laines fines, permettant une action détergente douce sans autre additif. Cette action détergente du suint est à l'origine de procédés de lavage de laines grossières basés exclusivement sur ce principe (lavage au suint ou Duhamel - 1920) ou basés sur une combinaison de bain de lavage concentré en suint (pré-lavage) et de lavage par saponification classique ou émulsion (procédés Lo-Flo et Siroscour -1977).^{xxi xxii}

3.3.3 Consommation d'eau et d'énergie

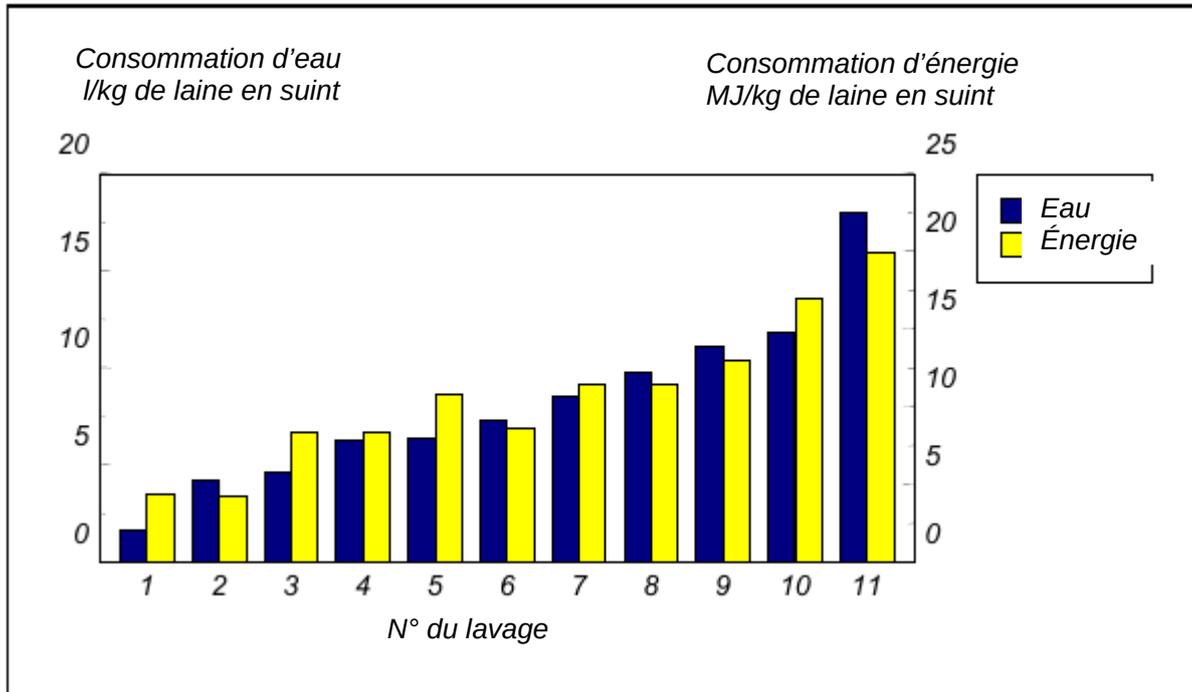
La consommation globale des installations est très variables selon l'efficacité des équipements et des détergents. On relève par exemple des volumes d'eau de rinçage 12 fois supérieurs aux volumes de lavage dans une unité industrielle en Nouvelle-Zélande disposant d'eau en abondance à faible coût et traitant des laines grossières à fort rendement. À l'opposé, un lavage de laines fines à faible rendement en Australie contraint à une gestion rigoureuse de l'eau parvient à réduire les quantités d'eau jusqu'à des volumes du même ordre au rinçage comme au lavage. (source Savage, 2002, ^{xxxvii}, page 14). Les bénéfices à la réduction de la consommation d'eau sont multiples :

- Par la recirculation de l'eau des bains les plus clairs (rinçage) vers les bains les plus chargés (lavage), combinée à la fonction de systèmes d'épuration en continu des bains par filtration, décantation, récupération de graisse, etc, les installations de lavage continues modernes permettent de réduire énormément le renouvellement des bains et donc la prise d'eau au réseau (faible consommation *nette* d'eau).
- Le recyclage de l'eau et de la chaleur des bains grâce à ces dispositifs d'épuration intégrés au processus permet de réduire la consommation énergétique en diminuant d'autant l'entrée d'eau froide provenant du réseau.
- Le volume des effluents est de ce fait également réduit.



Dessin 1: BREF page 69 Système conventionnel de lavage de la laine [8, Danish EPA, 1997]

La courbe suivante révèle la corrélation entre la consommation en eau et en énergie. L'essentiel de l'énergie consommée est attribuée au chauffage des bains. On constate également des consommations nette d'eau très faibles du fait de la recirculation et de l'épuration des bains et éventuellement d'évaporateur/condensateur avec recyclage de l'eau. À minima, les colonnes de lavage en continu même anciennes alimentent les bacs à contre-courant comme présenté dans la figure ci-dessus.



Dessin 2: BREF TEXTILE 2003 page 222 Les consommations d'énergie et d'eau dans 11 lavages du Royaume-Uni [187, INTERLAINE, 1999]

3.3.4 Pollution des rejets

Le lavage de la laine produit des effluents hautement polluants qu'il est très difficile de dégrader biologiquement, en particulier la graisse. Les autres composés des effluents comprennent les pesticides qui sont appliqués sur la laine pour contrôler divers parasites des moutons et le potassium, un nutriment des plantes contenu dans le suint. Tous posent des problèmes importants de traitement et d'élimination des effluents. Les contaminants de la toison en laine grossière contribuent à la charge en DCO à 20 % pour le suint, 50 % pour la totalité des graisses et 30 % pour la saleté. Un lavage industriel typique produit une charge organique dans ses effluents qui équivaut à une ville d'environ 30 000 habitants. (Christoe, 1996b; Russell, 1996a; Jones and Westmoreland, 1998)

Le traitement des effluents constitue l'un des plus grands défis d'une entreprise de lavage de la laine.^{xxiii}

Effluent de lavage à forte charge



Effluent de rinçage

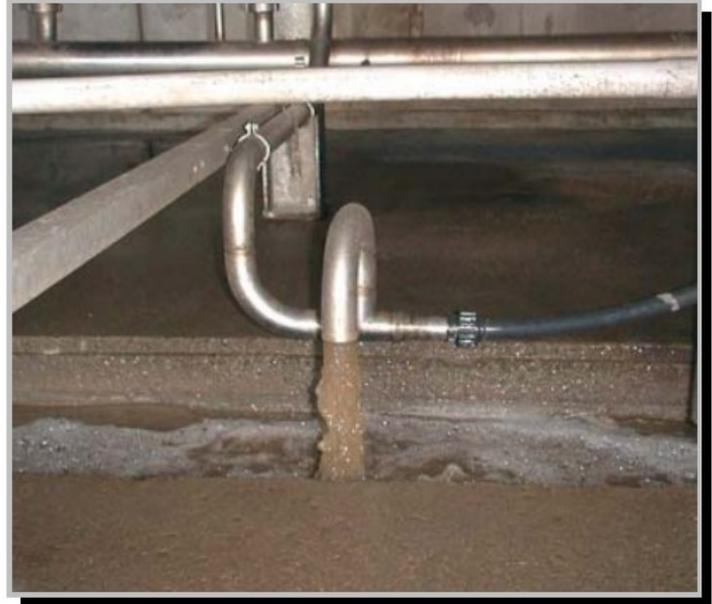


Figure 3: Processus de Traitement Intégrés pour Effluent Primaire de Lavage de Laine - (Matthew J. Savage)

Tableau 3: Caractéristiques des effluents typiques (après extraction de la graisse de laine)^{xxiv}

Nature de la pollution	Effluent de lavage fortement chargé	Eau de rinçage
Demande Biologique en Oxygène (DBO ₅) [mg/l]	9 800 - 50 000	200 - 1 000
Demande Chimique en Oxygène (DCO) [mg/l]	30 000 - 100 000	500 - 2 000
Matières En Suspension (MES)[mg/l]	20 000 - 60 000	100 - 700
Matière Extractible par Solvant (MEH)*[mg/l]	1 000 - 2 000	50 - 1 500

* MEH est constituée de détergent et de graisse de laine

Le Tableau 4 présente la composition d'un effluent de lavage provenant d'un lavage traitant un lot de laines australiennes (laine fine merinos, fort taux de graisse de laine), consommation en eau 10l/kg laine brute, première extraction de 32 % de la graisse de laine et 42 % d'impuretés.

Tableau 4: Composition d'un effluent primaire de lavage^{xxv}

Constituant	Quantité (mg/ l)
Graisse de laine	3000-6000
Suint	3000-6000
Terre	4000-7000
Pesticide	<1
Demande Biologique en Oxygène (DBO)	2500-5000
Demande Chimique en Oxygène (DCO)	15000-30000
Solides en Suspension	5000-10000
Total Azote	200-500
Potassium	1000-1500
Ammoniac	40-120
Phosphore	20-50
Total Tensioactifs	300-600
Sulphide	<1
Sulphate	30-100
Conductivité Électrique	1250-4000 μ siemens cm ⁻¹
pH	7.5

Le Tableau 5 présente la composition d'un effluent de lavage industriel après un traitement réduisant de 90-98 % la teneur en DBO₅ et de 80 % en DCO par floculation de l'émulsion de graisse de laine et processus biologique (CF-B). Le schéma du processus est présenté Il en résulte un effluent dégraissé, concentré en sels solubles du suint, riche en potassium. Le schéma d'un tel processus de traitement des effluents est présenté en Figure 8.

Tableau 5: Composition d'une solution concentrée de suint typique (Savage^{xxvii}, page 21)

	Suint content (g/l) Suint CF-B
Total Azote	13,2
Azote disponible	2,2
Potassium	89,7
Phosphore	0,9
Chlorure	73,6
Cuivre	0,007
Chrome	0,004
Nickel	0,005
Zinc	0,016
Cadmium	0,000
Plomb	0,001

Déchets ou sous-produits

Deux principaux déchets sont produits par l'activité de lavage de la laine et du traitement des effluents apparenté : la graisse et la boue.

Suivant son degré d'oxydation, il peut être possible de récupérer 20 à 40 % de la graisse initialement présente dans la laine brute. Cette graisse récupérée doit être considérée comme étant un sous-produit plutôt qu'un déchet, étant donné qu'elle peut être vendue aux raffineurs de lanoline pour des produits à haute valeur ajoutée dans l'industrie cosmétique. (...) La graisse craquée à l'acide n'a aucune valeur marchande et doit être éliminée en décharge.

La boue générée par suite du traitement physico-chimique des eaux usées contient également de la graisse, des impuretés et une part de pesticides, qui sont fortement associés soit à la graisse, soit aux impuretés.

Les concentrats et les boues résultant de l'évaporation ou de la filtration sur membrane sont susceptibles de contenir du suint, principalement chargé en chlorure de potassium et en sels de potassium d'acides gras. Le suint constitue un sous-produit, qui peut être utilisé dans l'agriculture. (source BREF TEXTILE 2003 page 75)
Les batteurs situés en entrée et sortie de lavage produisent de la matière organique sèche mêlée à de la poussière de laine.

4 Aspects réglementaires

4.1 Les installations classées pour la protection de l'environnement

Le code de l'environnement, conformément à la Directive européenne IDE, spécifie dans son [Annexe \(2\) à l'article R511-9](#) que :

l'activité de lavage de laine, si elle excède une capacité de traitement de 500 kg/jour, est inscrite sous la rubrique 2730 de la liste des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE).

À ce titre, elle est soumise à autorisation administrative. [L'autorisation est délivrée par le préfet du département.](#)

Tableau 6: *Code de l'environnement - Article Annexe (2) à l'article R511-9 (extrait)*

N°	A - NOMENCLATURE DES INSTALLATIONS CLASSÉES			B - TAXE GÉNÉRALE SUR LES ACTIVITÉS POLLUANTES	
	Désignation de la rubrique	A, D, S C	Rayon	Capacité de l'activité	Coef.
2730	Sous-produits d'origine animale, y compris débris, issues et cadavres (traitement de), y compris le lavage des laines de peaux, laines brutes, laines en suint, à l'exclusion des activités visées par d'autres rubriques de la nomenclature, des établissements de diagnostic, de recherche et d'enseignement :			La capacité de traitement étant :	
	La capacité de traitement étant supérieure à 500 kg/j	A	5	a) supérieure à 50 t/j	8
				b) supérieure à 10 t/j, mais inférieure ou égale à 50 t/j	2

Rayon d'affichage exprimé en kilomètres.
A : autorisation, E : enregistrement, D : déclaration, C : soumis au contrôle périodique prévu par l'article L. 512-11 du code de l'environnement

4.1.1 Le cadre réglementaire des Installations Classées Pour l'Environnement ICPE

La directive européenne 2010/75/UE relative aux émissions industrielles, dite directive IED, en vigueur depuis 2012, est une évolution de la directive relative à la prévention et à la réduction intégrée de la pollution (IPPC). "Elle en conserve les principes directeurs tout en les renforçant et en encadrant plus étroitement la mise en œuvre afin d'éviter les distorsions d'application entre États membres", précise le rapport au Président de la République relatif à l'ordonnance. (<https://www.actu-environnement.com>)

La directive IED vise à garantir une approche intégrée de la pollution et un niveau élevé de protection de l'environnement. L'approche intégrée signifie que les conditions de l'autorisation d'exploiter prennent en compte la totalité de la performance environnementale de l'entreprise, c'est-à-dire les émissions dans l'air, l'eau et le sol, la production des déchets, l'utilisation de matières premières, l'efficacité énergétique, les émissions sonores, la prévention d'accidents, la gestion des risques, etc.

4.1.2 Présentation des BREFs et MTD

Une approche communautaire et sectorielle : la directive IED confie à chaque état membre le contrôle des émissions industrielles des Installations Classées (ICPE) en se fondant sur deux documents de référence élaborés à l'échelle européenne avec l'ensemble des parties prenantes pour chacun des secteurs industriels concernés :

les BREFs (Best REFerence Documents) et les MTD (Meilleures Techniques Disponibles)

Ces documents techniques constituent la référence européenne pour juger de la performance d'une installation et déterminer les conditions du permis d'exploiter. Ils constituent des outils extrêmement utiles pour approfondir l'adéquation d'une ligne de lavage à son système de traitement et indispensables lorsqu'il s'agit d'une installation relevant des Installations Classées pour l'Environnement.

Consulter un article sur le sujet : [Révision des BREFs : domaine des déchets Quels changements pour les gestionnaires ? Comment s'y préparer ? Astee , revue TSM n°12 2017 pages 23-34](#)

4.1.3 Les BREFs

Chaque BREF contient, pour un secteur économique donné :

- un état des lieux technico-économique du secteur ;
- un inventaire des techniques mises en œuvre dans le secteur lors de la rédaction du BREF ;
- un inventaire des consommations et émissions associées ;
- une présentation des techniques candidates aux MTD (Meilleures Techniques Disponibles);
- un choix de celles retenues comme MTD ;
- une présentation des techniques émergentes.

4.1.4 Les MTDs

L'article L. 515-28 du Code de l'environnement introduit le principe de mise en œuvre des Meilleures Techniques Disponibles (MTD en français, BAT pour Best Available Technique en anglais). Ce principe, déjà présent dans la directive IPPC, est renforcé dans la directive IED "qui prévoit notamment que les valeurs limites d'émission doivent, sauf dérogation, garantir que les émissions n'excèdent pas les niveaux d'émission associés aux Meilleures Techniques Disponibles décrits dans les « Conclusions sur les Meilleures Techniques Disponibles » adoptées par la Commission", détaille le rapport relatif à l'ordonnance.

Le même article de loi prévoit le réexamen périodique des conditions d'exploitation pour tenir compte de l'évolution des meilleures techniques. Ce réexamen, prévu par la directive IPPC, est à présent déclenché par l'adoption des "Conclusions sur les Meilleures Techniques Disponibles" relatives à l'activité principale de l'installation.

"En plus de la participation du public à la procédure d'autorisation, déjà prévue au sein de la législation française", la directive IED introduit cette participation "lors du réexamen de l'autorisation en cas d'utilisation de la possibilité de dérogation [aux niveaux d'émission associés aux meilleures techniques disponibles prévues

dans les conclusions sur les MTD] *ou lors d'une révision des conditions d'autorisation rendue nécessaire par la pollution causée par l'installation*", rappelle le rapport. (Source actu-environnement.com)

Les MTDs sont définies comme l'état de l'art applicable à un secteur d'activité donné. Il ne s'agit pas de techniques issues de la recherche et du développement ou de techniques de pointe. Des techniques innovantes non-citées dans le BREF sont admises, à la condition qu'elles permettent d'obtenir des niveaux d'émission équivalents ou meilleurs que les valeurs limites mentionnées dans la MTD.

Les « Conclusions sur les Meilleures Techniques Disponibles » (BAT-conclusions) sont des documents adoptés au niveau communautaire. Elles sont publiées à la fin de la révision du BREF concerné.

Les « Conclusions MTD » et les niveaux d'émission associés sont juridiquement contraignants depuis la directive IED en 2010 alors qu'au préalable ils n'avaient qu'une valeur informative.

4.1.5 Révision des BREF et MTD TEXTILE

Le lavage de la laine est traité dans le BREF Textile juillet 2003 encore en vigueur actuellement. Ce document de 738 pages couvre l'ensemble des problèmes environnementaux connus dans le secteur textile à la date de publication et les MTD associées.

Un groupe de travail conduit actuellement la révision du BREF Textile. La première version de travail (Draft) a été publiée au 19/12/2019 et est consultable uniquement en version anglaise. Elle devrait aboutir à la publication du [nouveau BREF Textile en 2021](#).

Alors même que ce document n'est pas finalisé, son étude est fondamentale dans un projet d'installation puisqu'il intègre les nouveaux concepts de la directive IED en vigueur depuis 2011, prend en compte près de 20 ans d'évolution du secteur textile depuis les BREF et MTD 2003 et trace déjà les prochaines Conclusions des MTD et Valeurs Limites d'Émission (VLE) dans l'air et l'eau qui seront adoptés dans sa version finale.

L'article L. 515-28 du Code de l'environnement prévoit le réexamen périodique des conditions d'exploitation pour tenir compte de l'évolution des meilleures techniques. Ainsi, dans un délai d'un an à compter de la publication d'un BREF et des conclusions des MTD, un dossier de réexamen devra être remis par l'exploitant et, dans un délai de 4 ans, les conditions d'exploitation devront avoir été adaptées aux nouvelles Conclusions sur les MTD.

En ce qui concerne l'activité de lavage de laine, la publication du nouveau BREF TEXTILE et des conclusions sur les MTD prévue en 2021 devrait donc conduire à un réexamen des conditions d'autorisation dans les 12 mois suivants et à leurs mise en application jusqu'en 2025 pour les installations existantes ou bien sûr dès la demande d'autorisation pour des nouvelles installations.

4.1.6 Consulter le BREF Textile

- BREF TEXTILE 2003, version actuelle en vigueur :
 - version française (<https://aida.ineris.fr/guides/directive-ied/documents-bref>)
[télécharger l'archive compressée](#)

- le fichier TEX_sommaire_V1-0.pdf permet d'accéder au sommaire interactif du Résumé Technique.
- le document V1valid_Intégrale2.PDF est le document exhaustif du BREF et MTD Textile juillet 2003 (738 pages). Il est également [téléchargeable directement au format pdf par ce lien](#).
- [version espagnole](http://www.ca.prtr-es.es/busqueda-documentos/textil) (<http://www.ca.prtr-es.es/busqueda-documentos/textil>)
- BREF TEXTILE 2021 EN PRÉPARATION - DOCUMENT DE TRAVAIL [télécharger la version préliminaire \(D1\) de la révision du document BREF en anglais \(Décembre 2019\)](#)

Services régionaux compétents :

[Les risques technologiques en Nouvelle-Aquitaine sur le site de la DRÉAL](#)
[Direction départementale des territoires et de la mer \(DDTM\)](#)

4.2 Les redevances pour pollution de l'eau d'origine non domestique et prélèvement sur les ressources en eau

Les rejets d'eau ou les boues produites par les activités industrielles se retrouvent dans l'environnement et sont susceptibles de créer des risques sanitaires aux usagers des eaux souterraines ou superficielles, et de perturber la vie aquatique. Le Code de l'Environnement détermine la redevance applicable aux activités non domestiques selon les nuisances occasionnées par le captage d'eau et les effluents produits.

[Article L213-10 du Code de l'Environnement, modifié par la loi n°2018-727 du 10 août 2018 - art. 21 \(V\)](#)

En application du principe de prévention et du principe de réparation des dommages à l'environnement, l'agence de l'eau établit et perçoit auprès des personnes publiques ou privées des redevances pour atteintes aux ressources en eau, au milieu marin et à la biodiversité, en particulier des redevances pour pollution de l'eau, pour modernisation des réseaux de collecte, pour pollutions diffuses, pour prélèvement sur la ressource en eau, pour stockage d'eau en période d'étiage, pour obstacle sur les cours d'eau et pour protection du milieu aquatique. (...)

[L'agence de l'eau Adour-Garonne](#) est un établissement public chargé de mettre en œuvre les orientations de la politique publique de l'eau sur le territoire du bassin qui couvre 1/5e du territoire national dans le grand Sud-Ouest.

L'agence perçoit des redevances pour pollution de l'eau, modernisation des réseaux de collecte, prélèvement sur les ressources en eau et toute activité ayant un impact sur les milieux aquatiques. Elles ont pour objectif de diminuer l'impact des activités humaines sur celui-ci.

[Délibération n°DL/CA/18-56 – Fixation des taux de redevances 2019-2024](#)

[Délibération n°DL/CA/18-58 – Modalités de calcul et de recouvrement des redevances](#)

[En savoir plus sur le calcul de la redevance](#) pollution non domestique sur le site du bassin Seine-Normandie

4.3 Demande d'agrément d'un lavage de laine en suint

Dans le cadre de l'évaluation des risques sanitaires, la laine en suint est classée en tant que sous-produit animal de catégorie 3 du règlement EU 1069/2009 (CE), applicable aux différentes catégories de sous-produits animaux non destinés à la consommation humaine, pouvant faire l'objet de valorisation ou d'élimination.

Le règlement 1069/2009 (CE) établit les règles sanitaires applicables aux sous-produits animaux et produits dérivés non destinés à la consommation humaine. Ce règlement définit le point de départ au plan sanitaire, l'élevage ou la laine est produite, et le point final au plan sanitaire, le lavage de laine. Il donne les procédures à suivre afin d'assurer la traçabilité des lots de laine de bout en bout. Celles-ci permettent d'identifier les opérations intermédiaires jusqu'au point final par l'enregistrement d'un lot de laine à sa réception, l'agrément des locaux de stockage et du lavage de laine, l'établissement d'un Document d'Accompagnement Commercial au cours du transport, etc. Elles définissent également des mesures sanitaires élémentaires concernant le conditionnement de la laine et son transport (Laver la laine - Scouring wool¹, pages 20-23).

[Guide disponible sur le site de l'Atelier - Laines d'Europe.](#)

5 Adapter le lavage à son environnement

La capacité des installations déterminera dans une large mesure les contraintes environnementales qu'elle induit et les voies possibles de traitement ou de valorisation des effluents. Dès que la capacité augmente, les besoins en eau et la charge de pollution potentielle deviennent déterminants dans l'implantation de la ligne de lavage. Nous aborderons ici la réglementation et classerons en catégories les lavages de laine selon leur capacité et le traitement des effluents qui pourrait leur être associé.

La charge de pollution peut être aisément établie selon les volumes de laine lavés, et comparée aux capacités de traitement des effluents domestiques par exemple. La ligne de lavage sera plus ou moins facilement modélisable selon la catégorie de lavage car les propositions de constructeurs de matériel de lavage sont rares aujourd'hui pour les lavages de petites capacités (de l'ordre de 100 kg/jour). Des pistes sont toutefois envisageables dans cette catégorie en faisant preuve d'ingéniosité à adapter du matériel de grande diffusion détourné de sa fonction initiale.

5.1 Acquérir une vision étendue du lavage de la laine

La rencontre « Le lavage de la laine en Europe : urgence et avenir écologique » a eu lieu en novembre 2015 à Saugues (43). Venus de 15 pays européens, 150 professionnels de la filière laine se sont retrouvés pour partager des idées et rechercher des solutions.

Le livre Laver la laine – Scouring Wool^{xxvi} présente les Actes de cette rencontre : texte des interventions, compte-rendus des débats et des visites. Cette publication bilingue français-anglais constitue un outil de travail avec informations techniques, dispositions réglementaires, panorama des différents lavages européens existants, du plus petit au plus grand, méthodes de lavage inattendues ... et en annexe, des cartes, des adresses utiles et un glossaire.

Études de marché européennes sur le lavage de la laine

Deux études furent menées dans le Pays de Galles au Royaume Uni en 2005 puis 2010 afin d'évaluer la faisabilité d'un lavage de petite puis de moyenne capacité pour le lavage de petits lots de laine locale. Elles ne sont plus disponibles en ligne.

En Pays de Galles, l'étude « Wool scouring in Powys – a feasibility study » 28 pages, 2005, visait à évaluer les possibilités de lavage de petits lots, 40 kg de laine en suint par jour

Value added wool – Wool scouring project report, 103 pages, 2010, visait 2000-10 000 toisons /an (page 6) soit 4-20t /an (page 19). Le document analyse le lavage à façon (avec éventuellement l'ajout de services supplémentaires), le négoce de laine lavée, les autres fibres naturelles, les co-produits comme la lanoline, l'électricité produite par un site de méthanisation et les autres marchés ou sources de revenus à identifier.

Enfin une dernière étude réalisée en 2019 en Pays de Galles également est accessible sur le net : [Current state and potential of the wool industry in Gwynedd](#) - Geraint Hughes and Jennifer Hunter, mars 2019, pages 26-29 et annexes pages 53-57

5.2 Les catégories de lavage de laine

À l'étude de la masse de documents consacrés au traitement des effluents dans la littérature BREF associée à la réglementation des installations classées au titre de la protection pour l'environnement, il est clair que l'on devra disposer de solides raisons pour s'engager dans des capacités de lavage supérieures à 500 kg/jour.

Pour autant, alors même que la charge potentielle de pollution organique représente la première source de pollution du lavage de laine, corrélée aux capacités de lavage selon la valeur estimée précédemment, 315 g DCO (= 2,33 EQH) /kg de laine grossière en suint, les stratégies de lavage et de traitement des effluents seront extrêmement variables selon les capacités des installations mais également selon la capacité de l'environnement et de la collectivité à accueillir, ou « digérer » pourrait-on dire, ces effluents.

5.2.1 Notions de traitement des eaux

Presque toutes les méthodes de traitement des eaux usées ont été appliquées aux effluents de lavage à un moment ou à un autre (Stewart, 1988; Jones et Westmoreland, 1998), mais aucun processus de traitement unique n'a été primé et une combinaison de processus de traitement semble nécessaire (Lapsirikul et al., 1994b).(Source Kroening, 2003,^{xxvii}, page 14)

Voici quelques descriptions sommaires de techniques de traitement des eaux largement pratiquées dans les lavages de laine industriels:

- Les méthodes de séparation physiques

Elles permettent de réduire la charge des effluents en retirant des contaminants préalablement au lavage (battage de la laine en suint au cours de l'ouvrison) ou au cours du processus de lavage. Les boucles d'épuration des lignes de lavage modernes utilisent ces méthodes. Les hydrocyclones, les décanteurs centrifuges et les extracteurs de graisse de laine sont tous trois basés sur un principe de séparation centrifuge. Ils sont basés sur la différence de densité entre l'eau et les solides, sable, poussière, gravier, boue) ou la graisse de laine à extraire. Ils permettent une séparation en continu au cours du lavage alors que la séparation par décantation nécessite de laisser reposer les bains. L'extraction centrifuge de la graisse de laine est incomplète (typiquement 25 à 40 % de la graisse - Trotman, 1984), justifiant le recours à d'autres procédés de séparation au cours du traitement des effluents, s'agissant de la charge de pollution organique la plus élevée dans les effluents de lavage de laine.

- Méthode biologique

«les traitements biologiques utilisent des micro-organismes pour convertir la matière organique d'un effluent en plus de micro-organismes (par croissance cellulaire) et en produits respiratoires. Les

traitements aérobies, qui ont besoin d'oxygène pour fonctionner, forment du dioxyde de carbone et de l'eau, les traitements anaérobies, en l'absence d'oxygène, du dioxyde de carbone, du méthane et d'autres produits de réduction, tels que le sulfure d'hydrogène »(Christoe, 1986)

- Traitement chimique

«On ajoute des produits chimiques aux effluents de lavage de laine pour déstabiliser les particules graisse-impuretés extrêmement stables qui restent en suspension après la centrifugation. La déstabilisation chimique peut être obtenue de plusieurs manières, y compris le craquage acide, la floculation chimique, la déstabilisation de l'émulsion et l'extraction au solvant ».(J. Christoe)

«Le craquage à l'acide perturbe la capacité du détergent à stabiliser l'émulsion. Il est plus efficace pour le savon que pour les éthoxylates d'alkyle et d'alcool actuellement utilisés pour laver la laine. À des pH inférieurs à 8 (mais de préférence 2-3), l'acide (acide sulfurique) réagit avec le savon pour produire de l'acide libre, qui est ensuite bouilli et filtré à travers un filtre-pressé à plaques. En chauffant la presse, la graisse filtrée chaude apparaît comme une graisse craquelée acide de qualité médiocre. »

« La plupart des particules solides en solution ont une charge électrique, qui est généralement négative. Ces charges poussent les particules à se repousser, ce qui empêche l'attraction mutuelle entre elles. La coagulation réduit ces charges électriques afin que les forces d'attraction puissent dominer pour joindre les particules et encourager leur sédimentation. La floculation consiste à regrouper les particules solides à l'aide d'un produit chimique contenant un certain nombre de groupes fonctionnels. La répulsion électrique n'a pas besoin d'être réduite pour que la floculation réussisse. Les floculants polymères ayant un poids moléculaire d'environ 10 millions de Daltons et une charge positive sont généralement utilisés pour améliorer la décantation des boues de décantation dans les décanteurs. »

« Si une quantité suffisante de solvant est ajoutée à une liqueur de lavage , le détergent ne peut plus stabiliser la phase organique . Cela provoque la rupture de l'émulsion, donnant une phase solvant riche en graisse. Les solvants utilisés comprennent des alcools tels que le butanol, le pentanol et l'hexanol » (Christoe, 1986). Cette technique est probablement incompatible aujourd'hui avec la directive IED, toutefois le suint concentré offre une action similaire par « déstabilisation de concentration ».^{xxviii}

«la graisse de laine a un pouvoir calorifique (40 MJ / kg) comparable au fioul (43 MJ / kg). Cependant, l'injection d'une liqueur de lavage normale dans un four ne serait pas rentable en raison des grandes quantités d'eau présentes. La méthode habituelle consiste tout d'abord à augmenter la teneur en solides de l'effluent à environ 60 à 70% en le faisant passer à travers une série d'évaporateurs. Le concentré est ensuite incinéré à 1200 ° C pour produire de la chaleur. Le seul déchet est la cendre du four. »(Christoe, 1986)^{xxix}

- Le document BREF TEXTILE 2021 en préparation décrit 18 techniques de réduction des émissions dans l'eau (5.9.3 Techniques to reduce emissions to water, pages 756-757)
- Le document BREF TEXTILE 2003 décrit et compare 6 modes de traitement des effluents de lavage de laine analysés sur des sites européens lors de l'étude INTERLAINE 1999. (chapitre 4.10.10 Traitement des eaux usées générées par les installations de lavage de la laine page 566)
- [Savage](#) pages 45-64 évalue le mode de traitement des effluents de 4 sites de lavage.

Il faut toutefois constater que les retours d'expérience collectés dans l'étude INTERLAINE, citée dans les 2 BREFs TEXTILE, constituent une synthèse des données provenant d'une douzaine de lavages européens de dimension industrielle (un lavage d'une capacité de 3500 tonnes/an y est considéré comme un petit lavage).

C'est une ressource indispensable dans une installation envisagée dans le cadre de la réglementation IED, mais insuffisante dans le cadre de réellement petites installations.

5.2.2 Lavage de plusieurs tonnes/jour – plusieurs milliers de tonnes /an

Un lavage industriel au standard international opérant une dizaine de tonnes de laine grossière en suint par jour représenterait une charge de pollution potentielle équivalente à une ville de 23 000 habitants (23 000 EQH).

Lorsque l'installation ne peut se soustraire à un classement de la capacité de lavage de plus de 500 kg/jour, elle sera régie par le principe d'Autorisation selon la directive IED. Il faudra alors se référer tout à la fois aux BREF et MTD TEXTILE 2003 en cours et à la nouvelle version en préparation.

En complément des MTD d'application générale pour l'ensemble du secteur textile soumis à la directive IED, les «Conclusions MTD TEXTILE » en préparation listent 3 BAT (BAT pour Best Available Technique = MTD), notées BAT 29, BAT 30 et BAT 31, spécifiques au lavage de la laine, et mettent en particulier l'accent sur la récupération de la graisse de laine le recyclage de l'eau :

- BREF et MTD TEXTILE Draft 1 dec. 2019 Page 742 chap.V, Conclusions MTD
« BAT 29 Afin d'utiliser efficacement les ressources et de réduire la consommation d'eau et la production d'eaux usées, la MTD consiste à récupérer la graisse de laine et à recycler les eaux usées. »
- La MTD/BAT 30 concerne l'efficacité énergétique des installations, notamment le capotage des bacs afin de réduire les pertes de chaleur et le recours à des chauffages directs gaz des bacs et du séchoir sur les nouvelles installations.
- La MTD/BAT 31 concerne le traitement biologique des déchets organiques de lavage (par ex. saleté, boues de traitement des effluents).

Dans le cadre de la directive IED, la récupération de la graisse de laine ne sera donc plus un choix motivé par la plus-value qu'elle peut constituer mais une prochaine exigence réglementaire.

La problématique que représente le traitement des effluents et la gestion de l'eau nécessaire au processus de lavage d'une unité traitant plusieurs tonnes/jour correspond précisément au retour d'expérience industriel sur lequel sont fondés le BREF TEXTILE et les MTD associées.

Les colonnes de lavage modernes intègrent tout au long du processus de lavage des boucles d'élimination des contaminants et récupération de la graisse de laine permettant de réduire la quantité et la charge des effluents à la source et le recyclage partiel de l'eau afin d'optimiser les consommations en eau et en énergie. La station de traitement des eaux est alors généralement spécifique à l'unité de lavage.

Le Document BREF Textile juillet 2003 présente en pages 214-230 la synthèse des résultats de l'enquête menée par l'ENCo en 1997/1998 pour le compte d'INTERLAINE sur le lavage de la laine brute et les pratiques en matière de traitement des effluents dans l'Union Européenne^{xxx}. Elle fournit un compte rendu exhaustif des consommations en eau et énergie, de la récupération de graisse, de la nature et des quantités des rejets (Demande Chimique en Oxygène, boue, ectoparasitocides) ainsi que des modes de traitement utilisés pour chacun des 12 lavages de laine européens ayant répondu à l'enquête, dont 2 en France. On peut supposer qu'il s'agit pour la France de la Lainière du Bascaud et de La Môle Industrie, tous deux dans la région de Mazamet (81), encore en activité à l'époque.

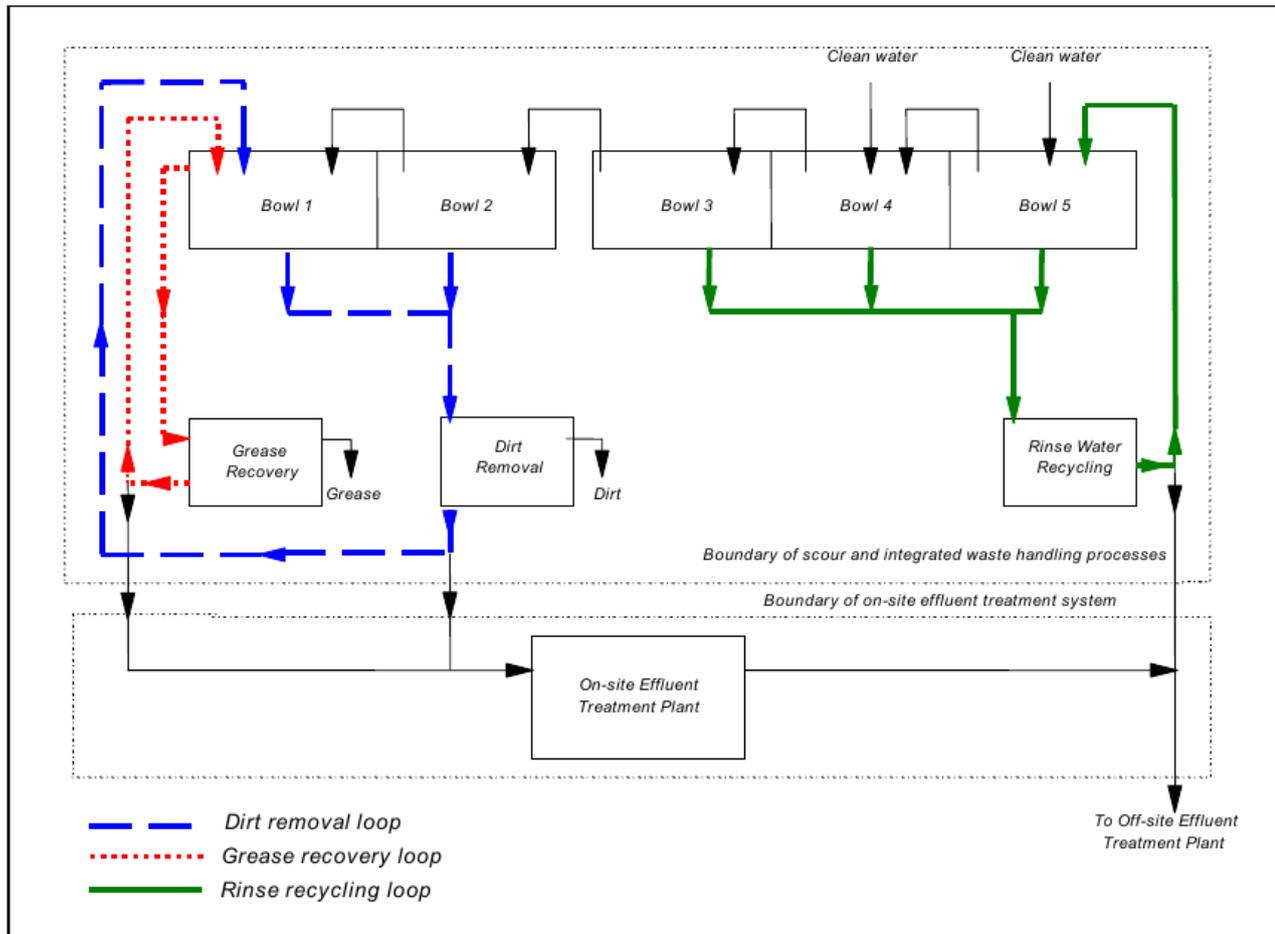


Figure 4: Schéma représentant une ligne de lavage, un procédé de traitement des déchets intégré et une station de traitement des effluents sur site - BREF TEXTILE 2003 page 71]

Compte tenu de la disparition des colonnes de lavage anciennes fermées depuis la rédaction du BREF TEXTILE 2003 aussi bien à Mazamet que dans la région de Barcelone, le lavage Manuel Rodrigues Tavares à Guarda au Portugal représente aujourd'hui le lavage de cette catégorie le plus proche des Pyrénées. Ce site intègre les techniques les plus avancées de traitements des rejets intégrés au process avec recyclage de l'eau, séparation des effluents et traitement biologique des effluents dans la station d'épuration combinée à la ligne de lavage.



Texte 3: lavage Manuel Rodrigues Tavares (STMRT) - Colonne Andar et sa station de traitement des eaux acquise neuve et en exploitation depuis 2002 - [vidéo](#)

L'étude de marché Wool scouring in Powys – a feasibility study - 2005 - consigne des informations sur un équipement que l'on pourrait considérer similaire :

« Andar dispose de la plus grande gamme d'équipements de lavage mais est orienté vers les plus grandes capacités. Une nouvelle colonne de lavage 6 bols Andar acquise par Buckfast spinning dans le Devon (UK) en 2000 coûta plus d'£1 million. Le site traite 50-60t/semaine et l'ensemble des équipements représente plus de £3.4 million. »^{xxxii}(cessation d'activité en 2013)

Le dossier de reconstruction du lavage-peignage Punta Arenas - Standard Wool Chili - après son [incendie](#) en 2005, fournit des [informations techniques et financières](#) sur l'unité et sa station de traitement des eaux.

Bâtiments	2,5 millions US \$
ligne de lavage et équipements	2,25 millions US \$
station de traitement des eaux	<u>0,75 millions US \$</u>
Total	5,5 millions US \$

L'unité actuelle dispose d'une [capacité](#) de 4 000 t peigné/an et intègre une ligne de lavage Andar 6 bacs en 2,4 m largeur.

Le lavage-peignage a annoncé sa [fermeture](#) en avril de cette année ([vidéo](#)). L'unité employait 60 personnes et collectait directement la laine auprès de 450 éleveurs.

Dans une capacité plus modeste, le projet Alpes Provence Laine, dans son dossier Pôle d'Excellence Rurale en 2010 visait une production de 700t/an et un traitement et recyclage de l'eau par évaporation^{xxxii} :

« L'objectif de ces lourds investissements est d'utiliser au maximum de l'eau recyclée à partir des opérations de lavage initiales et d'avoir un impact environnemental le plus réduit possible. Ce lavage sera fait au savon et

à l'eau dont 90% sera recyclée par une unité de traitement des eaux. Les 10% de déchets restants seront enlevés puis traités par une entreprise spécialisée. Sur site, la laverie n'aura aucun rejet et ne consommera que 0,9m³ d'eau par jour pour laver 3 150kg de toison.

La capacité de la colonne de lavage sera de 700t/an à partir de 2014. Il est important de noter que la toison à vocation d'isolation perd 25% de sa masse lors du lavage. Cette réduction de masse est de 55% pour la toison à vocation textile. »

« L'investissement matériel le plus important est attribué à la SCIC-3RP-2LM. D'un total de 895 000€ HT, il correspond à l'achat de la colonne de lavage de toisons avec:

- les machines de lavage des toisons 230 000€ HT
- l'unité de séchage de la laine 250 000€ HT
- le matériel de manipulation des balles de toison et de laine 55 000€ HT
- l'unité de traitement des effluents de lavage 360 000€ HT

Le retour sur investissements de la SCIC-3RP-2LM est prévu pour 2016. » [Présentation du projet](#)
[La liquidation de la société](#) fut prononcée en 2013, avant même le début des travaux.

5.2.3 Moins de 200t en suint/an, hors catégorie IED ?

Ces lavages sont également des colonnes opérant en continu, des Léviathans, mais de façon intermittente au cours de l'année. Ce sont souvent des colonnes de conception ancienne conçue à l'époque pour la fonction et la qualité du lavage sans offrir la sobriété des unités modernes bénéficiant d'une gestion efficiente et rigoureuse de l'eau, de l'énergie et des effluents. Leur capacité journalière est supérieure au seuil réglementaire de 500 kg/jour mais la production annuelle ne dépasse guère les 200 t/an. Certaines d'entre-elles sont les quelques survivantes d'un ensemble de lavages en Europe qui ont vu leurs marchés se réduire au profit de lavages plus compétitifs. Ces lavages concurrents bénéficient éventuellement d'une législation moins contraignante et pour une part sont situés très loin, dans les zones de délocalisation textile.

Certaines de ces colonnes de lavages aujourd'hui opérationnelles en Europe ont été assemblées à partir de ces unités fermées au cours des vingt dernières années, dans un projet d'installation plus adapté au contexte économique et environnemental actuel. Le lavage de Saugues (43) mais également la colonne de lavage espagnole d'Alicante acquise en 2013 et en exploitation depuis 2016 sur l'île de Gotland en Suède en sont des exemples.

Il faut noter à cet égard le projet de [transfert de la ligne de lavage de Souvigny \(03\) sur le site d'Aussillon \(81\)](#), probablement pour la relier à la station de traitement des eaux voisine des Ets Henri Plo.

La ligne de lavage Ullkontoret sur l'île de Gotland présente quelques originalités à approfondir quant à l'interprétation de la capacité-seuil de 500 kg/jour au delà de laquelle un lavage de laine relève du régime d'autorisation selon la directive IED.

[La production de la ligne est de 2 t/jour](#). Toutefois, Jenny Andersson et Hans Bulthuis évoquent :

"En ce qui concerne le traitement des effluents, nous devons dire tout d'abord que tant que nous traiterons moins de 200 tonnes de laine par an, la réglementation est plus simple, donc nous visons à rester en dessous de ce niveau. Les effluents, dès lors que les graisses ont été séparées, sont riches en nutriments et sont excellent pour l'irrigation des champs. C'est pourquoi nous allons les épandre dans nos champs à proximité de la ligne de lavage." La ligne de lavage fonctionne de façon saisonnière, au printemps et à l'automne, quand les températures sont moyennes.^{xxxiii}

De ce témoignage on peut supposer que les autorités suédoises ont pris en compte une capacité journalière moyenne inférieure à 500 kg de laine lavée/jour, calculée sur le lavage de moins de 200 tonnes de laine en suint/an lissées sur 300 jours d'activité dans l'année en prenant en compte un rendement au lavage des laines des moutons Gotland de 75 % ([caractéristiques des laines Gotland](#)). Ainsi, le lavage Ullkontoret serait placé

hors du champ de la directive IED.

Si tel est le cas, alors ce raisonnement pourrait peut-être trouver un écho favorable dans l'interprétation de la valeur seuil réglementaire de 500 kg/jour concernant le lavage de laine en France au vu de la directive IED. Harmonisation de l'interprétation de la directive IED dans les États Membres de la Communauté Européenne oblige ... L'enjeu est de taille.

Dans cette capacité de ligne de lavage, les volumes et la charge des effluents à traiter, même s'ils ne sont pas optimisés comme ils le seraient dans une ligne de lavage moderne, sont encore modérés et pourraient constituer une empreinte écologique gérable au niveau local sans recourir aux investissements et à la technologie complexe et coûteuse des lavages de grande capacité. En ce sens, l'épandage constituerait par exemple une option envisageable et économique à cette échelle si l'on dispose de surfaces d'épandage appropriées. La ligne de lavage opérant de façon intermittente, des capacités de traitement plus modestes pourraient être envisagées afin d'alterner les séquences de lavage et de traitement des effluents par exemple.

5.2.4 Les lavages d'une capacité inférieure à 500 kg/jour

Le lavage se situe alors hors du champ de la directive IED.

Le lavage de la laine dans un cadre professionnel sera soumis aux conditions générales des activités artisanales et industrielles concernant la gestion de l'approvisionnement en eau et le traitement des effluents.

En supposant que le seuil réglementaire de 500 kg /jour soit établi sur la base du kg de laine lavée, la charge de pollution organique générée par le traitement du lot de laine grossière en suint correspondant peut être évaluée comme suit :

- 500 kg laine lavée grossière à un rendement de 80 % → $500 \text{ kg} : 80 \% = 625 \text{ kg}$ de laine grossière en suint avec un rendement au lavage de 80 %
- La charge de DCO correspondante déversée dans les effluents si aucun prétraitement n'est pratiqué sur le site se calculerait comme suit :
charge de DCO/kg laine en suint retenue selon BREF TEXTILE 2003 : 0,3125 kg DCO/kg (chap 3.3.1)
 $625 \text{ kg} \times 0,3125 \text{ kg DCO/kg} = 195,31 \text{ kg DCO/jour}$ pour des laines grossières
- Soit une charge de pollution en STEU (Stations de Traitement des Eaux Usées) exprimée en Equivalent habitant [EH] :
pour rappel 1EH =135g DCO/jour
 $195,31 \text{ kg DCO/jour} /135\text{g} = 1447 \text{ EH}$

Le site [L'environnement en France, Rapport sur l'état de l'environnement](#) édité par le Ministère de la Transition écologique et solidaire, fait le constat suivant :

En France, on compte de nombreuses stations de petite taille : plus de 50 % des stations ont une capacité théorique inférieure à 500 EH. À l'opposé, 6 % des stations ont une capacité au moins égal à 10 000 EH et représentent ensemble plus de 80 % de la capacité totale des STEU en service de France.

En conclusion, même à ce dimensionnement ou moindre, le projet d'implantation d'un lavage de laine devra composer avec la capacité de lavage envisagée, les capacités de traitement de la station de traitement locale, l'éventualité d'un traitement des effluents sur site ou d'un pré-traitement afin de réduire la charge des effluents à traiter et enfin avec les quantités et caractéristiques des eaux nécessaires à l'approvisionnement de la ligne. De plus, les volumes et charges des effluents versés en STEU seront sanctionnés par la redevance pollution comme cité dans le chap 4.2

L'exemple du lavage de Souvigny (03)

Les établissements Laroue situés à Aussillon (81) reprirent le Lavage du Bourbonnais en 2013 d'une capacité équivalente au lavage de Saugues (43), 1-2 t/jour. Dominique Pécut, gérant du lavage jusqu'à son décès en 2012, gérait les effluents de lavage de la façon suivante :

- Les eaux issues des bacs de lavage faisaient l'objet d'un plan d'épandage sur ses terres agricoles, ce qui nécessitait des moyens spécifiques (rotation avec tracteur et tonne à lisier au cours des journées de lavage).
- Les eaux de rinçage, moins chargées que des eaux domestiques, étaient déversées vers la station d'épuration communale à chacune des journées de lavage.

Les établissements Laroue, voulant s'affranchir de la contrainte d'épandage, convinrent avec l'agglomération de Moulins sur Allier du déversement des eaux des bacs de lavage et des eaux de rinçage vers la station communale de Souvigny dont elle avait la charge. Le nouveau gérant procéda à l'adaptations des bassins de décantation existants, à l'installation d'un débourbeur pour la récupération des boues et au montage de dispositifs de contrôle à distance des rejets d'effluents, par enregistrement en continu des volumes d'effluents produits et par flaconnage automatique d'échantillons des effluents pour analyse ultérieure. Il s'agissait là de conditions préalables à la prise en charge des eaux de lavage par la station d'épuration de Souvigny. Dès les premières analyses réalisées au redémarrage du lavage en septembre 2013, la confusion jaillit : les niveaux de pollution explosaient littéralement par rapport aux attentes des gestionnaires de la station de traitement. Ils s'attendaient tout simplement à des effluents de lavage aussi peu chargés que les eaux de rinçage auxquelles ils étaient accoutumés (charge de pollution accordée au lavage de laine 70 EH). La situation était sans appel : les effluents produits représentaient une charge journalière de 1400 EH alors que la station communale de Souvigny, mise en exploitation il y a seulement 5 ans, avait une capacité de 1720 EH. La station communale n'était donc pas en mesure de traiter l'ensemble des effluents quotidiens dus au Lavage de Souvigny. L'autorisation de rejet vers la STEU fut dès lors suspendu à la résolution de ce problème, par exemple un retour à l'épandage des eaux de lavage, un pré-traitement sur site ou un acheminement des effluents de lavage dans un centre de traitement spécialisé. La situation resta en l'état, faute de solution, le lavage ne pu être mis en exploitation.

Les équipements de lavage

Le livre Laver la laine – Scouring Wool présente quelques installations européennes dans cette catégorie en pages 66 à 95.

Quelques rares constructeurs proposent des équipements dans cette catégorie. Ils n'intègrent généralement aucune boucle d'épuration des bacs, de récupération de la graisse de laine ou de dispositif de traitement des effluents :

- la [Wool-Ti](#) (env. 20 kg/jour), réalisée en Suisse, d'une valeur de 50 000 FS. La présentation précise : « l'eau est continuellement traitée et réutilisée ». [Photos sur le site Facebook du European Wool Scouring Meeting](#)
- la micro-laveuse canadienne Belfast Mini-Mill (env. 15 kg/jour), 11 000 \$. D'une capacité inférieure à 5kg par cycle de lavage, proposée dans la gamme d'équipements des [micro-filatures Mini Mills](#). Elle consomme environ 100 l d'eau par cycle de lavage. (Source Laver la laine - Scouring wool pages 76-77, [Current state and potential of the wool industry in Gwynedd](#) pages 55-56).
- [KiwiScour](#) (env. 60 kg/jour ou 120 kg/jour en version double), circulation de l'eau à contre-courant pour le recyclage de l'eau, prix 75 000 NZ\$ sans séchoir, 195 000 NZ\$ l'unité complète et 264 000 NZ\$ en version double. (Source [Current state and potential of the wool industry in Gwynedd](#) pages 27-28, 53)

- un concept de lavage pour laines grossières présenté par Daniel Palet lors des rencontres européennes sur le lavage de la laine en Europe en 2015. Un lavage rudimentaire limité à 3 bacs de désuintage, de lavage et de rinçage associé à un battage approfondi avant les bains, afin de réduire les contaminants dans les effluents, puis sur la laine lavée. (Source Laver la laine - Scouring wool pages 53)^{xxxiv}

À cela il faut ajouter des installations opérationnelles en Europe ou ailleurs, sources d'inspiration pour l'inventivité et la créativité que leurs exploitants ont développées :

- Le lavage d'Ardelaine (07), env. 350-450 kg/jour, était conçu autour d'une petite colonne de lavage d'expérimentation réalisée pour l'Institut Textile de France à Mazamet. Elle disposait de sa propre station de traitement où les effluents de lavage étaient dégraissés par *craquage à l'acide* et *floculation* (voir chap 5.2.1) puis remis à la STEU communale et les eaux de rinçage traités par phyto-épuration. (Source Laver la laine - Scouring wool pages 84-85)
- Le lavage tchèque de la [ferme Vrbětice](#) (env. 150 kg/jour) est constitué autour d'une laveuse de laine prototype, acquise d'occasion 21 000 €, réalisée par un constructeur allemand de matériel de laverie/pressing, EFFMA, qui a cessé son activité en 2018. La laveuse consomme 500 l d'eau par cycle de 23 kg de laine en suint. Pas d'information concernant le traitement des effluents.^{xxxv}
- Hollow Road Farms inc dans l'État de New York (env. 45-90 kg/jour) a été conçu en 2002-2003 dans une démarche alternative et environnementale. Bien que la laveuse soit rudimentaire, la conception du site regorgeait d'astuces afin de réduire la consommation énergétique et l'empreinte environnementale du lavage. L'ensemble des installations avait été réalisé avec des moyens modestes en recourant largement à du matériel recyclé: mare de collecte de l'eau de pluie des bâtiments pour approvisionner le lavage, préchauffage de l'air du séchoir en sous-toiture, méthanisation des eaux de lavage avec production d'électricité, épuration des eaux de rinçage par lit de roseaux. Estimant que le lavage n'était pas rentable en petites quantités, [Greenfleece fiber](#) expédie maintenant les laines collectées localement à l'un des deux lavages industriels américain, [situé dans le Texas \(vidéo\)](#).^{xxxvi}



- Le lavage de Mountain Meadow Wool Mill (env. 100 kg/jour – 23 t/an) à Buffalo dans le Wyoming : la filature familiale a germé en 2002 dans le projet de 2 femmes et mères de familles accomplies (11 enfants à toutes deux) qui sonnait comme un défi : relancer la filière laine américaine dans ces grands espaces d'élevage du « Rambouillet » et contribuer au maintien des modes de vie et des traditions de ces petits ranchers, à la source du mythe américain du western ...
Des bergers basques sont arrivés en nombre d'Espagne et de France à la fin du XIX^{ème} pour s'installer dans les grandes plaines de l'Ouest. Beaucoup de ces ranchs historiques ont fermé au cours des vingt dernières années avec l'effondrement du prix de la laine et la disparition d'une filière laine américaine. Fondée en 2007, [la petite filature \(présentation et vidéo\)](#) valorise au prix le plus élevé les laines des ranchs locaux, parmi lesquelles les plus fines du pays, dans une approche environnementale et de partage des savoirs. Elle a [acquise une renommée nationale dans son engagement](#). Dès l'origine, l'entreprise a largement fait appel aux subventions dans les multiples aspects du projet. Ces fonds lui permirent notamment d'étudier la faisabilité du projet, de concevoir un prototype de la ligne de de

lavage et de faire l'acquisition de matériel d'occasion. La ligne de lavage en continu 5 bacs actuelle ([vidéo](#)) a été réalisée en autoconstruction. L'étude de la ligne de lavage, la collaboration avec l'université du Wyoming, la formation des opérateurs de la filature, la conception et l'expérimentation de modes de traitement des effluents, de récupération de la graisse de laine et des impuretés adaptés à l'échelle de transformation, ainsi que la réduction de la consommation en eau et en énergie ont déjà fait l'objet de trois programmes de subventions en [2006-2008](#), [2009-2010](#) et [2011-2014](#) avec rapports techniques à l'appui consultables en ligne. Mountain Meadow Wool ambitionne de poser les bases de petits lavages régionaux conformes aux exigences réglementaires environnementales américaines et adaptés en capacité et en rentabilité à des activités de transformation artisanale de 10-150 kg/jour, de sorte que les ranchs de petites et de moyennes tailles puissent diversifier leurs activités et augmenter leurs revenus en exploitant ces unités .

6 Analyse des voies de valorisation potentielles

La valorisation de la graisse de laine en lanoline semble attractive afin de tirer bénéfice d'une substance constituant une forte nuisance environnementale dans les rejets de lavage de laine. L'épandage mais aussi d'autres modes de valorisation des effluents de lavage sont pratiqués depuis longtemps dans des grands lavages de part le monde. Nous en ferons état et évaluerons l'intérêt et les limites de chacune d'entre elles dans notre contexte local.

6.1 L'extraction de la lanoline

Comme on l'a constaté tout au long de ce document, la graisse de laine constitue une forte nuisance environnementale dans les rejets de lavage de laine. Son extraction, si elle n'est pas prescrite par les autorités de régulation comme ce sera bientôt le cas pour les installations soumises à la directive IED (voir chap. 5.2.2), peut se justifier également lorsque la charge de pollution organique produite excède les capacités de traitement de la STEU à laquelle l'unité de lavage est raccordée ou pour limiter la redevance Pollution des eaux.

La séparation par centrifugation et la séparation chimique par craquage acide/floculation chimique de l'émulsion constituent 2 techniques classiques couramment pratiquées dans les lavages à l'eau (voir chap. 5.2.1). Les limites propres à chacune seront déterminantes selon l'objectif recherché et la nature des laines traitées.



Figure 5: Centrifugeuses à Lanás Trinidad en Uruguay

Principe de fonctionnement

Les centrifugeuses sont d'une conception similaires à celles utilisées en laiterie.

Description des boucles de récupération des impuretés et de la graisse BREF TEXTILE 2003 page 71, avec schémas Savage, pages 16-20^{xxvii} et dans Comprehensive view on chemistry, manufacturing & applications of lanolin extracted from wool pretreatment, pages 36-38^{xxiv}

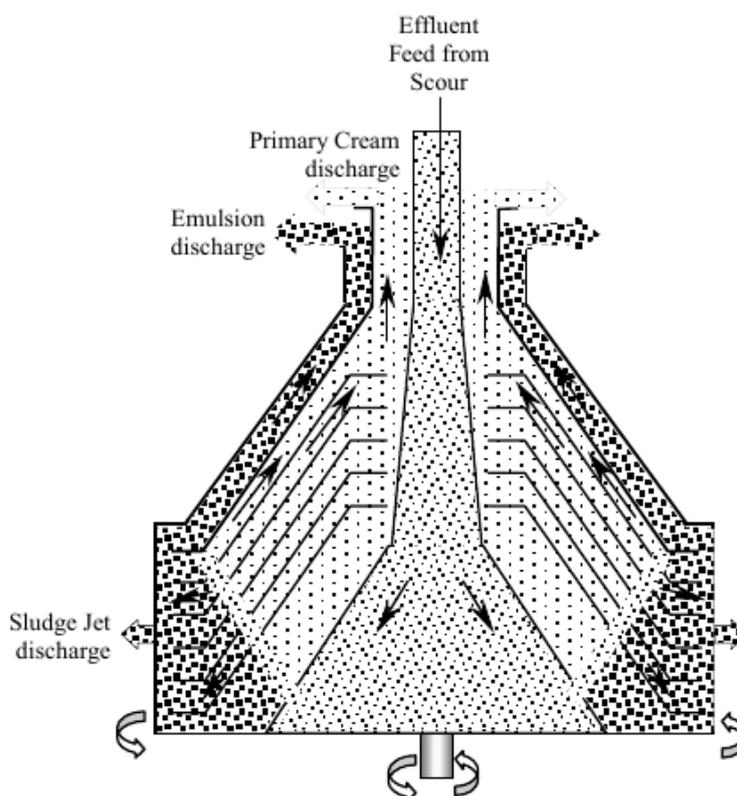


Figure 6: centrifugeuse primaire

Incidence de la nature des laines

1. Les laines grossières des Pyrénées sont par nature peu grasses, estimées à 5 % de graisse, soit plus de 2 fois moins que les laines mérinos (13 % pour les laines fines selon les hypothèses de BREF TEXTILE).
2. La graisse de laine dispersée dans les effluents de lavage se compose de deux fractions principales, généralement appelées graisse de laine «oxydée» et «non oxydée». Il a été démontré que la graisse de laine oxydée est associée à la pointe de la mèche de laine où la graisse est exposée à l'air et à l'environnement extérieur, tandis que la fraction non oxydée s'est révélée être plus présente à la base et au centre de la mèche laine. La fraction oxydée a une densité plus élevée, plus proche de la densité de l'eau. Elle est de ce fait plus difficile à séparer des effluents par centrifugation que la fraction non oxydée. Les laines grossières ont un ratio de graisse oxydées / graisses non oxydées plus grand que celui des laines fines. De ce fait, le rendement d'extraction de graisse de laine par centrifugation des effluents est plus faible pour les laines grossières.
3. La plupart des résidus de pesticides de la toison se fixent à la graisse de laine du fait de leur caractère lipophile. Leur toxicité est rémanente dans la graisse de laine après extraction, que ce soit par centrifugation dans les boucles d'épuration des bains ou par craquage à l'acide des effluents. (sources Kroening 2003^{xxvii} page 20, BREF TEXTILE 2003 page 74)

Des deux premiers points, il résulte un rendement en graisse de laine collectée nettement plus faible pour les laines grossières que pour les laines fines. De plus, la valeur marchande de la graisse de laine collectée par centrifugation dépendra largement de la teneur en pesticides.

« Suivant son degré d'oxydation, il peut être possible de récupérer 20 à 40 % de la graisse initialement présente dans la laine brute. Cette graisse récupérée doit être considérée comme étant un sous-produit plutôt qu'un déchet, étant donné qu'elle peut être vendue aux raffineurs de lanoline pour des produits à haute valeur ajoutée dans l'industrie cosmétique. Toutefois, des taux élevés de résidus de pesticides dans la graisse peuvent également présenter un problème pour les raffineurs de lanoline, en particulier pour la production de produits pharmaceutiques et cosmétiques à base de lanoline. Des techniques plus coûteuses et plus sophistiquées doivent être mises en œuvre pour réduire les pesticides à des niveaux acceptables.

La graisse craquée à l'acide n'a aucune valeur marchande et doit être éliminée en décharge. » (BREF TEXTILE 2003 page 75)

La quantité de graisse récupérée par les sociétés ayant fait l'objet de l'enquête INTERLAINE, vendable sous forme de sous-produit, se situe entre 10 et 35 g/kg de laine brute. La meilleure performance d'un laveur de laine de qualité fine est quasiment de 35 g/kg de laine brute, celle d'un laveur de laine grossière étant d'environ 13 g/kg. Ces taux de récupération représentent environ 25 % de la graisse que l'on estime être présente dans la laine à laver. (source BREF TEXTILE 2003, page 371)

Selon l'hypothèse établie précédemment pour les laines grossières des Pyrénées, un ratio de 5 % de graisse dans la laine en suint, cela représente un potentiel de $50 \text{ kg} \times 25 \% = 12,5 \text{ kg}$ séparable par centrifugation dans un lot de 1000 kg de laine en suint. Cette valeur est du même ordre que les quantités minimales de récupération de graisse prescrites dans la MTD 29 du BREF TEXTILE 2021 en préparation, présentée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 7: Niveaux d'Emission Associés aux MTD (NEA-MTDs) du lavage pour la récupération de la graisse de laine issue du pré-traitement de la laine brute par lavage (source BREF TEXTILE 2021 en préparation, page 742)

Type de laine	Unité	NEA-MTD (moyenne annuelle)
Laine grossière (fibre de laine de diamètre typiquement supérieur à 35 µm)	kg de graisse récupérée par tonne de laine brute introduite dans la ligne de lavage	11-15
Laine extra- et super-fine (fibre de laine de diamètre typiquement inférieur à 20 µm)		50-60

On constate également que le rendement des installations de récupération de graisse de laine est 4 à 5 fois supérieures pour les laines fines que pour les laines grossières. Ces valeurs seuils de récupération de graisse ont été établies sur la base des données collectées auprès de deux lavages du Royaume Uni et de deux lavages italiens.

[196] TWG, Data collection for the review of the TXT BREF, 2019.



Figure 7: <http://www.fibreshedmelbourne.com/tag/scouring/>

Graisse résiduelle dans les effluents après centrifugation

Le circuit d'élimination des impuretés et de récupération des graisses récupère 25% des graisses et élimine 50% des impuretés. On suppose que 10% de graisses supplémentaires sont éliminés de l'effluent sous forme de boues, avant rejet à l'égout. (Source BREF TEXTILE 2003 page 567)

On considère donc que près de 65 % de la graisse du lot de laine lavée est restée en émulsion après extraction (ratio de graisse de laine non oxydée notamment) et sera rejetée dans les effluents, soit $50 \text{ kg} \times 65 \% = 32,5 \text{ kg}$ graisse/tonne de laine des Pyrénées en suint. La charge de pollution associée à la seule teneur en graisse résiduelle de ces effluents représente encore $100 \text{ kg DCO/tonne laine en suint}^2$, soit, selon l'unité Équivalent Habitant en usage pour le traitement en STEU, une charge de 740 EH /tonne de laine en suint.

À cela il faudra ajouter la DCO associée au suint dans les effluents et aux 50 % d'impuretés résiduelles, voir paragraphe suivant.

Pollution résiduelle

Le circuit d'élimination des impuretés retirant également 50 % des impuretés en plus des 25 % de graisse, la DCO initiale de 315 kg/ tonne de laine des Pyrénées serait réduite dans les effluents par la boucle d'épuration à 203 kg/tonne de laine en suint des Pyrénées (voir Tableau 8), soit 1500 EH/tonne de laine en suint.

Traitement après extraction de la graisse de laine et épuration des bains

Selon les capacités de lavage envisagées et, en vis à vis, les capacités de traitement qui pourraient être accordées au lavage par la STEU, l'extraction par centrifugation pourrait être insuffisante en terme de dépollution et devrait alors être complétée par un traitement des effluents sur site, par exemple un dégraissage par floculation chimique ou craquage à l'acide. Le procédé Sirolan CF™ par exemple produit en continu une boue déshydratée à 55-65 % en retirant 96 %-99,9 % des solides en suspension dans les effluents et plus de 90 % de la graisse résiduelle non collectée rejetée sous forme d'émulsion.(Source : Savage, page 79)

De nombreux autres modes de traitement des effluents après récupération de la graisse par centrifugation sont possibles. Le Tableau 8 compare les performances de traitements par floculation et par évaporation combinés ou non à un circuit d'épuration des bains en graisse et impuretés.

² Règle de calcul de la DCO théorique selon la teneur en contaminants de la toison BREF TEXTILE 2003 page 73

Tableau 8: : Techniques de traitement des eaux usées : performance environnementale – laine grossière BREF TEXTILE 2003 page 568

Laine grossière Unité/t de laine brute	Evacuation vers le réseau urbain	Circuit impuretés /graisses	Floculat.	Circuit impuretés / graisses + floculat.	Evaporat.	Circuit impuretés /graisses + évaporat.
	A	B	C	D	E	F
Consommation nette d'eau (m ³)	13	6 ⁽¹⁾	13	6 ⁽¹⁾	13	6
DCO provenant de l'usine (kg)	299	203 ⁽³⁾	93 ⁽⁴⁾	81	0,6	0,5
DCO rejetée dans l'environnement (kg)	60	41	19	16	0,6	0,5
Boue à éliminer ⁽²⁾ - du circuit de recyclage (kg) - de la floculation (kg) - de l'évaporation (kg)		152	329	152 186	378	152 212

Source : [187, INTERLAINE, 1999]

⁽¹⁾ 2 à 4 l/kg sont possibles

⁽²⁾ Poids à l'état humide (50 % du poids sec)

⁽³⁾ L'élimination de 35 % des graisses et 50 % des impuretés dans le circuit fait abaisser la DCO de 315 kg/t dans la laine à l'entrée à 203 kg/t dans l'effluent

⁽⁴⁾ L'élimination de 89 % des graisses et 86 % des impuretés fait abaisser la DCO de 315 kg/t dans la laine à l'entrée à 93 kg/t dans l'effluent

Approche économique

Le Tableau 9 établit de façon approximative les gains directs (vente de la lanoline) et indirects (réduction des charges par l'épuration et le recyclage de l'eau du bain de lavage) que l'on peut en attendre. (source BREF TEXTILE 2003 chap. 4.4.1 Utilisation de circuits intégrés d'élimination des impuretés et de récupération de la graisse page 370.)

Tableau 9: Estimation des avantages économiques liés à l'installation de circuits intégrés d'élimination des impuretés et de récupération de la graisse. BREF TEXTILE 2003 page 372

Avantages par tonne de laine brute produite	Coût unitaire
Économie d'eau : 4 m ³	0,68 euro/m ³ d'eau du réseau
Économie d'énergie : 836,8 MJ ^(a)	0,00245 euro/MJ
Économie de détergent : 1 kg	1,40 euro/kg
Économie d'adjuvant : 1 kg	0,27 euro/kg de Na ₂ CO ₃
Traitement des eaux usées évité : 4 m ³	0,53 euro/m ³ d'eau évacuée ^(b)
Enlèvement de boue évité : environ 150 kg (poids net)	0,041 euro/kg de boue (poids à l'état humide)
Graisse produite destinée à la vente : - 32,5 kg (laveurs de laine de qualité fine) - 13 kg (laveurs de laine grossière)	2 euro /kg de laine brute ^(c) (toutefois très variable)
<p>Source [187, INTERLAINE, 1999] excepté ^(c), Communication personnelle IM. Russell</p> <p>Remarques :</p> <p>^(a) L'économie d'énergie pour chauffer l'eau à la température de traitement de 60°C peut être estimée à 209,2 MJ par m³ d'eau économisée (en utilisant le chauffage direct au gaz avec un rendement de 90 %).</p> <p>^(b) Coût au Royaume-Uni (1999), en examinant uniquement les coûts de l'installation. Dans un cas réel, il convient de prendre en compte l'énergie, les produits chimiques, la main-d'œuvre, etc.</p>	

Tableau 10: Coûts selon le choix du traitement de l'effluent pour une usine de lavage de laine produisant 3 500 t/an de laine grossière (source BREF TEXTILE 2003 page 572)

Élément du prix de revient	Technique de traitement de l'effluent					
	Rejet au réseau d'eaux usées urbain	Circuit impuretés / graisses	Floculation	Circuit impuretés/ graisses et floculation	Evaporation	Circuit impuretés / graisses et évaporation
<i>Coûts unitaires : en euros</i>						
Coût d'investissement initial	0	412 500	250 000	662 500	1 812 500	1 612 500
Coût d'investissement annuel	0	41 250	25 000	66 250	181 250	161 250
Frais d'exploitation annuels sur site	0	17 304	166 072	115 224	139 972	118 524
Coût annuel d'enlèvement de la boue (50 % poids à sec)	694 515	413 775	181 982	133 450	28 881	14 900
Coût annuel d'évacuation de l'effluent	694 515	413 775	181 982	133 450	28 881	14 900
Coût total annuel	694 515	494 121	420.359	363 422	475 948	387 250
Coût /tonne de laine	198	141	120	104	136	111
VAN de la marge brute d'autofinancement sur 10 ans (a)	6,1	4,4	3,7	3,3	4,4	3,6
Source : [187, INTERLAINE, 1999] (a) Valeur Actualisée Nette de la marge brute d'autofinancement sur 10 ans à un taux d'intérêt de 3 % en millions.						

Le Tableau 10 donne quelques indications concernant les coûts comparés d'investissement et d'exploitation d'une boucle de séparation en continu des impuretés et de récupération de graisse en comparaison avec d'autres modes de traitement des polluants. Les coûts sont établis sur la base d'équipements adaptés à un lavage de 3 500 t/an. Un tableau équivalent pour un lavage de 15 000 t/an peut être consulté en BREF TEXTILE 2003 page 573. Les hypothèses de calcul, le niveau d'efficacité des différents modes de traitement des effluents ou de leurs effets combinés et le détail de l'étude doivent être consultés dans BREF TEXTILE 2003 – chap. 4.10.10

Traitement des eaux usées générées par les installations de lavage de la laine - page 566). BREF TEXTILE en déduisait un retour sur investissement de 2-4 ans pour cette catégorie de lavage.

Il serait utile d'évaluer comment ces choix techniques et investissements pourraient s'adapter à de capacités de lavages plus modestes - par exemple pour les lavages d'une capacité journalière plus proche du seuil bas de 500 kg/jour (200-300 t/an) de la directive IED, soit au moins 50 fois inférieures aux hypothèses de BREF, et être réactualisés, constatant que les données collectées ont maintenant plus de 20 ans (enquête INTERLAINE 1999). Pour sa part, la petite filature américaine Mountain Meadow Wool expérimente avec plus ou moins de succès une alternative à la centrifugeuse, un écumeur à bande (belt skimmer) semble-t-il, dans le bac de décantation des eaux de lavage (voir les rapports de Mountain Meadow Wool cités en liens à la fin du chap. 5.2.4).

Le cas de Traitex

Traitex à Verviers, près de Liège, constitue la plus grande unité continentale de lavage de laines européennes et la seule unité de carbonisage de l'Europe de l'Ouest. D'une capacité de lavage de 18 tonnes/jour (5000 t/an), Traitex a cessé de collecter la graisse de laine depuis 2001, considérant alors que ce n'était pas une opération rentable. Le lavage est spécialisé en laines d'Europe, beaucoup moins grasses et offrant des rendements à l'extraction de la graisse de laine plus faibles que ceux des laines fines de l'hémisphère sud.

6.2 La méthanisation

Les processus biologiques de traitement des effluents de lavage de laine ont été largement pratiqués depuis longtemps par les unités industrielles. On distingue les processus biologiques associés à un développement bactérien décomposant les effluents,

- soit en conditions anaérobies, c'est à dire en l'absence d'oxygène, ou anoxiques, en oxygène raréfié.
- Soit en conditions aérobies, alors entretenus par l'oxygénation de l'eau.

Dans ces milieux, les « consortiums bactériens » spécifiquement aérobies ou anaérobies, constituent en symbiose des chaînes de transformation organiques que l'on trouve dans la nature et que l'on peut recréer dans des domaines variés. La fermentation et le compostage en sont des exemples. La méthanisation est une forme de fermentation anaérobie. Les processus biologiques de méthanisation mettent en œuvre une grande diversité de bactéries spécialisées dans une chaîne de transformation qui permet de dégrader progressivement la matière organique en composés carboniques les plus simples qui soient, le gaz carbonique et le méthane et en autres composés selon la nature de l'alimentation et du processus. Le biogaz ainsi produit peut être valorisé en tant que source d'énergie.

Le lagunage anaérobie

Le lagunage constitue l'un des modes de traitement les plus simples dans son principe combinant un bassin d'entrée des effluents anaérobie puis des bassins aérobies. Alors que le processus aérobie est déficient sur les effluents les plus chargés, faute d'une oxygénation du milieu suffisante, le processus anaérobie appliqué en traitement primaire permet d'obtenir des réductions de COD significatives (> 92 % au lavage Lanac Trinidad). Efficace à partir de 15°C et performant au-delà de 25°C, le lagunage anaérobie fut largement employé pour des lavages implantés dans des régions chaudes, combiné à un ensemble de bassins aérobies ou des écosystèmes poursuivent le processus de traitement jusqu'au relargage de l'eau dans l'environnement. Le lagunage nécessite

toutefois de grandes superficies dans des lieux isolés du fait des émanations nauséabondes associées aux processus anaérobies et un entretien régulier du fait des boues résultant du traitement des effluents. Le méthane produit est diffusé dans l'atmosphère. Le méthane est un gaz à effet de serre, il est probable que le lagunage des eaux industrielles à forte charge soit règlementé pour en limiter les émanations. Il est possible de couvrir le bassin anaérobie afin d'éviter les nuisances olfactives de sulfure d'hydrogène et pour collecter le biogaz en tant que coproduit du lavage de la laine.

C'est l'opération qui fut réalisée en 2012 au lavage-peignage Lanac Trinidad en Uruguay, 10 000 t peigné/an, 300 m³/jour d'effluents à 53 kg DCO/m³ de moyenne, pour collecter 3000 m³ biogaz/jour à 70 % méthane afin de produire 600 kW d'électricité en cogénération et de restituer la chaleur issue des génératrices pour chauffer le digestat du bassin anaérobie (coût 9 million US\$)^{xxxviii}. On estime à 2000 t boues sèches/an les quantités de boues produites dans le bassin anaérobie, collectées régulièrement et traitées par voie aérobie en épandage à proximité de la station de traitement en tant que fertilisant.

digesteur anaérobie

La digestion anaérobie a été largement documentée en tant que processus de traitement des effluents de lavage de laine. Lorsque le lagunage n'est pas possible, en périphérie urbaine par exemple, la fermentation en digesteur anaérobie est une solution adaptée au traitement d'effluents industriels. Elle offre également l'avantage de produire moins de boues, environ 5 fois moins, et consomme moins d'énergie que les processus anaérobies lorsqu'il faut en forcer l'oxygénation.

Les recherches en laboratoire menées à partir des années 80 ont révélé la grande difficulté à dégrader les effluents de lavage par voie anaérobie. Elles mettaient en évidence des processus de biodégradation particulièrement lents, typiquement des temps de rétention des effluents dans le digesteur de 10-20 jours^{xxxix}, une dégradation incomplète de la graisse de laine (env. 50%) et une inhibition des processus de méthanisation, c'est à dire à des productions en méthane faibles en regard de la charge organique exprimée en COD et estimées à 0,20 l méthane/g DOC. En contrepartie, cette inhibition offrait une plus grande robustesse des processus de méthanisation à des charges élevées d'effluents, alors que c'est une source de panne par acidification dans les digesteurs classiques lorsqu'ils sont surchargés avec des composés facilement fermentescibles. La composition des effluents de lavage de laine, l'émulsion, la mousse, les impuretés solides en suspension et la graisse, constitue une alimentation inadaptée à certains types de digesteurs à haut rendement, occasionnant des colmatages par exemple et autres défaillances.

La nécessité de long temps de séjour des effluents impose des digesteurs de grande capacité, ce qui a constitué un frein au développement de la méthanisation des effluents de lavage de laine (Wipa Charles, 1994, pages 39-43)^{xl}.

La voie anaérobie ne fut pas délaissée pour autant dans son application à réduire la charge en DCO des effluents. La fermentation anaérobie a fait l'objet de nombreuses recherches en laboratoire et à échelle pilote dans la mise au point de procédés de floculation biologique permettant une amélioration de la floculation chimique pour éliminer la graisse de laine et les impuretés en émulsion dans les effluents. Ici, le temps de séjour est trop court (2-3 jours) et les conditions plutôt anoxiques (en oxygène raréfié) pour que la chaîne de dégradation n'aboutisse à la phase ultime de méthanogénèse, la production de méthane obtenue est donc faible et sans intérêt. L'objectif recherché est la déstabilisation de l'émulsion avant floculation. Les performances obtenues sont de l'ordre de réductions de 87 % COD et 93 % graisse (Pelàez 2001)^{xli} ou 98 % graisse (Enco, 2004)^{xlii} en application à Punta Arenas, Standard Wool Chili (unité de traitement 0,75 millions US \$, voir chap.5.2.2). Le volume du digesteur est réduit du fait d'un temps de séjour plus court, 2-3 jours, par rapport à ce qui serait nécessaire pour méthaniser les effluents.

Traitement des effluents et production de biogaz pour un lavage de 90t/an

L'université du Wyoming réalisa une étude en 2012 pour la filature de Mountain Meadow, citée à la fin chap. 5.2.4, pour évaluer la faisabilité à traiter en méthaniseur les effluents d'un lavage de petite capacité (90 t/an) et de collecter le biogaz en tant que co-produit du lavage.^{xliii}

Les expérimentations menées en laboratoire confirmèrent les résultats de différentes études déjà citées et laissent espérer des performances supérieures par un enrichissement progressif des consortiums microbiens en cours d'exploitation. Les effluents se sont révélés biodégradables à 17-75 % selon la concentration initiale et le Test de Potentiel Méthane (BMP) évalué à 0,10–0,39 l méthane/g DOC d'effluents ajouté. La charge des effluents fut réduite de 72 et 78 % DCO et l'acidité du processus se révéla stable.

Le biogaz produit pendant le traitement anaérobie peut être appliqué au chauffage des bains de la ligne de lavage. La faisabilité économique du traitement anaérobie s'accroît avec l'augmentation de l'efficacité d'élimination de la DCO, du prix du gaz naturel énergie et du coût des taxes de traitement en STEU.

Selon l'hypothèse plancher des rejets quotidiens de 11 m³ d'effluents à 15 000 mg DCO/l, le traitement en digesteur à un taux de réduction de 84 % de la DOC (un taux légèrement supérieur à celui obtenu pendant les essais) serait associé à la production de 100 m³ méthane/jour, soit 15 % de l'énergie nécessaire au chauffage des mêmes quantités d'eau nécessaires à la ligne de lavage pendant 6 heures.

L'étude de faisabilité intègre l'investissement et les coûts de fonctionnement du méthaniseur, la réduction du coût de décharge des effluents en STEU octroyée par le traitement sur site et le bénéfice offert par la production de méthane en comparaison à la consommation de gaz naturel pour la chaudière de la ligne de lavage.

Selon l'ensemble des hypothèses posées et les différents scénarios envisagés, l'analyse démontre que le traitement anaérobie des effluents de lavage de laine avec récupération du biogaz peut être avantageux pour un lavage de petite capacité.

6.3 Le compostage et l'épandage

- Le lavage de la laine et son traitement des effluents est producteur de boues. Les boues proviennent de la décantation des souillures de la toison au cours du lavage, du processus d'élimination chimique ou biologique de la graisse de laine et des impuretés ou d'un processus de traitement des effluents. Les quantités produites varient selon le mode de traitement (voir Tableau 8).
- *Le suint étant riche en potassium et en nutriments organiques (voir Tableau 5), le concentré issu d'un processus d'évaporation, utilisé après l'élimination de la graisse et de la saleté, est un engrais organique concentré renouvelable pouvant être ajouté au pâturage via des systèmes d'irrigation (Savage, page 21^{xxxvii})*

6.3.1 le compostage

On estime que le compostage est un moyen viable pour l'élimination des boues générées par le lavage de la laine, tout en permettant un enrichissement des sols pauvres. Le carbone, décomposé par le compostage, est converti par aérobiose en dioxyde de carbone, plutôt qu'en méthane (ce qui est le cas en décharge). Le dioxyde de carbone est un gaz à effet de serre beaucoup moins puissant que le méthane.

Pour les boues de lavage de laine, le but du compostage est de détruire, dans la mesure du possible, les composants des boues qui ne seraient pas souhaitables en cas d'épandage sur les terres agricoles. Il s'agit principalement de graisse de laine et de résidus d'ectoparasitocides. Les composts produits à partir de mélanges contenant de la graisse de laine doivent donc être périodiquement contrôlés pour la teneur en graisse de laine et en ectoparasitocide.

A l'occasion de tests de compostage réalisés au Royaume-Uni, le compostage durant 6 à 7 semaines en andain d'une capacité de 10 tonnes, et le compostage pendant 14 jours sous tunnel fermé, ont apporté des résultats similaires. La réduction de la teneur en graisses et en ectoparasitocides organochlorés et pyréthroides synthétiques du compost était de 60 %, celle en ectoparasitocides organophosphorés étant de 80 %. On s'attendait à des réductions supplémentaires après la phase de maturation, qui n'ont toutefois pas été contrôlées [187, INTERLAINE, 1999].

Le marché du compost est incertain. Selon le rapport de l'Association des industriels du compostage du Royaume-Uni, aucun centre n'est capable de récupérer ses frais par la vente du compost. En effet, la plupart des centres ne perçoivent aucun paiement pour leurs produits.

(source BREF TEXTILE 2003, pages 574-577)

Tableau 11: Durée de compostage et de maturation, coûts d'investissement et du traitement pour trois types d'installations de compostage en cuve (source BREF TEXTILE 2003)

Système	Durée de compostage jours	Durée de maturation jours	Coût d'investissement euros/10.000 t/an	Coût du traitement euros/t
En caisson	7 à 36	0 à 120	450 à 2 250K	9 à 75
En conteneur	10 à 20	30 à 100	450 à 1 500K	15 à 45
Sous tunnel	6 à 30	0 à 56	75 à 3 000K	9 à 45

Source :
[187, INTERLAINE, 1999], à savoir "The Composting Association, Royaume-Uni"

Dans sa thèse, *Biodegradation and composting profiles of woolscour wastes*, 2003, S Kroening^{xxvii} a étudié et mis au point la technique de compostage avec de la sciure incorporant les boues de floculation, la biomasse du traitement aérobique CFB et les déchets de l'ouvreuse de laine en suint tel que présenté dans la Figure 8. Il rapporte les expérimentations réalisées en conditions réelles en Nouvelle Zélande. Le composteur utilisé est un tambour rotatif RotoCom de Andar, [distribué en Italie](#)

5. The composting of woolscour wastes	page 141
5.1. The Rotocom Composting System	page 141
5.2. Composting Trials at the Ashburton Woolscour	page 142
5.3. Case Study: Composting of Kaputone Woolscour Sludge	page 167

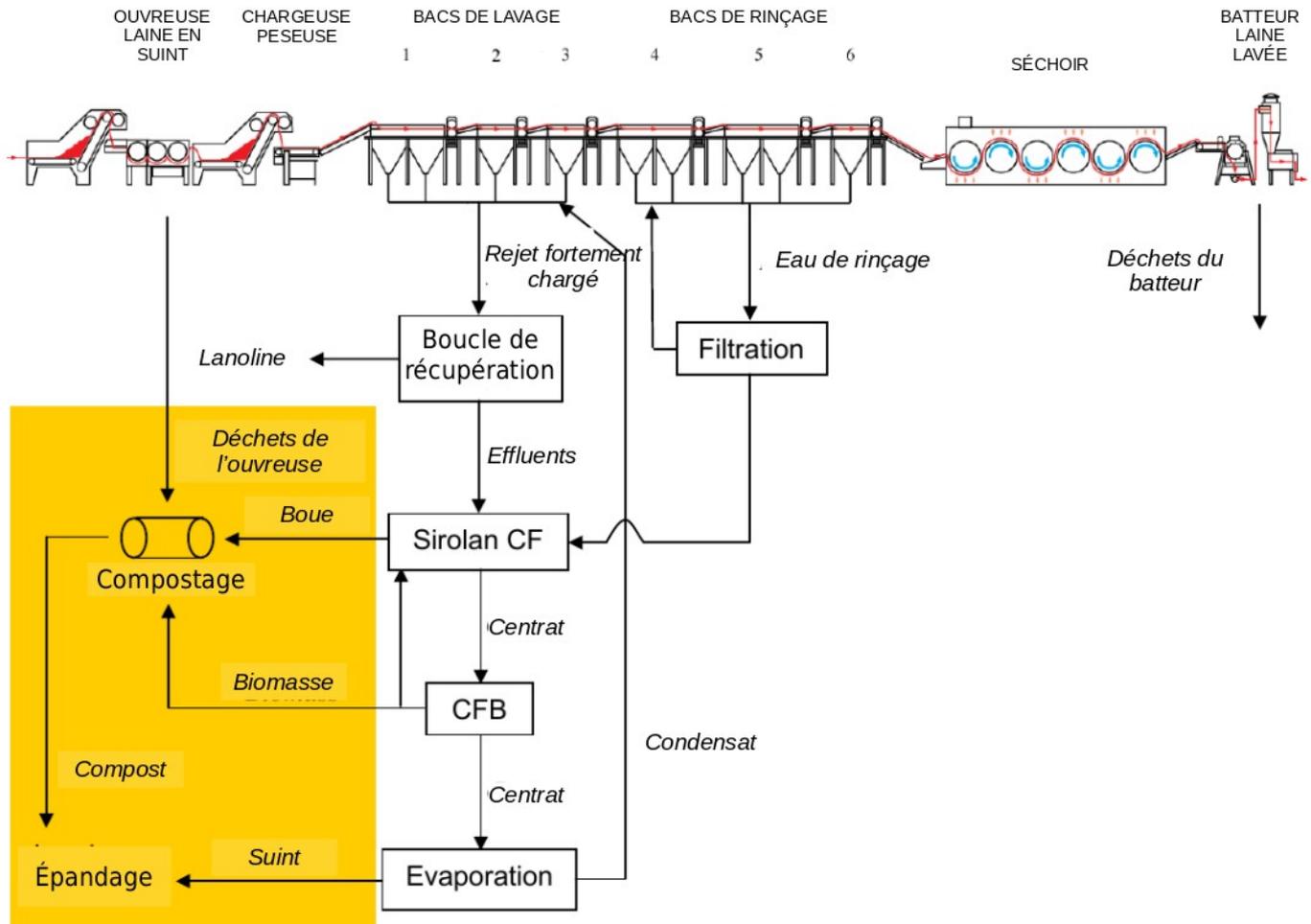
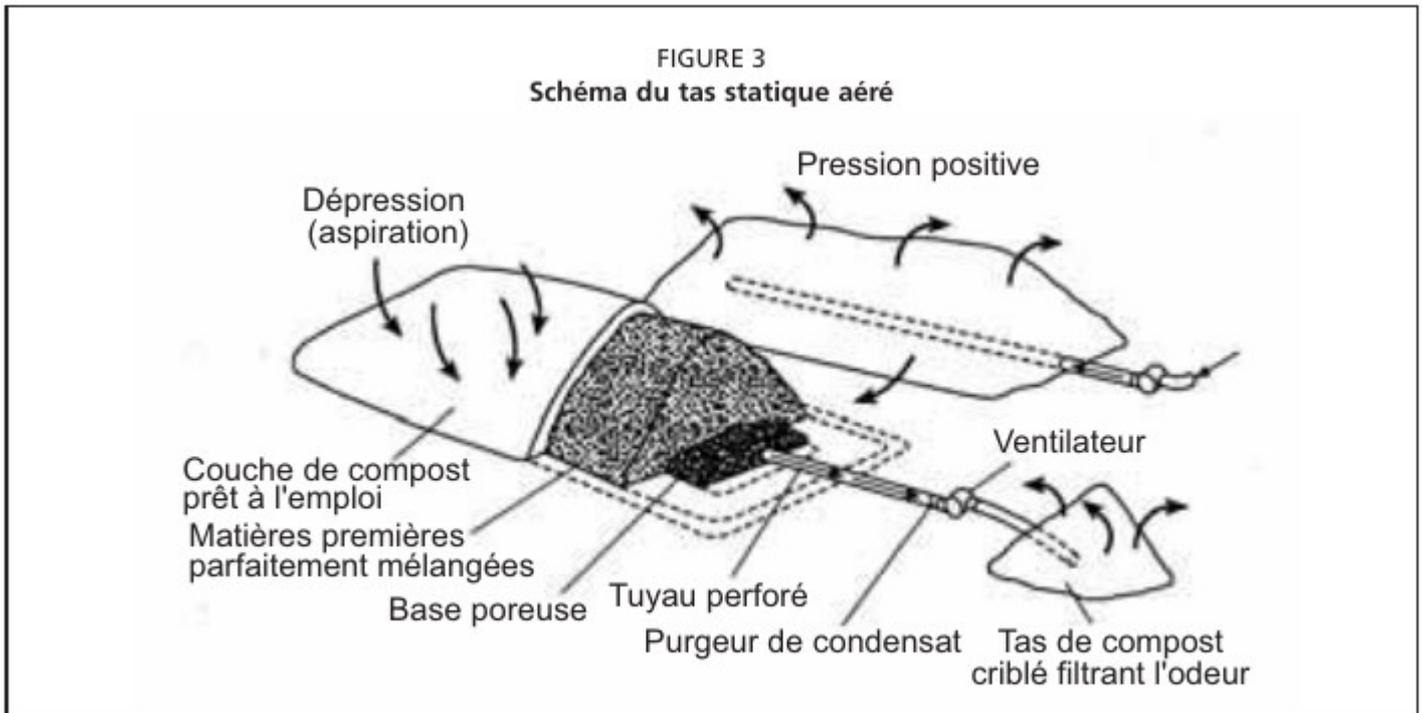


Figure 8: Exemple de schéma de gestion des rejets d'un lavage de laine (Kroening^{xxvii}, 2003, page 172)
Description du traitement Sirolan® par floculation chimique CF et aérobie CFB (Kroening, 2003, page 15)

Un chantier de bio-rémediation fut également conduit et documenté par S Kroening en 2007 sur un site de lavage récemment fermé (2005) à Ashburton^{xliv}. L'opération consistait à traiter sur place les env. 1700 m³ de boues sèches et grasses d'un ancien lagon de traitement des eaux de lavage. Les boues analysées avant compostage avaient une teneur de 20 % en poids de graisse de laine. Le mélange boue : matière ajoutée fut réalisé dans une proportion de 1 :2,5 en volume, variable selon la teneur en humidité de la boue afin d'obtenir la consistance désirée. L'apport en matière extérieure était constitué de compost de déchets verts et de compost réalisé avec des tontes de pelouses et du gypse. Le mélangeur de compostage NexGen d'une capacité de 4 m³ inoculait également en spray des Micro-organismes Efficaces EM® (3 l/ lot 4 m³) afin d'activer encore le compostage et de réduire les odeurs. À défaut d'accès à un point d'eau sur site, les andains de compostage étaient retournés en bénéficiant des épisodes de précipitations. La graisse de laine n'était plus observable après 4 semaines, observations confirmées par les analyses.

Une autre étude présente un compost réalisé avec la technique du tas statique aéré en mélange avec des déchets verts au Royaume Uni en 2007^{xlv} Les ratios de boues pour déchets verts étaient de 1:0,76 en poids et 1:2 en volume.



Source: NRAES-114, 1999.

Un document de 2008, [Les dispositifs de compostage électromécanique de petite capacité](#), analyse les équipements de compostage de petite capacité et leur coût

6.3.2 Épandage

Cas de deux lavages de capacité d'env. 200 t/an

- Le lavage de Souvigny (voir chap. 5.2.4) pratiquait l'épandage des eaux et boues de lavage de 2003 à 2012 dans les prés de son gérant avec une tonne à lisier. L'opération faisait l'objet d'un plan d'épandage et n'y avait pas de dégraissage préalable des effluents. Les eaux de rinçage étaient rejetées à la STEU. C'est une situation que je n'ai pas retrouvée dans toute la documentation parcourue.
- Jenny Anderson, du lavage Ullkontoret sur l'île de Gotland (voir chap. 5.2.3) mentionne dans *Laver la laine—Scouring Wool* pages 82-83 que l'épandage se fera sur leur terres autour du lavage après dégraissage des effluents.

Dans un lavage industriel de plusieurs milliers de tonnes/an, les effluents après dégraissage par floculation sont encore chargés du suint des toisons très soluble dans l'eau. Les éventuelles traces de pesticides, généralement lipophiles, ont été séparées des effluents avec la graisse de laine dans les traitements précédents. Il reste donc un effluent chargé de potassium et de nutriments intéressants pour l'irrigation des cultures.

Le Tableau 5 présente la composition d'un effluent de ce type après floculation CF puis traitement aérobie CFB et évaporation (procédé Andar) afin de le concentrer comme présenté dans la Figure 8. Dans *Biodegradation and composting profiles of woolscour wastes*^{xxvii}, Kroening étudie le suint concentré en chap 3 pages 57-89 et l'expérimentation réalisée en agroforesterie.

7 Conclusions et alternatives

Ce document a tenté d'aborder la question environnementale du lavage dans sa globalité, en progressant dans son développement autant que possible sans préjuger de la dimension d'un projet d'installation. Il est clair que la majorité des études et de la littérature scientifique disponibles sont orientées vers des problématiques et des solutions liées à des lavages en continu de grandes capacités, traitant des milliers de tonnes/an.

Le lavage à l'eau, alors qu'il est praticable à très petite échelle avec des moyens très modestes, présente dans son essence et selon ses variantes les nuisances qui occasionnent rapidement des problèmes de consommation d'eau et de rejets, puis des problèmes environnementaux lorsque l'on change d'échelle. La concentration des capacités de production conduit à la raréfaction des sites, à une débauche de technologie et d'ingénierie pour séparer des bains et gérer en un même lieu les contaminants d'une multitude de toisons d'origine parfois lointaine. Est-il pensable que ces laines une fois lavées retournent vers leurs territoires d'élevage pour poursuivre une valorisation locale sans y dénaturer la notion de « local » ?

La réglementation environnementale vertueuse de l'Europe accueille sans conditions les productions réalisées hors de ses frontières, parfois avec les mêmes équipements de lavage de ceux qu'elle avait sanctionnés, qui furent démontés ici puis remontés là-bas, dans un cadre réglementaire plus tolérant. Les modèles mêmes qui furent promus dans l'élaboration de la réglementation ont disparu. On pourrait à ce jeu identifier les lavages de laine étudiés dans l'enquête Interlaine 1999 ayant servi de base à l'élaboration des bonnes pratiques - Meilleures Techniques Disponibles - du BREF TEXTILE et constater combien de ces lavages existent encore à ce jour. Alors que la cause environnementale est juste, nécessaire, pressée par le changement climatique et l'épuisement des ressources en eau et en énergie, qu'elle est portée par un élan citoyen, la solution promue par l'Europe peut être inadaptée à la relocalisation de la filière laine.

Incidentement, c'est un changement d'échelle de responsabilité qu'il faut opérer, cesser de se décharger, au propre comme au figuré, sur des lieux de transformation lointains, pour certains, de plus en plus rares, encore dans les frontières européennes et strictement encadrés par notre réglementation selon un modèle technique éprouvé, pour d'autres hors de notre vue, encadrés selon les lois du marché.

Il reste encore un champ d'expérimentation moins contraignant, moins rigide dans sa mise en œuvre, pour les capacités de lavage inférieures à 500 kg. Il faudra sans doute l'explorer afin d'y concevoir et d'y construire les fondements de filières locales de bout en bout, de l'élevage au produit fini, de la toison au recyclage du produit fini, y compris dans la gestion des contaminants de la toison.

Certaines initiatives en Europe ou aux États-Unis citées dans cette étude vont dans ce sens. Elles méritent d'être approfondies et soutenues par des partenariats, par le partage d'expériences et de connaissances.

Une autre approche, complémentaire peut-être, consistera à explorer des alternatives, basées sur un autre principe que le lavage à l'eau dont on a constaté les nuisances et les impacts économiques.

Voici deux voies bien différentes de lavage qui mériteraient attention :

- L'une est basée sur le principe connu de solubilisation de la graisse de laine dans un solvant non polaire. La mise au point d'un nouveau procédé est achevée et attend sa phase d'expérimentation semi-industrielle.
- La seconde voie est une voie d'investigation, fondée sur le postulat suivant : il est possible de nettoyer des toisons peu grasses par des processus biologiques, sans ajout de détergent ou d'alkali.

7.1 Lavage par solvant

Alors que les considérations environnementales n'avait encore que peu d'incidences dans les choix industriels, le lavage par solvant est longtemps resté marginal, probablement par sa relative complexité et ses investissements. Il est largement rattrapé aujourd'hui en complexité et en coût par les colonnes de lavage à l'eau modernes, indissociables de leurs systèmes de séparation et recyclage intégrés et de leurs équipements de traitement des effluents.

7.1.1 Quels avantages ?

Il faut bien le reconnaître, la perception immédiate que l'on peut avoir des solvants, leur volatilité et leur odeur caractéristique, leur éventuelle inflammabilité, les symboles de mise en garde, les risques insidieux et souvent mal connus, les préconisations d'emploi, les équipements de protection adaptés et les mesures à prendre en cas d'inhalation, de projection ou d'ingestion figurant sur les emballages, nous incitent à une grande méfiance dans leur utilisation.

Alors comment voir dans un lavage par solvant une solution plus écologique qu'un lavage à l'eau ?

- Par la séparation de la graisse de laine, première source de pollution des effluents du lavage à l'eau :

- Dans un lavage à l'eau, la graisse est mise en émulsion dans des quantités d'eau chaudes importantes dans les bains par kg laine traité, dont il sera ensuite difficile de séparer la graisse par extraction partielle (valorisable par centrifugation 20-40 %) et traitement des effluents. Dans un lavage par solvant, les quantités de solvant sont faibles par rapport aux quantités de laine en suint à traiter et la solution concentrée graisse + solvant sera séparée par évaporation-condensation (valorisable à 90 %).
- L'énergie requise est plus faible pour le lavage par solvant (essentiellement gazéification/liquéfaction) que pour le lavage à l'eau (essentiellement chauffage des bains), tout à la fois par la chaleur spécifique et latente du solvant plus faible que celle de l'eau et par les quantités en kg solvant ou eau/ kg laine en suint traité, en faveur du solvant.
- Au final une économie en moyens et en consommation pour l'extraction de la graisse de laine par solvant (rapide et presque en totalité, 90%) par rapport à une extraction par différents procédés, physiques (centrifugation 20-40%) puis physico-chimiques et biologiques lors du traitement des effluents (sans valorisation de la graisse de laine).

Le principe d'un lavage par solvant comporte des similitudes avec un lavage à l'eau avec recyclage de l'eau dans ses processus : il y a deux circuits bien distincts, la ligne de lavage de la laine et la boucle de traitement et de recyclage du solvant :

- La ligne de lavage comporte schématiquement un bain destiné à séparer les contaminants solubles de la laine dans le solvant liquide puis un essorage et/ou une évaporation du solvant de la fibre. Selon le procédé de lavage par solvant, un lavage à l'eau peut ensuite être nécessaire pour libérer les contaminants de la toison insolubles dans le solvant qui sont encore dans la laine, notamment le suint et la saleté, solubles dans l'eau. Toutefois ce lavage est léger puisque la laine est dégraissée et le suint très soluble dans l'eau. Des battages permettent de dépoussiérer la laine dès le dégraissage, opérations facilitées car ces matières ne sont plus agglutinées aux fibres par la graisse.
- La boucle de traitement et de recyclage du solvant : le solvant du bain, chargé de la graisse de laine et de tout autre composé solubilisé, doit être épuré et recyclé. Cette opération est pratiquée par évaporation du solvant où la graisse de laine non vaporisée sera recueillie avec les autres résidus solubles et insolubles emportés avec le solvant au cours de la phase de lavage. Le solvant épuré retourne vers le bain.
- Le lavage par solvant offre une séparation efficace de chacun des contaminants et se prête à leur valorisation ou à un traitement différencié.

7.1.2 Quelques procédés

Alors que le lavage par solvant a plus d'un siècle^{xlvi}, la diversité des procédés développés récemment montrent différentes approches pour gérer les difficultés et les risques associés à ce mode de lavage selon le choix du solvant utilisé :

Plusieurs procédés différents ont atteint le stade de prototype commercial dans les années 50 à 70 sans obtenir un succès commercial significatif. Ceux-ci comprenaient un procédé développé à l'Institut suédois de recherche textile,^{xlvii} le procédé par jet de solvant CSIRO^{xlviii} et un procédé développé dans le Yorkshire à West Riding Woolen and Worsted Mills Ltd.^{xlix} Les procédés suédois et CSIRO utilisaient tous deux une coupe pétrolière au point d'ébullition, tandis que le procédé du Yorkshire utilisait du tétrachloroéthylène.

La technologie de lavage au solvant la plus réussie est le procédé de Smet, avec sept usines en exploitation commerciale en 1990ⁱ. Elle utilise une combinaison de solvants non polaires (hexane) et polaires (alcool isopropylique) pour cibler l'élimination de la graisse et de la suint de la laine, respectivement. Cependant, les résultats acceptables obtenus pour l'usine de Smet lors des tests comparatifs des performances de la laineⁱⁱ ne lui octroyèrent que peu de succès commercial dans les années 90ⁱ. Le coût d'investissement élevé d'une telle installation constituait un frein par rapport à une installation aqueuse conventionnelle, pendant une période de faible rentabilité dans l'industrie de la laine en général.

Un nouveau type de lavage au solvant fut mis en service au Japon en 1983: il s'agissait du procédé Toa-Asahi et le solvant utilisé était le 1,1,1 trichloroéthane. La laine était dégraissée au solvant, dépoussiérée et ensuite lavée au savon / soude classique pour éliminer la suint et la saleté résiduelles. Une seule usine a été installée et a cessé de fonctionner. Une partie du problème avec ce procédé était que le solvant choisi à la fois appauvrit l'ozone et est un gaz à effet de serre.ⁱⁱⁱ Historiquement, les coûts d'investissement élevés ont milité contre l'installation de systèmes de lavage au solvant. De plus, comme la plupart des investissements dans le lavage au cours des années 90 ont été consacrés à la modernisation ou à la délocalisation d'usines plutôt qu'à des installations «nouvelles», les possibilités de changement radical de technologie ont été limitées. Une exception concerne la technologie de lavage au solvant de Wooltech Ltd, de Brisbane, Australie,ⁱⁱⁱⁱ qui développa un système utilisant une formulation de 1,1,2 trichloréthylène (TCE). Ce solvant est ininflammable et n'épuise pas l'ozone, car il se dégrade chimiquement avant d'atteindre la couche d'ozone. Cependant, le TCE est toxique pour l'homme et nécessite une manipulation appropriée, comme décrit dans les fiches de données de sécurité (FDS) disponibles en ligne. Une usine de fabrication à grande échelle comprenant un système complet de lavage au solvant Wooltech a été installée à Trieste en Italie à temps pour l'exposition ITMA de 1995 à Milan. (...) Comparé aux équipements de lavage aqueux conventionnels, qui sont simples, robustes et qui ont une longue durée de vie, les équipements de lavage au solvant sont beaucoup plus sophistiqués et nécessitent une approche de génie chimique pour son fonctionnement. Cependant, si l'usine de lavage à l'eau a un système complet de traitement des effluents ajouté pour se conformer à des réglementations environnementales strictes, les niveaux de sophistication technique sont similaires. (Source Wool Science and Technology , pages 45-46) 2002^{liv}

7.1.3 Lavage par solvant et IED

La filature Wooltech bénéficia de 26 millions d'euros de la région et de la CCI Frioul-Vénétie Julienne^{lv} pour son implantation dans le porc franc de Trieste en 1995. Elle exploita le dernier lavage par solvant en Europe jusqu'en 2005^{lvi}.

Le processus de Wooltech est cité comme technique de références aux MTD dans BREF TEXTILE 2003 :

- Il est décrit au chap. 2.3.1.3 Lavage en milieu solvant pages 76-80
- Les effets sanitaires et environnementaux basés sur les données Wooltech sont présentés au chapitre 2.3.1.4 Questions environnementales associées au lavage de la laine avec un solvant organique pages 79-80
- Le lavage par solvant est mentionné comme MTD en 5.2.1 Lavage de la laine pages 585-586 :
« Le lavage de la laine peut être réalisé en milieu aqueux (le cas le plus courant) ou avec un solvant organique. Les deux procédés sont définis comme étant des MTD, sous réserve de respecter un certain nombre d'exigences.

Lavage au solvant organique

Le lavage au solvant organique constitue une MTD, à condition de mettre en œuvre les mesures décrites dans la section 2.3.1.3 pour diminuer les émissions volatiles et éviter toute pollution éventuelle de la nappe phréatique, diffuse ou accidentelle. »

Toutefois, le contexte réglementaire et sanitaire a évolué depuis la publication de BREF TEXTILE 2003, de telle sorte que le procédé Wooltech ne pourrait plus être exploité aujourd'hui. En effet, le 1,1,2 trichloréthylène est classée SVHC (substance extrêmement préoccupante) et inscrit à la liste XIV du règlement européen REACH concernant les substances dangereuses. La substance est interdite en Europe et soumise à autorisation depuis le 21 avril 2016. De ce fait, mais également parce qu'il n'y a plus de lavage de laine par solvant à ce jour, le groupe de travail de BREF TEXTILE 2021 en préparation a conservé mais biffé (avant de l'exclure) toute référence au lavage par solvant dans le document de travail dans les chapitres 2.3.1.3 [Cleaning and washing with solvent] pages 38-40 et 2.3.1.4 [Environmental issues associated with wool scouring (with organic solvent)] page 40 et supprimé le lavage de la laine par solvant des MTD. Cela n'exclut pas la possibilité d'implanter un lavage par solvant en Europe, mais celui-ci devra présenter des émissions industrielles équivalentes ou meilleures que celles citées dans les futures MTD TEXTILE consacrées au lavage de la laine.

Wool Dry Scouring

Le projet *Eco-Efficient Wool Dry Scouring With Total By Products Recovery* a été conduit sze 2012 à 2016 en Espagne avec la collaboration du LEITAT et de l'Instituto de Química Avanzada de Cataluña (IQAC), centres de recherche, de RMT partenaire industriel et du lavage de laine Manuel Rodrigues Tavares STMRT au Portugal. Le projet Wool Dry Scouring (WDS) consistait à concevoir un nouveau procédé de lavage par solvant, basé sur un traitement en boucle fermée et une valorisation totale des déchets, à en réaliser un prototype et à en évaluer les performances.

Le procédé utilise l'éthane comme solvant ([fiche de sécurité](#)) dans un réacteur étanche recevant le lot de laine en suint à traiter. Le dispositif permet de collecter 95 % de la graisse de laine (valorisable) et une partie de la poussière de laine par battage de la laine sèche en sortie du réacteur. La DCO est alors réduite de 75 %. Un rinçage à l'eau et détergent élimine les contaminants résiduels (suint, saleté, poussière de laine, etc) et produit boue et effluent à traiter (25 % de la DCO initiale). Le cycle de dégraissage a généré 3 % d'émissions fugitives de solvant lors de l'expérimentation. L'automatisation permettrait de réduire les émissions fugitives à 1 % dans le processus industriel³. Quelques bénéfices du procédé par rapport à un lavage à l'eau et le processus de traitement attendant :

- La qualité du lavage est supérieure à un lavage à l'eau en référence.
- 70 % de consommation d'eau en moins
- 30 % d'énergie en moins
- 40 % de réduction globale des coûts estimée par rapport à un lavage à l'eau classique. (réductions des charges et valorisation des sous-produits)

³ Les émissions fugitives d'hexane dans l'air ambiant ne doivent pas excéder la valeur limite d'exposition professionnelle sur 8 heures (VLEP - 8h) de 72 mg/m³ d'air ou 20 ppm.

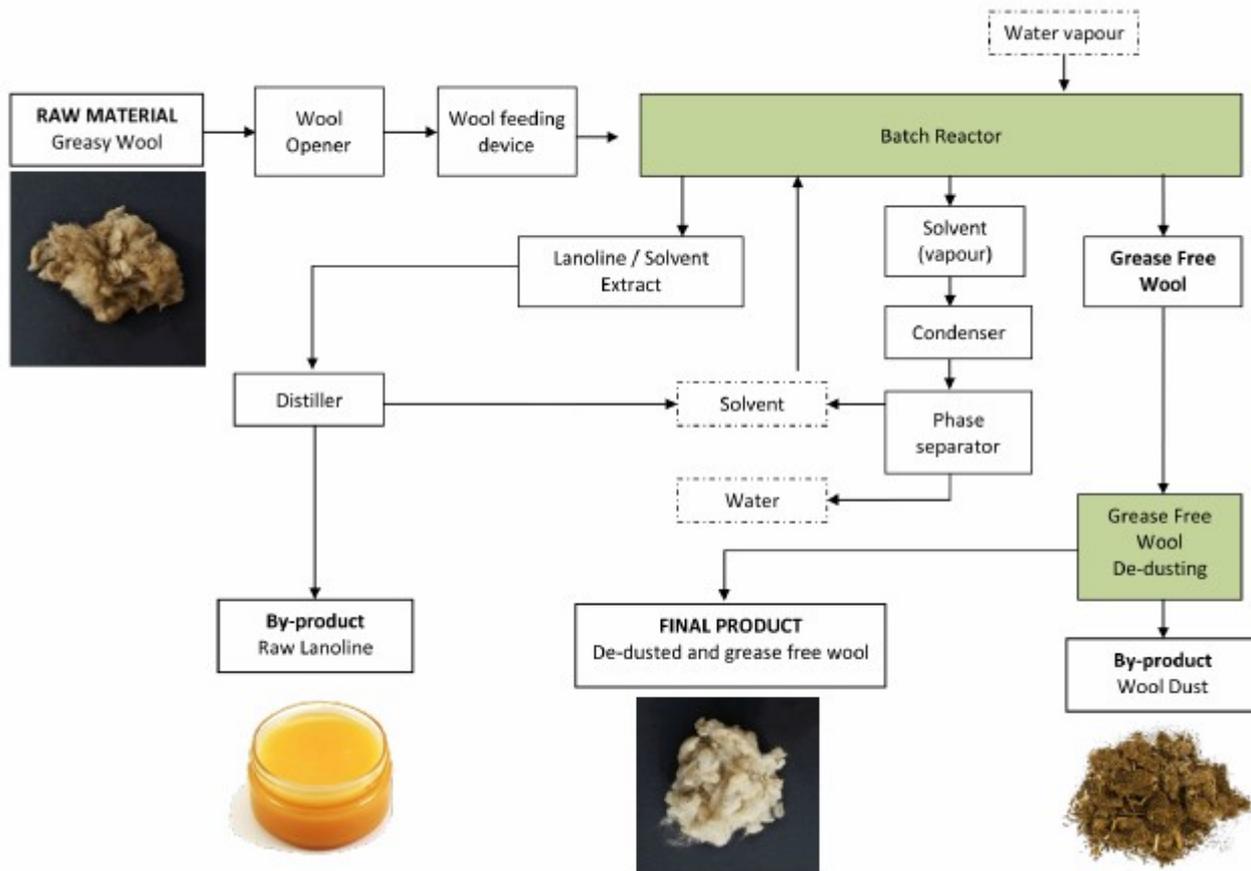


Figure 9: Schéma du Wool Dry Scouring – hors rinçage à l'eau et son traitement

Un schéma complet des flux et des déchets est consultable en Annexes

Incidence de la nature des laines traitées

Bien que la graisse de laine soit collectée dans sa presque totalité par le procédé de lavage WDS, la valorisation de la graisse de laine des races pyrénéennes sera limitée au faible taux de gras de ces laines, soit estimée à 50 kg de graisse de laine /tonne de laine grossière en suint. C'est toutefois du même ordre que la valeur minimale de récupération par centrifugation indiquée comme NEA-MTD pour les laines fines (voir Tableau 7). La quantité de graisse de laine valorisable joue donc en faveur du lavage par solvant même pour des laines grossières.

Pesticides

La valeur de la graisse collectée dépendra là encore du taux de pesticides dans les toisons provenant des traitements. Ce critère peut grandement déprécier la graisse de laine auprès des laboratoires de transformation. Dans le procédé Wooltech décrit dans BREF TEXTILE 2003, il est mentionné en page 232 : *il est à noter que cette laine est exempte de pesticides, étant donné que tous les pesticides se séparent facilement du solvant et sont éliminés avec la graisse (des données analytiques ont été soumises pour étayer cette constatation). Cela présente un avantage supplémentaire pour l'usine de finissage textile, étant donné qu'il lui est plus facile de se conformer aux valeurs limites des émissions de pesticides.*

Si tel est le cas également avec le procédé WDS, alors ce serait à l'avantage de la laine lavée exempte de pesticides et des eaux de rinçage mais au détriment de la graisse de laine collectée où il seraient concentrés si les toisons traitées ont des traces de pesticides.

Données concernant le projet

Programme	LIFE11 ENV/ES/000588
Durée	01 septembre 2012 au 28 février 2016
Budget total	3 007 866 €
Contribution CE	1 477 182 €
Localisation du projet :	Catalogne
site du projet :	https://life-wds.eu
vidéo de présentation	https://www.youtube.com/watch?v=2m-JARgqiDI
documents :	
	WDS Layman report 2016
	Wooldryscouring (WDS) - Eco-Efficient Dry Wool Scouring with total by-products recovery

L'étape suivante serait maintenant la réalisation d'une installation à l'échelle semi-industrielle.

7.2 Un lavage biologique

La conception d'un lavage entièrement biologique est envisageable. Voici quelques indices :

1. Une pratique s'est développée depuis une dizaine d'années dans les réseaux des passionné(e)s de laine, pratique [partagée sur internet](#) sous l'appellation FMS, *Fermented Suint Method* afin de laver de la laine sans autre moyen qu'un bidon, une toison de laine grossière et de l'eau non-chlorée à près de 30°C minimum (à pratiquer en été). Il y a bien fermentation, nettoyage de la laine au bout de quelques jours sans brassage et possibilité de réutiliser le bain pour les toisons suivantes avec une efficacité accrue. Un rinçage à l'eau claire est suffisant et toute odeur fétide du bain de fermentation disparaît après séchage. Le dégraissage est sans doute insuffisant à ce stade, mais convient pour l'heure à des activités manuelles. La laine obtenue offre un lustre et une douceur supérieure au lavage avec détergent (Laver la laine - Scouring wool pages 54-55, 110-111).
2. Un brevet fut déposé aux États-Unis dès 1956 sur un procédé de lavage de la laine en suint par fermentation anaérobie. Cette fermentation des toisons a lieu spontanément après quelques jours en plongeant la laine en suint dans un bain en conditions anaérobie. Elle aboutit à la dégradation de composés biodégradables présents et à la production de biogaz. Selon ce principe, il n'y pas d'émulsion de la graisse de laine dans le bain de fermentation mais éventuellement une décomposition de la graisse in situ.^{lvii}
3. Il est possible de réaliser un digesteur anaérobie de 60 litres en quelques heures et pour une centaine d'euros et de constater ainsi que quelques toisons placées dans ce petit digesteur peuvent produire du méthane et gagner en propreté après un simple rinçage à l'eau claire en machine. L'opération peut être renouvelée avec le même bain de fermentation.

L'approche a jusqu'à présent été expérimentale et empirique, les phénomènes mis en jeu semblent ne pas être élucidés. Il reste que les procédés cités ont donnés quelques résultats qui conviennent déjà à certains usage de la laine. Peut-être redécouvrons-nous en 1. la *Fermented Suint Method*, la technique du *lavage en suint* citée au chap., basée sur les propriétés auto-nettoyantes de la laine ? Si ce n'était que cela, dans le contexte économique et environnemental actuel, une méthode tombée en désuétude pourrait trouver un second souffle, même si elle se réduit à un trempage de la laine avant un lavage classique. Une réduction de la consommation en eau, en énergie, en détergents et de la charge des effluents par un simple trempage que l'on pourrait qualifier d'une

phase de pré-lavage doit trouver du sens à la lecture d'un document consacré à la profonde empreinte écologique d'un lavage de laine classique.

Les points 2. et 3. sont plus précis, puisqu'il conduisent en finalité à exploiter dans le lavage des toisons le procédé de digestion anaérobie que nous avons abordé au chap. 6.2 dans le traitement des effluents de lavage, notamment pour « consommer » la graisse de laine résiduelle émulsionnée dans les eaux de rejet du bain de lavage. Quelques expérimentations simples ont déjà été conduites pendant plusieurs mois avec collecte et relevé des productions de biogaz attestant des processus en cours. Ces essais peuvent être réalisés par tout un chacun avec des moyens modestes. L'enjeu de ces observations pourrait se résumer à la question suivante :

Est-il possible de développer un procédé de fermentation où bactéries et enzymes dégraderaient les contaminants de la toison, en particulier la graisse de laine, sans affecter la fibre ? Un « rouissage » propre à la laine en quelque sorte, pour faire le parallèle avec la macération du chanvre ou du lin dans la préparation de la fibre textile.

Pourquoi pas, les microorganismes possèdent des ressources surprenantes !

Connaissez-vous [l'histoire du délainage, comment Mazamet a établi et tiré sa fortune](#) d'un monopole pendant près de 150 ans, celui de centre mondial des laines issues du délainage? Les Mazamétains arguèrent que « la qualité des eaux » de Mazamet auraient des propriétés particulières, uniques, permettant de séparer la laine des peaux de mouton salées qui convergeaient de tous leurs comptoirs implantés dans les grands pays producteurs de l'hémisphère sud. En réalité le délainage peut être pratiqué n'importe où, à condition d'en connaître la recette, initiée dans les années 1851 : une fermentation contrôlée des peaux en étuve – *le procédé à l'échauffe* – qui ouvre les pores et libère la fibre de laine, permettant de valoriser tout à la fois la laine et le cuir.

C'est simple, il suffisait d'y penser.

8 Annexes

Tableau 12: Quelques données physiques et chimiques de la graisse de laine brute^{lviii}

Couleur	jaune à brun pâle
Densité (à 15°C)	0,94-0,97
Indice de réfraction (40°C)	1,48
Point de fusion	35-40°C
Teneur en acide libre	4-10%
Teneur en alcool libre	1-3%
Indice d'iode	15-30
Indice de saponification	95-120
Poids moléculaire	790-880
Proportion d'acides gras	50-55%
Proportion des alcools	45-50%
Acides: point de fusion	40-45°C
Indice d'iode	10-20
Poids moléculaire moyen	330
Alcools: point de fusion	55-65°C
Indice d'iode	40-55
Poids moléculaire moyen	370

TABLE 4. Constituents of steroid alcohols in lanolin.

Sterols in lanolin	Content (wt. %)
Cholesterol	38
dihydrocholesterol	trace
Cholesta-3,5-diene-7-one	3.6
Lanosterol	14.8
Dihydrolanosterol	10.3
3-hydroxylansta-8-en-7-one	1.6
Hydrocarbons and undetermined alcohols	5.9

Figure 10: Composition des alcools stéroïdes dans la lanoline^{lix}

TABLE 2. Constituents of lanoline fatty acids [3, 11].

Lanolin acid	Number identified	Content (wt %)	Carbon length	Carbon length major fractions
Normal acids	27	12.1	C8-C38	C14, C16, C24, C26
Iso acids	17	22.1	C8-C40	C14, C16, C18, C20, C26
Anteiso acids	18	26.3	C7-C41	C15, C19, C21, C25, C27
Normal α -hydroxy acids	23	21.8	C10-C32	C16
Iso α -hydroxy acids	12	4.5	C12-C34	C18-C24
Anteiso α -hydroxy acids	12	0.8	C11-C33	C23-C25
Normal ω -hydroxy acids	14	3	C22-C36	C30, C32
Iso ω -hydroxy acids	8	0.8	C22-C36	C30, C32
Anteiso ω -hydroxy acids	7	1.3	C23-C35	C25, C31
Total	138			
Unsaturated fatty acids	42	2.1		C16, C18
Poly hydroxy fatty acids		4.7		
Total fatty acids confirmed	180	99.5		

TABLE 3. Composition of mono and 1,2 diols alcohols wool wax alcohol.

Lanolin Alcohols	Number identified	Content (wt. %)	Carbon length	Carbon length major fractions
Normal- monoalcohol	16	1.6	C14-C34	C24, C26
Iso-monoalcohol	11	6.5	C14-C34	C20, C22, C26
Anteiso-monoalcohol	11	9	C17-C35	C21, C25, C27
Normal-Aliphatic 1,2 diols	14	0.4	C12-C25	C16, C18, C20
iso-Aliphatic 1,2 diols	9	5.9	C14-C30	C18, C20, C22, C24
anteiso-Aliphatic 1,2 diols	8	2.4	C15-C29	C21, C23
Total aliphatic alcohols	69	25.8		

Egypt.J.Chem. **61**, No. 6 (2018)

Figure 11: Composés de la lanoline

Source : *A Comprehensive Critique on Wool Grease Extraction, Properties and Applications*^{lix}, 2018

Tableau 13: Quelques composés organiques isolés dans le suint^{lviii}

<i>composants de vapeur volatile</i>	<i>Pourcentage</i>	<i>D'autres composés aliphatiques</i>
Acide formique $HCOOH$	Trace	
Acide acétique CH_3COOH	60	L'acide oléique L'acide stéarique
Acide propionique C_2H_5COOH	25	
Acide butyrique C_3H_7COOH	5	
Acide valérique C_4H_9COOH	4	
Acide caproïque $C_5H_{11}COOH$	3	
Acide œnanthique $C_6H_{13}COOH$	trace	
Acide caprylique $C_7H_{15}COOH$	trace	
Acide benzoïque C_6H_5COOH	3	
Phénol (dérivé d'un acide sulfonique phényle) C_6H_5OH	trace	
Autres composés		
Acide oxalique $HOOC-COOH$		
Acide succinique $HOOCCH_2CH_2COOH$		Ammoniac monométhylamine Triméthylamine
Acide glycolique $CH_2(OH)COOH$		
Acide lactique de $CH_3CH(OH)COOH$		
Acide malique $HOOCCH_2CH(OH)COOH$	Non fourni	
Glycine $CH_2(NH_2)COOH$		
Leucine $(CH_3)_2CHCH_2CH(NH_2)COOH$		
Tyrosine $HO Ph CH_2CH(NH_2)COOH$		
Acide urique $C_5H_4O_3N_4$		

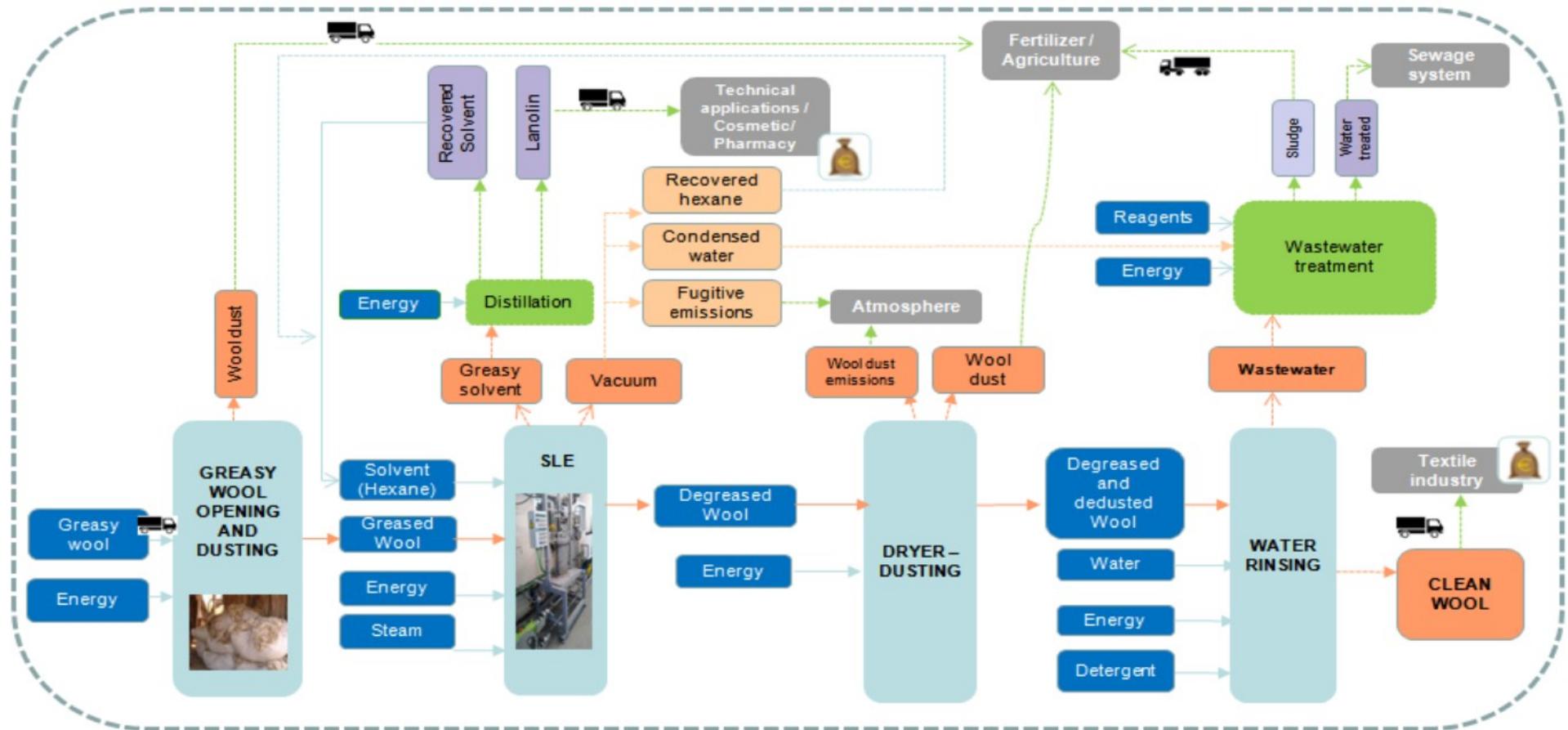


Figure 12: Schéma des flux dans un Wool Dry Scouring

- i Laver la laine - Scouring wool – Le lavage de laine en Europe Urgence et avenir écologique 2016 - 146 p
<http://atelierlainesdeurope.eu/francais.htm>
- ii Encyclopedia of Animal Science - (Two-Volume Set) https://books.google.fr/books?id=mSJWDwAAQBAJ&pg=PT2033&lpg=PT2033&dq=wool+density+follicles+mm2+merino&source=bl&ots=AxJXzmnBO&sig=ACfU3U2-mBD3TAAK3WSdzVmkg7_Vi7JXw&hl=fr&sa=X&ved=2ahUKEwjJxqXXno3qAhURxYUKHfxQBwUQ6AEwA3oECAkQAQ#v=snippet&q=follicles%20
- iii La-Navette-15-Les-standards-laine-de-France.pdf <https://laines.eu/wp-content/uploads/La-Navette-15-Les-standards-laine-de-France.pdf>
- iv Jean Rouanet Matelassier – collecteur de laine – expert lainier jeanrouanet.dormilaine@gmail.com
- v Recherche sur la composition chimique des toisons de brebis I. - P. V. Charlet <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00886584>
- vi A Comprehensive Critique on Wool Grease Extraction, Properties and Applications Hosam El-Din Zakaria El-Sayed*, Salwa Mowafi, Amira Abou El-Kheir, Eman M. El-Khatib Textile Industries Research Division, National Research Centre, Dokki, Cairo, Egypt. Egypt.J.Chem. Vol. 61, No.6 pp. 1151- 1159 (2018)
https://www.researchgate.net/publication/330901541_A_Comprehensive_Critique_on_Wool_Grease_Extraction_Properties_and_Applications
- vii Biodeterioration of Wool by Microorganisms and - U.S. Department . Jeanette M. Cardamone - fichier disponible en français - <http://wyndmoor.arserrc.gov/Page/2001/7044.pdf>
- viii Von Berger, American Wool Handbook, Textile Book Publishers, 2^d Ed, 1948, chap 4 Chemical Nature and Properties, Mildew and Bacteria page 219 <https://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.114968/page/n219/mode/2up?q=spores>
- 20 Private Communication. Bbryson, W.G., WRONZ, Christchurch, New Zealand, 2000 (étude Jeanette M. Cardamone citée plus haut)
- 21 Gochel. M., Belly, M., and Knott, J, Biodeterioration of Wool During Storage. International Biodeterioration & Biodegradation, Vol.30, 1992, pp.77-85 22.
- ix Jean Rouanet Matelassier – collecteur de laine – expert lainier jeanrouanet.dormilaine@gmail.com
- x BREF Textile 2003 - 4.4.4 Lavage de la laine au solvant organique page 382
- xi Wool Scouring Systems - Errol Wood - 7.2 Solvent scouring
<https://www.woolwise.com/wp-content/uploads/2017/07/Wool-482-582-08-T-07.pdf>
- xii Greenpeace - An Overview of Textiles Processing and Related Environmental Concerns 2005 page 7
http://www.greenpeace.to/publications/textiles_2005.pdf
- xiii BREF TEXTILE 2003 - 2.3 Préparation des fibres : fibres naturelles 2.3.1 Laine
- xiv Beste Beschikbare Technieken (BBT) voor de Textielveredeling VITO -1998 – page 39
https://emis.vito.be/sites/emis/files/pages/migrated//Textiel_volledig_rapport.pdf
- xv Candidature à la labellisation Pôle d'Excellence Rurale 2ème vague oct. 2010 - PER Alpes Provence Laine page 10
- xvi BREF 2.3 Préparation des fibres : fibres naturelles 2.3.1 Laine
- xvii American Wool Handbook - Herbert Von Bergen, Richard Mauersberger Textile Book Publishers 1948
<https://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.114968/page/n417/mode/2up>
- xviii Some Chemistry of the Wool Industry Scouring and Yarn Production – Chemical Processes in New Zealand; 2nd ed.; Packer, J. E., Robertson, J., Wansbrough, H., Eds.; New Zealand Institute of Chemistry: Auckland, 1998 – Detergent selection pages 12-13 <https://nzic.org.nz/app/uploads/2017/10/5F.pdf>
- xix BREF TEXTILE 2003 4.3.3 Substitution des éthoxylates d'alkylphénol (et autres tensio-actifs dangereux) page 360
- xx BREF TEXTILE en préparation MTD/BAT 16 page 733
- xxi WoolWise Australian Wool Education Trust, Module WOOL-482-582-08 : Wool Processing Topic 7, page 7-3, 2008 <https://www.woolwise.com/wp-content/uploads/2017/07/Wool-482-582-08-T-07.pdf>
- xxii Textile Preparation And Dyeing Par A. K. Roy Choudhury page 218 http://books.google.fr/books?id=0TamObsaaPQC&pg=PA211&lpg=PA211&dq=wool+scouring+bowl&source=bl&ots=7D1ce98BiY&sig=zFb9YObMhBsnHj4I_u9N2o0aTsg&hl=fr&sa=X&ei=UopzUc61J8HPhAeWlIDQAQ&ved=0CC0Q6AEwADgK#v=onepage&q=wool%20scouring%20bowl&f=false
- xxiii WOOL-482-582-12-T-02.docx page 14 <https://www.woolwise.com/wp-content/uploads/2017/07/WOOL-482-582-12-T-02.pdf>
- xxiv Comprehensive view on chemistry, manufacturing & applications of lanolin extracted from wool pretreatment Amit Sengupta and Jagadananda Behera - 2014 -[http://www.ajer.org/papers/v3\(7\)/F0373343.pdf](http://www.ajer.org/papers/v3(7)/F0373343.pdf)
- xxv Bateup, B O, Christoe, J R, and Russell, I M, CSIRO Division of Wool Technology, 1995. Refers to primary treated effluent. - Effluent Management guidelines for aqueous wool scouring and carbonising in Australia, page 7 <https://www.waterquality.gov.au/sites/default/files/documents/pub1-effluent-woolscouring.pdf>
- xxvi Laver la laine - Scouring wool – Le lavage de laine en Europe Urgence et avenir écologique 2016 - 148 pages, <http://atelierlainesdeurope.eu/Boncommande-Saugues.pdf>
- xxvii Biodegradation and composting profiles of woold scour wastes - Kroening 2003
<https://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/1483>

- xxviii Wool Grease Recovery from Scouring Effluent at Textile Mill 2014 Diana Starovoytova Moi University page 3
https://www.researchgate.net/publication/304322462_Wool_Grease_Recovery_from_Scouring_Effluent_at_Textile_Mill
- xxix Christoe, J. R. Wastewater treatment and disposal. In: Wool Scouring and Worsted Carding: New Approaches; 5th - 7th November 1986; Geelong. 1986. 24 - 32. <http://hdl.handle.net/102.100.100/273676?index=1>
- xxx BREF Textile juillet 2003 - 3.2.1 Lavage à l'eau page 214
- xxxi Wool scouring in Powys – a feasibility study , 28 pages, 2005, Page 18
- xxxii Présentation de l'unité d'évaporation Ecostill - Laver la laine - Scouring wool – Le lavage de laine en Europe Urgence et avenir écologique 2016 page 117 – [site de l'entreprise](http://www.entreprise.com)
- xxxiii Une ligne de lavage venue d'Espagne et installée en Suède - Laver la laine - Scouring wool 2016 – pages 80-83
<http://www.ullkontoret.se> - <https://www.facebook.com/ullkontoret/>
- xxxiv Le lavage des laines, situation actuelle et avenir, Daniel Palet, 1999 - Innotex Center – CTF, Université Polytechnique de Catalogne
- xxxv Sources Laver la laine - Scouring wool pages 68-69, Využití ovčí vlny v současných podmínkách, Petra Martinková, 2016, pages 29-38, https://theses.cz/id/nazuq3/zaverecna_prace.pdf, traduction des textes : <https://translate.google.com/translate?hl=fr&sl=cs&u=https://docplayer.cz/47450436-Mendelova-univerzita-v-brne.html&prev=search&pto=aue>
- xxxvi Energy-Efficient Wool Scouring Facility, A Project Designed to Support the NY Sheep Industry by Building a Facility that Scours Wool with Energy Efficiency and Environmental Responsibility, S. Hoyt, 10 pages, oct. 2003
<https://greenbank.ny.gov/-/media/Files/EERP/Renewables/energy-efficient-wool-scouring-facility.pdf>
- xxxvii Integrated Treatment Processes for primary Wool scouring effluent - Matthew J. Savage B. E. Hons. University of Canterbury - 2002 http://ir.canterbury.ac.nz/bitstream/10092/1125/1/thesis_fulltext.pdf
- xxxviii Biogas recovery and electricity generation from anaerobic treatment of industrial wool scouring effluent <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/AENOR1368802131.53/view>
- xxxix Anaerobic degradability of wool scouring effluent Darren Isaac and Ralf Cord-Ruwisch - 1991 - https://researchrepository.murdoch.edu.au/id/eprint/10130/1/anaerobic_degradability.pdf
- xl Anaerobic Bioflocculation as a Mechanism for the Removal of Grease from Wool Scouring Effluent by Wipa Charles (nee Lapsirikul) 1994 <https://researchrepository.murdoch.edu.au/id/eprint/39184/1/Charles1994.pdf>
- xli An integrated anaerobic - physico-chemical treatment concept for wool scouring wastewater H. Peláez, S. Gutiérrez, G. Castro, A. Hernández, M. Viñas 2001, <http://wst.iwaponline.com/content/44/4/41>
- xliv Effluent Treatment at thos. Chadwick & Sons Ltd <https://books.google.fr/books?id=Du6iAgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=fr#v=onepage&q=chadwick&f=false> traduction disponible
- xlvi Biogas production and feasibility of energy recovery systems for anaerobic treatment of wool-scouring effluent. Schoen, E.J. and D.M. Bagley. Resources, Conservation and Recycling, 2012
<https://pdfslide.net/documents/biogas-production-and-feasibility-of-energy-recovery-systems-for-anaerobic.html>
- xliv Remediation of contaminated industrial land : a community solution to a local environmental problem, S Stivens, S Kroening, M Daly, 2007, <https://www.wasteminz.org.nz/wp-content/uploads/Steve-Kroening.pdf>
- xlvi Disposal of wool scouring sludge by composting John Pearson, Fen Lu and Kimti Gandhi - University of Huddersfield, UK, AUTEX Research Journal, Vol. 4, n°, 2004, 10 p http://www.autexrj.com/cms/zalaczone_pliki/7-04-3.pdf
- xlvi Wool, Wool Scouring, Wool Drying, Burr Picking, Carbonizing, Wool Mixing, Wool Oiling, Woolen Carding, Woolen Spinning, Woolen and Worsted Warp Preparation (1905) by International Textbook Company ics_901
https://www2.cs.arizona.edu/patterns/weaving/books/ics_90_1.pdf
- xlvi Lindberg J and Ekegren S, 'A new method for solvent scouring of raw wool', Proc. Int. Wool Text. Res. Conf., Melbourne, CSIRO, 1955, E, 342–6.
- xlvi Solvent scouring of raw wool', Wool Sci. Rev., 1963, 23, 40–54.
- xlvi Saville N, Shelton W J, Ward R and Sewell J, 'A system of wool scouring using chlorinated solvents', Appl. Polym. Symp., 1971, 18, 1157–61.
- l Barker G V and Davin F, 'A focus on solvent scouring with special reference to the de Smet plant in Western Australia', Proc. 8th Int. Wool Text. Res. Conf., Christchurch, Wool Res. Org. of NZ, 1990.
- li Robinson B and Lee C S P, 'A Comparative Study of Raw Wool Scouring Systems', IWS Environmental Technical Bulletin ETB-27, Ilkley, 1993.
- lii Robinson B, Recent developments in raw wool scouring and carbonising, IWS Technical Information Letter, Ilkley, Report TIL/ET-7, 1991.
- liii Hopkins P, Solvent Cleaning of Wool: Some Recent Developments, Deutsches Wollforschungsinstitut Report No 119, pp 128–135, 1997.
- liv Wool Science and Technology by S.W. Simpson, G.H. Crawshaw (z-lib.org), Elsevier, 9 mai 2002 - <https://b-ok.cc/book/862868/34738e>
- lv Wooltech investe nel porto franco di Trieste, Italia Oggi - Numero 301 pag. 11 09/12/1995
<https://translate.google.com/translate?hl=fr&sl=it&u=https://www.italiaoggi.it/archivio/wooltech-investe-nel-porto-franco-di-trieste-263229&prev=search>
- lvi Wool metrology research and development to date - D.J. Cottle Textile Progress, 2015 page 232)

- lvii Treatment of Wool Wastes A. M. Buswell Research Professor Of Chemistry University of Florida 1956
<http://earchives.lib.purdue.edu/cdm/compoundobject/collection/engext/id/4993/rec/42> traduction disponible –
Brevet US2864746A Process for cleaning raw wool <https://patents.google.com/patent/US2864746> traduction disponible
- lviii Truter, E.V. Wool Wax Chemistry and Technology, Cleaver-Hume Press Ltd., London (1956).
- lix A Comprehensive Critique on Wool Grease Extraction, Properties and Applications , H El-Din Z El-Sayed, S Mowafi, A Abou El-Kheir, E. M. El-Khatib, 2018, Textile Industries Research Division, Cairo, Égypte
Egypt.J.Chem. Vol. 61, No. 6 pp. 1151- 1159
https://ejchem.journals.ekb.eg/article_10327_aa608f50a7853fd10cfef37b4397a8cd.pdf