

Rapport de Veille Technologique et  
Intelligence Economique

Recherche d'une alternative aux pailles en  
plastique

*Le 02/05/2019*  
*Grenoble INP - Pagora*

# SOMMAIRE

Introduction	3
I. Contextualisation	5
A. Définition d'une paille	5
B. Historique	5
II. Cahier des charges	6
A. Dimensionnement	6
B. Performances	6
C. Norme alimentaire	8
III. Pailles en Polypropylène	8
A. Matière première	8
B. Mise en forme de la paille	9
C. Impact environnemental	10
IV. Procédés de fabrication des matières premières	12
A. PLA	12
B. Papier	14
C. Amidon	14
D. Inox	15
E. Verre	18
F. Silicone	19
V. Procédé de fabrication des pailles	19
A. Paille PLA	19
B. Paille en papier	19
C. Paille en inox	21
D. Paille en verre	22
VI. Analyse économique	23
A. Caractérisation du marché	23
B. Comparaison des alternatives	24
C. Environnement économique : facteurs économiques de développement	25
D. Contexte législatif et réglementaire	26
E. Diagramme de PORTER	27
F. Chaîne de valeur	28
VII. Perspectives d'évolution	28
A. Synthèses des tendances constatées	28
B. Diagnostic stratégique	29
C. Elaboration de scénarios à partir de jeux d'hypothèses cohérents	30
D. Analyse des risques associés aux hypothèses des différents scénarios	32

Conclusion	33
Bibliographie	34

## TABLE DES FIGURES

Figure 1 : consommation annuelle de pailles, [2]	4
Figure 2 : schéma des pressions	7
Figure 3 : Photo d'une extrudeuse	9
Figure 4 : Schéma du zoom sur l'extrudeuse, [23]	9
Figure 5 : Photo du bain de refroidissement et de la découpe d'une paille en PLA, [24]	10
Figure 6 : Paille après 2 ans dans l'océan [38]	11
Figure 7 : production de PLA [13]	12
Figure 8 : Schéma d'une machine à papier table plate, [17]	14
Figure 9 : Pailles comestibles SORBOS, [18]	15
Figure 10 : La LoliStraw, [50]	15
Figure 11 : Schéma de l'aciérie, [19]	16
Figure 12 : Schéma de laminoir à chaud, [19]	16
Figure 13 : Schéma du premier recuit et décapage [19]	17
Figure 14 : Schéma du laminage à froid et recuit final [19]	17
Figure 15 : Schéma du parachèvement des produits, [19]	18
Figure 16 : Schéma de la formation de verre, [20]	18
Figure 17 : Machine de fabrication de pailles en papier, [27]	19
Figure 18 : Zoom sur la zone de collage, [27]	20
Figure 19 : Zone de découpe de la paille, [28]	21
Figure 20 : Schéma de fabrication de paille en inox	22
Figure 21 : Pailles en verre, [31]	22
Figure 22 : Marché des pailles en papier, Transparency Market Research, 2018 [37]	25
Figure 23 : Diagramme de Porter [42] [43] [44] [45] [46] [47]	27
Figure 24 : Chaîne de valeurs	28

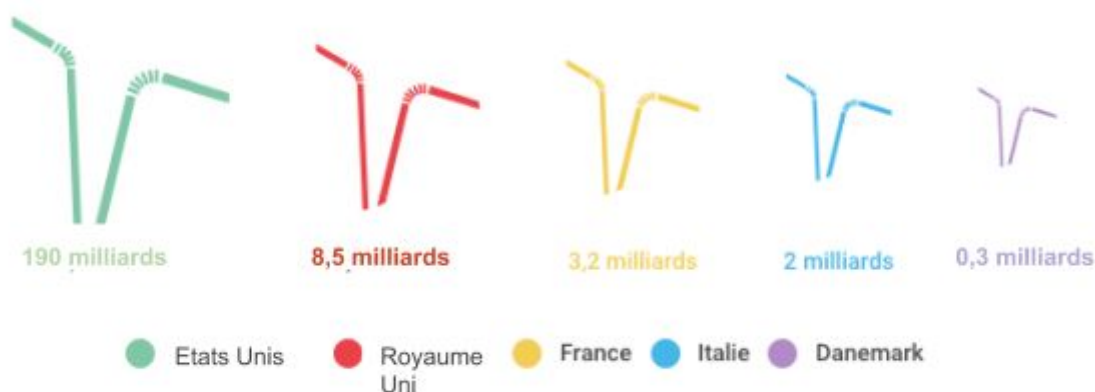
## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Comparaison des alternatives	25
Tableau 2 : Coût de production et pollution	26

# Introduction

Après les sacs plastiques, la paille est devenue l'un des principaux combats des défenseurs de l'environnement. En effet, les pailles en plastique représentent 0,025% des déchets entrants dans les océans mais sont classées septième dans le top 10 des objets les plus souvent retrouvés sur les plages. Leurs longues durées de vie (minimum 100 ans, voire 200) et leurs formes en font des objets particulièrement dangereux. Selon le World Economic Forum, d'ici 2050, il y aura plus de pailles dans les océans que de poissons.

En Europe, le Royaume-Uni est le plus gros consommateur de pailles : dans les fast food la consommation de paille s'élève à 3,5 millions de pailles par jour d'après une étude réalisée par Eunomia en octobre 2017. [1] [2]



Sources : Eunomia (research and consulting) et 20 minutes, "#Baslespailles"

*Figure 1 : consommation annuelle de pailles. [2]*

Les pailles en plastique sont petites et légères, elles ne se retrouvent que trop rarement dans les poubelles de recyclage et finissent dans les océans. Leur taille en fait l'un des pollueurs les plus nocifs. En effet les pailles sont consommées par les poissons et les espèces maritimes. En 2018, le nombre de pailles sur les plages du monde était estimé à 8,3 milliards (d'après une étude de National Geographic faite en 2018) [3].

Une vidéo déchirante publiée par Nathan Robinson, membre d'une équipe de recherche en océanographie, montre le sauvetage d'une tortue dont une paille de 10cm est coincée dans la cavité nasale. Cette vidéo a fait le tour du monde et a permis à un certain nombre de personnes de réaliser à quel point la pollution des océans est importante [4]. C'est pour cela que de plus en plus, les plastiques pétro-sourcés et non dégradables sont remplacés par d'autres biodégradables et/ou biocompostables.

La biodégradabilité d'un produit est défini par la norme NF EN 13432. Elle se décompose en deux phases. La première phase correspondant à la désintégration du produit. Elle est provoquée par des agents extérieurs (broyage, irradiation UV, compostage, micro-organismes, insectes). Cet étape augmente la surface de contact et facilite la réalisation de la deuxième

phase. Elle doit durer au maximum 12 semaines. La deuxième phase correspondant à la bioassimilation. Les micro organismes vont transformer le matériaux en métabolites assimilables dans les cellules. Il s'agit donc de la minéralisation du matériau en CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O et/ou CH<sub>4</sub>. Cette étape se doit de durer moins de 6 mois.

La compostabilité d'un produit correspond à sa biodégradabilité dans des conditions de température et d'humidité particulière. De 38 à 40°C pour une humidité relative de 90%.

La législation française a, elle aussi, fait un pas vers le développement durable. La loi Alimentation adoptée par le gouvernement français se mettra en place le 1er Janvier 2020. Cette loi prévoit l'interdiction de vente des objets plastiques du quotidiens à usage unique et leur remplacement par des objets biosourcés.

Ainsi, nous devons nous tourner aujourd'hui vers des solutions nouvelles.

L'interdiction total de l'usage de pailles peut être une solution mais ceci semble difficilement acceptable du point de vue des utilisateurs mais également des industriels. En effet, de grandes marques y sont attachés tel que Starbucks avec ces 2 milliards de pailles distribuées par an dans le monde et son marché représente plus de 3 milliards de dollars US annuel.

La mise en place d'alternatives se fait donc pressante. De nouveaux entrants tentent d'intégrer ce marché avec de nouveaux produits qu'il soit en bambou, en PLA, en papier ou à vocation durable en inox ou en silicone par exemple.

Notre veille technologique et intelligence économique aura pour but de réaliser un état de l'art des techniques et produits existants sur le marché, d'identifier les impacts environnementaux et les acteurs positionné sur le marché et de réaliser une analyse technico-économique avec l'illustration des perspectives éventuelles.

## I. Contextualisation

### A. Définition d'une paille

Une paille est un tube léger utilisé pour aspirer, le plus souvent pour boire. Elle se présente sous la forme d'un cylindre, droit ou parfois articulé avec un accordéon.

La paille était tout d'abord utilisée pour éviter d'avaler les dépôts au fond des bols collectifs de bière ou de vin, à l'époque des sumériens. [5]

Par la suite, la paille à boire a su se développer pour d'autres raisons. Dans le domaine de la santé la paille trouve son utilisation. Elle permet d'abord de protéger l'émail des dents. Lorsque l'on boit un soda, celui-ci contient du sucre et la paille évite le contact entre le sucre et les dents. De plus les canettes de sodas sont souvent stockées dans des entrepôts où les animaux comme les rats peuvent uriner sur les canettes. La paille empêche le contact entre la bouche et les déjections des animaux. [6]

La paille est utilisée aussi pour son côté pratico-pratique. En effet elle permet de boire en faisant autre chose, il est possible maintenant de boire en marchant sans avoir peur de s'en

renverser dessus ou de s'arrêter pour boire. Il est possible ainsi de boire son café pour aller au travail tout en marchant pour ne pas perdre de temps.

La paille permet aussi de boire sans pencher la tête, ce qui est utile pour les personnes âgées ou en bas-âge. Celles-ci permettent aux personnes hospitalisées de boire en restant allongées.

Une paille dans un verre peut aussi rajouter un côté festif, suivant la couleur, la forme. Elle donne aussi un côté distingué, car avec une paille on déguste plus son verre, les gorgées avalées sont plus petites, le temps est plus long pour finir son verre. [7]

## B. Historique

Les premières traces d'existence de la paille nous apparaissent en même temps que la fabrication de la bière par les anciens sumériens il y a 5000 ans. Ils produisaient de longs et fins tubes de métaux pour atteindre le liquide au fond de grands bœux. [3]

Le premier brevet fut déposé par Marvin Stone en 1888, fabricant de support pour cigarettes. Au départ, il n'utilisait qu'une bande de papier simplement enroulée. Ensuite il décida d'utiliser du papier Manille (plus rugueux que le papier basique) auquel il a ajouté de la paraffine afin d'éviter que la paille ne se détrempe dans le liquide. Il commercialisa cette invention dès 1890.

La première paille ayant la capacité de se plier fut développée par l'inventeur Joseph Friedman en observant sa fille ayant des difficultés à atteindre le haut de la paille. Il inséra une vis dans la paille, enveloppant les rainures de la vis de fil dentaire, avant de retirer la vis. Les indentations ainsi formées permettent à la paille de se plier sans se rompre. Il breveta son invention et fonda la Flex-Straw Compagny pour la produire.

Avec l'avènement de l'industrie du plastique, les premières pailles en plastique firent leur apparition. Elles étaient alors plus résistantes, moins coûteuses et produites à grande échelle à partir des années 1960. Le produit présentait des propriétés meilleures et l'impact environnemental n'était alors pas pris en compte.

Le développement mondial des fast-food a fini d'inscrire les pailles comme un objet indispensable et représentatif de notre société de surconsommation sans considération de sa fin de vie.

Aujourd'hui, le monde se retrouve face à de nombreux problèmes environnementaux. La gestion de la fin de vie des pailles devient problématique et des décisions sont prises en vue d'interdire leur utilisation (état, sociétés privées, chaînes de fast-food, ...). Il est alors nécessaire de trouver des solutions pour maintenir les habitudes tout en considérant la fin de vie de celles-ci et leur impact environnemental.

## II. Cahier des charges

### A. Dimensionnement

D'après la norme ISO 18188:2016 [8], les pailles à boire en polypropylène sont soumises à des exigences de dimensions et de propriétés de performance . Le diamètre intérieur doit être compris entre 3 et 12 mm. Le poids de celle ci est de l'ordre du gramme.

### B. Performances

D'un point de vue scientifique, lorsque l'on aspire dans une paille, on diminue la pression appliquée à la surface du liquide dans la paille,  $P$ , on a alors  $P < P_a$  avec  $P_a$  la pression atmosphérique. C'est à dire que le vide créé par l'aspiration est alors comblé par le liquide qui est poussé dans la paille par la pression atmosphérique qui s'applique à sa surface. [9]

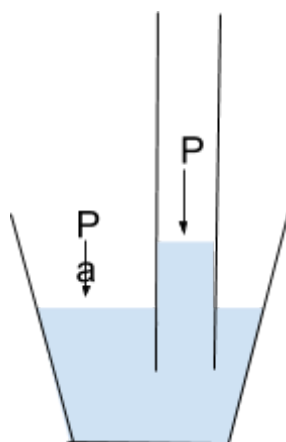


Figure 2 : schéma des pressions

Lorsque l'on aspire, les parois de la paille ne doivent pas se toucher. L'épaisseur de la paille doit donc être suffisante pour permettre au liquide de passer même lorsque l'aspiration est importante.

## C. Norme alimentaire

La fabrication et l'utilisation de paille sont soumises à la législation française et à des normes alimentaires, afin d'éviter toute dispersion de substances contenues dans les pailles vers les boissons.

Extrait de la fiche générale relative à la réglementation des matériaux au contact des denrées alimentaires (Mise à jour du 05/06/2014) [10] :

“Les matériaux et objets, y compris les matériaux et objets actifs et intelligents, sont fabriqués conformément aux bonnes pratiques de fabrication afin que dans des conditions normales ou prévisibles de leur emploi, ils ne cèdent pas aux denrées des constituants en une quantité susceptible : de présenter un danger pour la santé humaine ; 5/15 d'entraîner une modification inacceptable de la composition de la denrée ; d'altérer les propriétés organoleptiques de la denrée alimentaire. Les vérifications reposent sur l'application de méthodes d'analyses réglementaires, ou, si de telles méthodes n'existent pas, sur des méthodes reconnues sur le plan international ou à défaut d'autres méthodes appropriées au vu de l'objectif poursuivi.”

Une Norme internationale récemment publiée, [ISO 18188:2016](#), Spécifications des pailles à boire en polypropylène, définit des exigences générales pour les dimensions et propriétés de performance des pailles en plastique. Cette norme aidera les industriels à fabriquer des produits harmonisés et de qualité. [11]

Il existe également un “règlement cadre” européen sur les matériaux au contact des denrées alimentaires. Le règlement (CE) n°1935/2004 (ou « règlement cadre ») du Parlement européen et du Conseil du 27 octobre 2004 définit les exigences générales qui s'appliquent aux matériaux et objets destinés à entrer en contact directement ou indirectement avec les denrées, produits et boissons alimentaires mis sur le marché communautaire afin d'assurer un niveau élevé de protection du consommateur. Il prévoit que d'autres exigences spécifiques à certains matériaux pourront être adoptées. Ainsi, les pailles sont soumises à cette réglementation ainsi que les matières premières (papier, colle) utilisées et les machines (extrudeuse). [51]

## III. Pailles en Polypropylène

### A. Matière première

Le polypropylène est obtenu par polymérisation du polypropylène gazeux en présence d'un système catalytique. Cette matière est utilisée pour ses propriétés remarquables : inertie aux attaques chimiques, capacité de résistance et adaptation aux hautes températures. Le polypropylène est hydrophobe. [12]



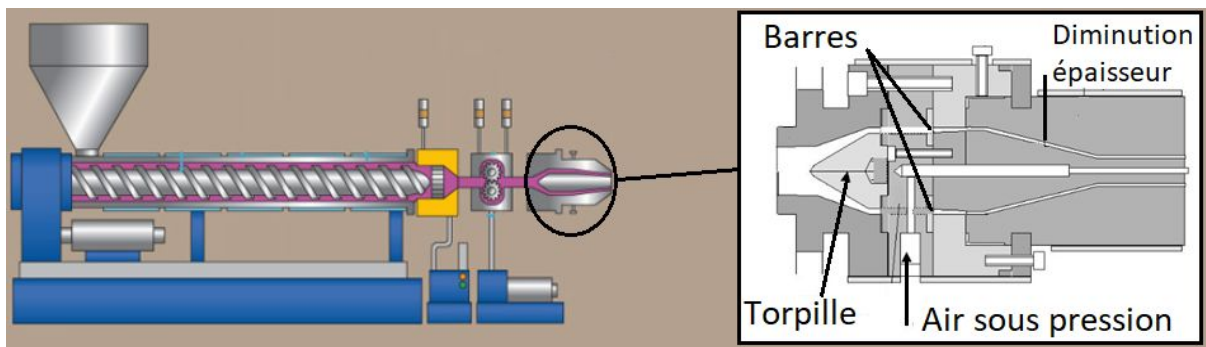
## B. Mise en forme de la paille

Les pailles actuelles, en PP, sont fabriquées par extrusion :



*Figure 3 : Photo d'une extrudeuse*

### Zoom sur l'extrudeuse

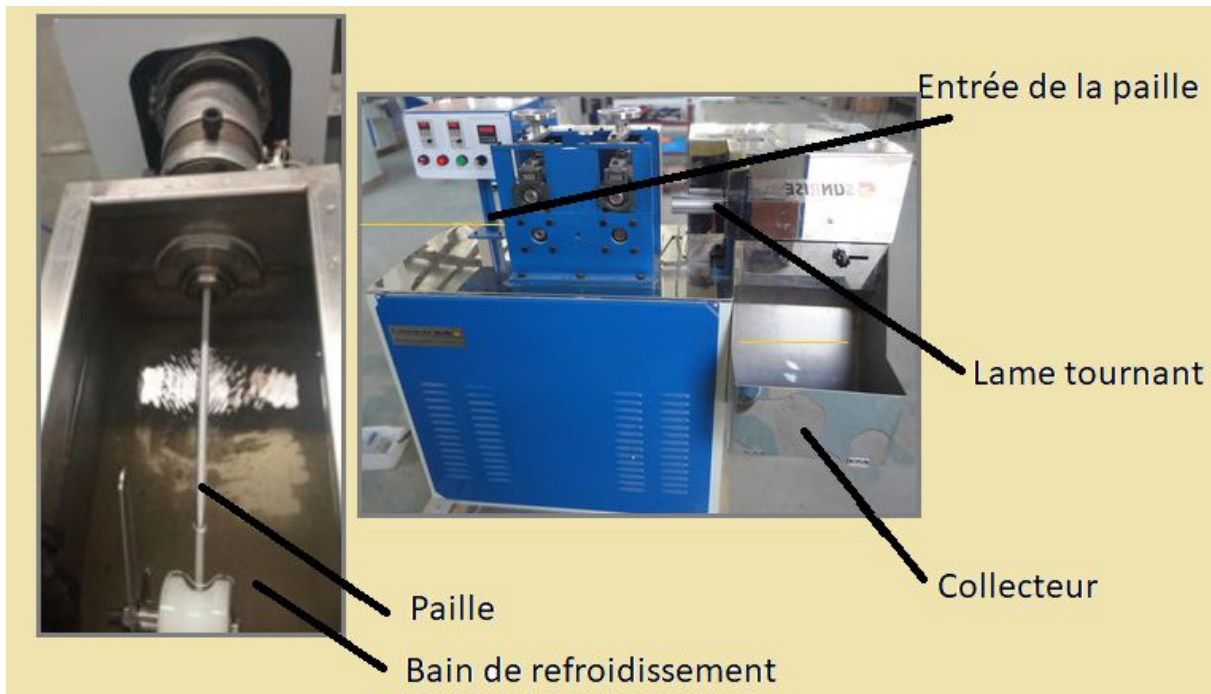


*Figure 4 : Schéma du zoom sur l'extrudeuse. [23]*

On verse dans l'extrudeuse les grains de PP et les différents additifs. L'extrusion va faire avancer les grains et entraîner leur fusion.

On utilise une filière de tête particulière. Une torpille centrale va entraîner la formation d'un cylindre en sortie. Le diamètre du cylindre est accru par de l'air sous pression soufflée à l'extrémité de la torpille. La torpille est maintenue dans la tête d'extrudeuse par deux barres. Ces deux barres ne déforment pas le cylindre en sortie car l'épaisseur disponible pour le PP se réduit en avançant dans la filière, ce qui va homogénéiser le polymère.

## Zoom sur le refroidissement et la découpe

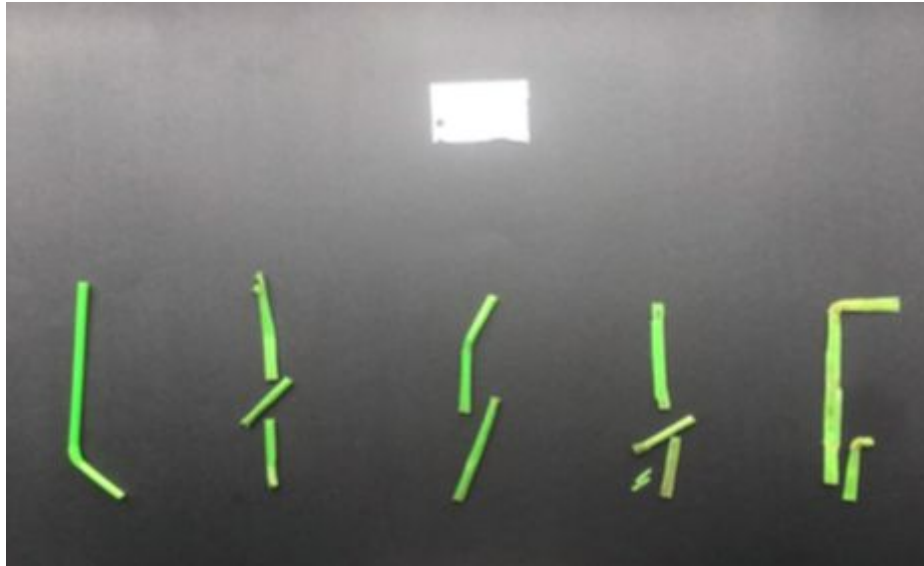


*Figure 5 : Photo du bain de refroidissement et de la découpe d'une paille en PLA. [24]*

Le long cylindre ainsi formé va être refroidi dans un bain de refroidissement. Il arrivera ensuite à la machine de découpe. Cette machine va découper le long cylindre en courtes pailles à l'aide d'une lame droite tournante. C'est la vitesse de rotation de la lame et la vitesse de production du cylindre qui définit la longueur de la paille. [25], [26]

## C. Impact environnemental

Le PP utilisé pour la fabrication des pailles est un plastique pétrosourcé 100% recyclable, malheureusement son diamètre est trop petit pour être recyclé. Les pailles se décomposent alors en petit morceaux de plastiques polluants l'environnement. [35]



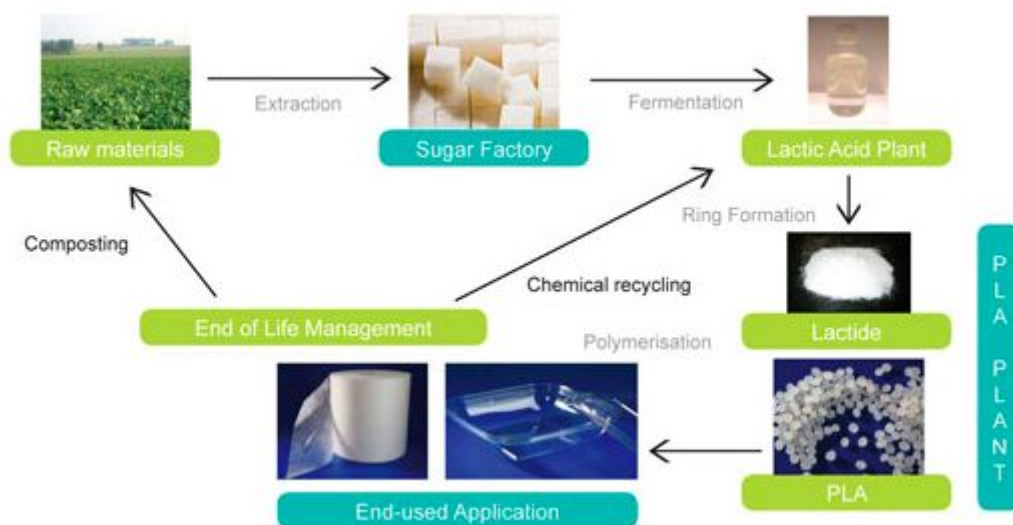
*Figure 6 : Paille après 2 ans dans l'océan [38]*

Les pailles en plastique finissent très souvent incinérées, elles génèrent alors beaucoup d'émissions de carbone. Bannir les pailles en plastique encouragerait les industriels à investir dans des solutions biodégradables, l'Etat espère que cette action pourra aussi sensibiliser la population par rapport aux enjeux environnementaux et donc à la protection de notre environnement

Des études indiquent 150 millions de tonnes de plastiques dans les océans du monde. Chaque année, 1 million d'oiseaux et 100 000 mammifères marins meurent après avoir mangé du plastique. Dernièrement, une baleine a été retrouvée morte de faim alors que son ventre contenait 40 kg de plastique, soit 10% de sa masse totale. Pourtant, des alternatives existent.

## IV. Procédés de fabrication des matières premières

### A. PLA



*Figure 7 : production de PLA [13]*

Le PLA est issu de ressources biosourcées (maïs, canne à sucre, blé, betteraves sucrières). Il est fabriqué par extraction des sucres du matériau puis par fermentation. La polymérisation de celui-ci se fait par ouverture de cycles ou par polycondensation. [14]

#### Extraction des sucres : [15]

Sucre issu de la betterave :

Dans un premier temps, les betteraves sont brassées dans un lavoir afin de les séparer d'autres impuretés telles que la terre, l'herbe, ou les pierres. Elles sont ensuite découpées afin d'obtenir des fines lamelles, appelées "cossettes".

Ensuite, le jus sucré est extrait des betteraves par diffusion. Cette étape est basée sur le principe de l'osmose : les cossettes pénètrent dans un cylindre dans lequel de l'eau tiède circule à contre courant. Lors de son passage, l'eau s'enrichit en sucre et est ensuite recueillie à une extrémité du cylindre.

Le jus obtenu passe par épuration calco-carbonique pour le séparer des sels minéraux, ou de divers composés organiques. Cette étape précipite les impuretés, le mélange passe dans des filtres qui laissent passer le jus sucré mais retiennent les impuretés obtenues précédemment.

Le jus contient alors 15% de sucre et 85% d'eau, porté à ébullition, le jus devient un sirop qui contient environ 70% de sucre.

Sucre issu de la canne:

Le procédé d'extraction du sucre de canne est semblable à celui de la betterave. La différence se trouve lors de la première étape : le jus de canne est extrait par découpage, pressage, broyage et séparation de la bagasse (canne écrasée).

Sucre issu du maïs : [16]

Les grains de maïs sont trempés 50 heures avec une eau circulant à contre-courant contenant 0,15% de SO<sub>2</sub>, ce qui permet de diffuser diverses micro-molécules : acides aminés, peptides, sels minéraux.

Les grains qui sont alors gonflés subissent une étape de trituration en passant dans des broyeurs successifs permettant d'obtenir des fragments de plus en plus petits. Ainsi par différence de densité (centrifugation), il est possible de récupérer tous les co-produits obtenus en même temps que l'amidon.

#### Fermentation :

Tous les sucres obtenus sont des molécules de saccharose composées de glucose et de fructose. La synthèse de l'acide lactique se fait grâce à la fermentation du D-glucose, appelé aussi dextrose, par des enzymes ou des bactéries.

#### Polymérisation :

- Polycondensation directe :

1. Distillation de l'eau résiduelle contenue dans l'acide lactique
2. Réaction d'estérification et formation d'oligomère de PLA
3. Polycondensation sous atmosphère inerte à pression réduite afin d'éliminer le sous-produit formé, l'eau, favorisant les transferts de chaînes (réaction de transestérification) conduisant à des polymères de faibles masses molaires

- Polymérisation par ouverture de cycle :

1. Polycondensation : Formation d'oligomère de PLA
2. Formation du lactide par dépolymérisation des oligomères de PLA
3. Polymérisation du PLA par ouverture de cycle du lactide

Propriétés du PLA :

Ne résiste pas aux hautes températures ( $T_g=60^{\circ}\text{C}$ )

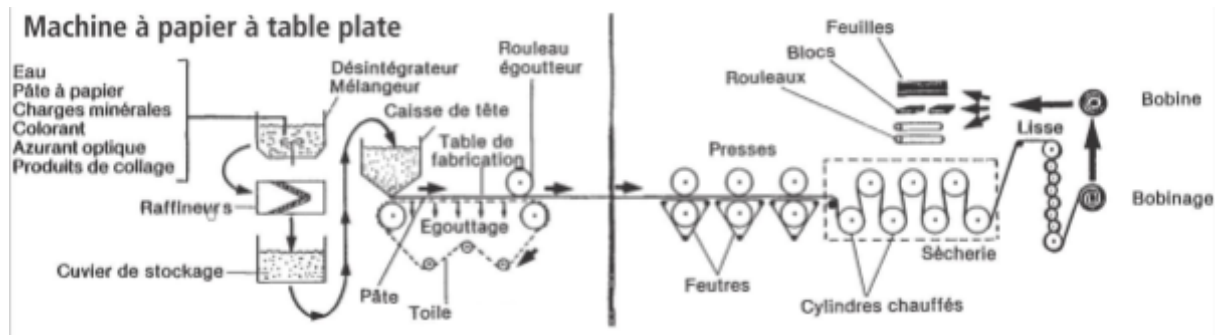
Module d'Young : 2,7 - 16 MPa

Résistance à la traction : 50 - 70 MPa

Allongement à la rupture : 2 - 10 %

Résistance à la flexion : 1000 MPa

## B. Papier



*Figure 8 : Schéma d'une machine à papier table plate. [17]*

Dans un premier temps, des plaques de pâte à papier kraft sont mélangées avec de l'eau. Il est possible que des charges minérales, des colorants, des azurants optiques ou des produits de collage soient aussi ajoutés au mélange.

La suspension formée passe alors dans le raffineur afin de réduire la taille des fibres et d'obtenir une pâte homogène. Le papier résultant aura alors un épair convenable.

La pâte est ensuite diluée et déposée sur la table de formation, où elle est égouttée. Elle circule grâce à une toile mise en mouvement par des rouleaux aspirants aidant à l'égouttage de la pâte.

La feuille passe ensuite entre des presses afin d'éliminer de l'eau puis dans la sécherie composée de cylindres chauffants. Enfin, la feuille est enroulée sous forme d'une bobine.

## C. Amidon

Des entreprises telles que Sorbos ou encore LoliStraw se sont lancées dans la fabrication de pailles comestibles. [18]

Chez Sorbos, elles sont fabriquées à base de sucre, d'eau, de fécule de maïs, de stabilisateur sodique, de carboxyméthylcellulose, de glycérine et d'aromatisant.

Le goût de la paille ne se transmet pas dans la boisson et elle reste solide lors de son utilisation. Une fois la boisson terminée, il est possible de manger la paille dont les goûts proposés sont divers : fraise, citron, citron vert, gingembre, pomme verte, cannelle, neutre ou encore chocolat.



*Figure 9: Pailles comestibles SORBOS. [18]*

Chez Loliware, elles sont faites à base d'algues, d'agar-agar et d'eau. Elles sont conçues pour disparaître. Si la paille n'est pas mangée alors en la mettant 24h dans un liquide elle disparaît.



*Figure 10: La LoliStraw. [50]*

## D. Inox

Le procédé de fabrication de l'inox se distingue en 5 étapes [19] :

- étape 1 : l'aciérie
- étape 2 : laminoir à chaud
- étape 3 : premier recuit et décapage
- étape 4 : laminage à froid et recuit final
- étape 5 : parachèvement des produits

## Étape 1 :

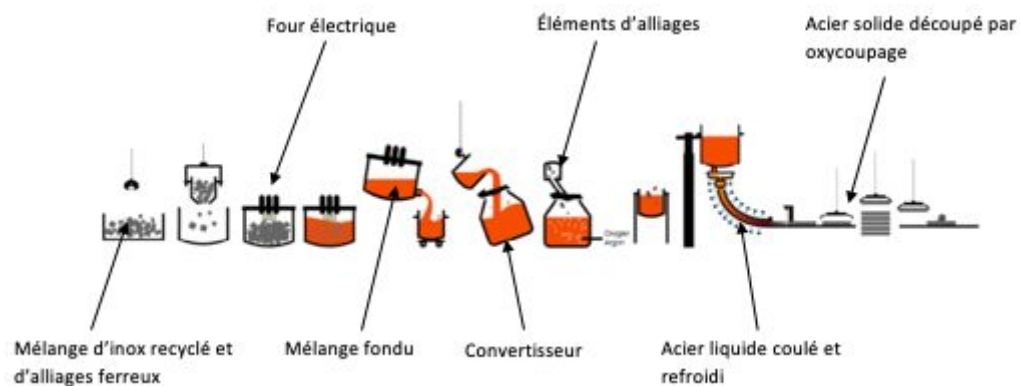


Figure 11 : Schéma de l'aciérie. [19]

- L'inox recyclé et les alliages ferreux sont fondus dans un four électrique.
- Le métal fondu est ensuite envoyé vers le convertisseur. On ajoute des éléments d'alliages pour obtenir la composition chimique définitive.
- Puis l'acier liquide est coulé, refroidi et solidifié durant l'opération de coulée continue.
- L'acier devenu solide est découpé par oxycoupage en brames pesant jusqu'à 30 tonnes, mesurant jusqu'à 12 m de long, 200 mm d'épaisseur et 2 m de large.

Étape 2 : C'est la première opération de réduction de l'épaisseur en partant d'une brame de 200 mm pour descendre à une bobine laminée à chaud de 3 mm d'épaisseur.

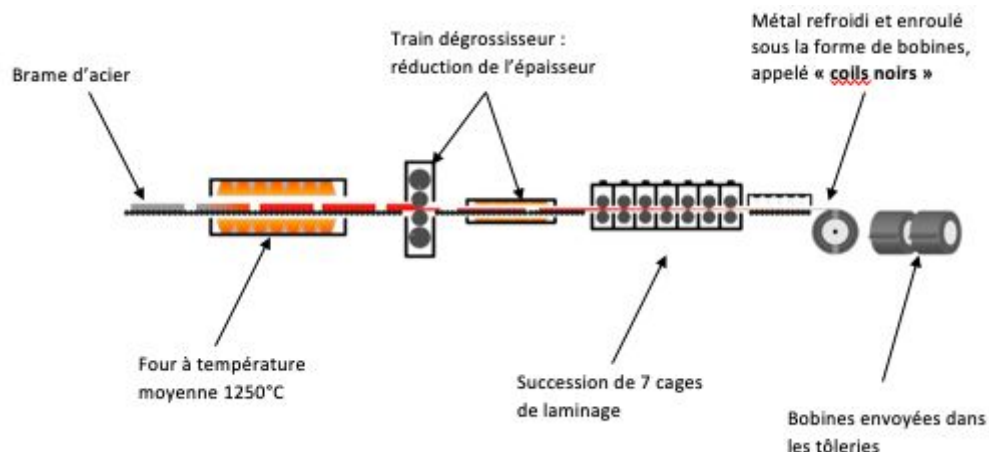


Figure 12 : Schéma de laminoir à chaud. [19]

- Réchauffage des brames dans un four à une température moyenne de 1250°C.
- Une première opération de réduction d'épaisseur de 200 à 40 mm est réalisée en plusieurs opérations dans le train dégrossisseur.
- Puis la brame passe dans une succession de 7 cages de laminage jusqu'à atteindre environ 3 mm d'épaisseur.
- Le métal est refroidi et enroulé sous la forme de bobines autrement appelées "coils noirs" de par leur surface oxydée.
- Ces bobines sont ensuite envoyées dans les tôleries pour recuit et décapage.



Étape 3 : Cette étape a pour objectif de redonner aux aciers inoxydables leurs propriétés mécaniques.

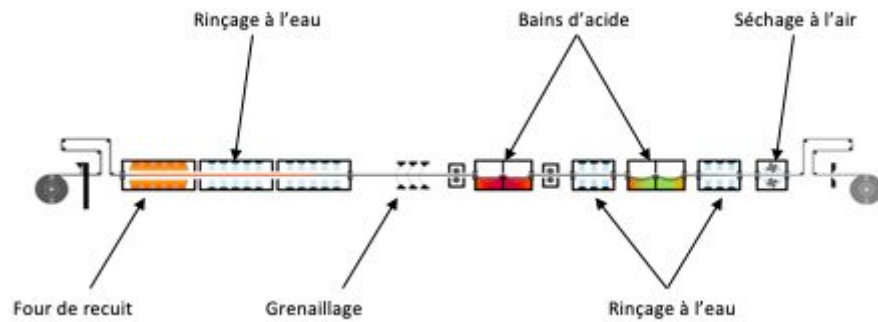


Figure 13 : Schéma du premier recuit et décapage [19]

- Les “coils noirs” sont chauffés dans un four de recuit : régénération des propriétés mécaniques.
- La couche d’oxydes en surface est brisée lors de l’opération de grenailage.
- L’opération de décapage est réalisée dans des bains d’acide. Elle est suivie par un rinçage à l’eau et un séchage à l’air pour obtenir une bobine blanche sans oxyde de surface.

Étape 4 : Cette étape consiste à réduire l’épaisseur de la bande jusqu’à un minimum de 0.3 mm en fonction des exigences finales du client.

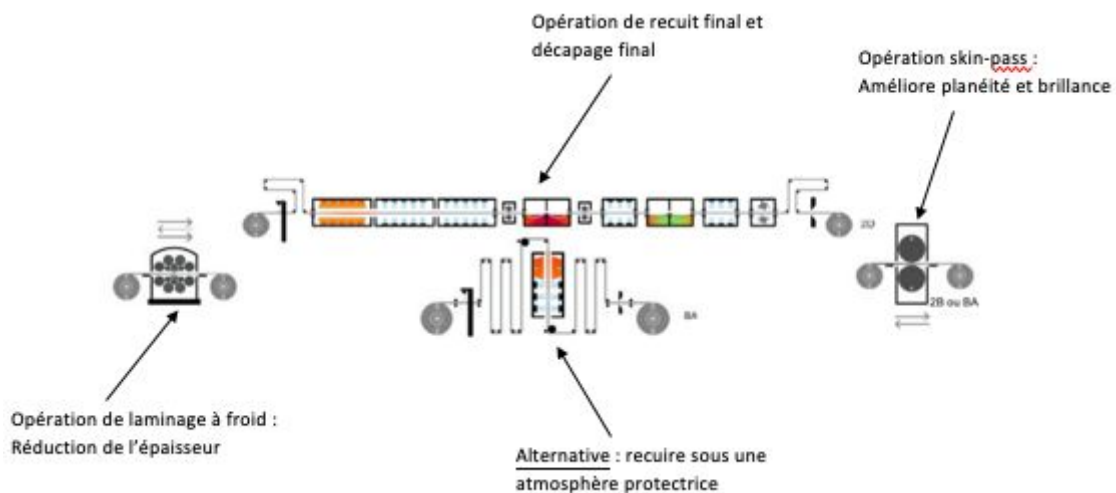
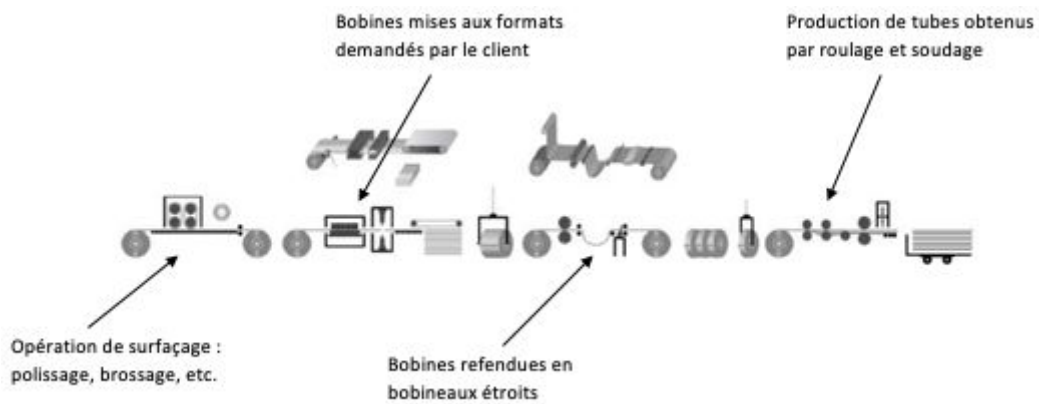


Figure 14 : Schéma du laminage à froid et recuit final [19]

- L’épaisseur des bobines blanches d’environ 3 mm est à nouveau réduite lors de l’opération de laminage à froid.
- Une opération de recuit final permet de régénérer les propriétés mécaniques des aciers inoxydables. Un décapage final permet de supprimer la couche d’oxydes et donner un aspect de surface mat.
- L’opération de skin-pass a pour objectif d’améliorer la planéité et la brillance du produit. Une, deux ou trois passes peuvent être requises.

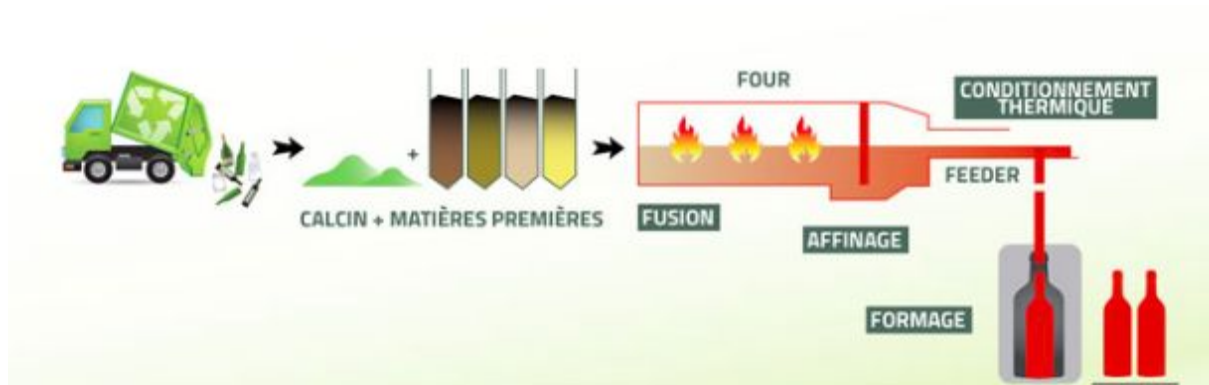
Étape 5 :



*Figure 15 : Schéma du parachèvement des produits. [19]*

- C'est au parachèvement que sont réalisées les opérations de surfaçage qui donnent au produit son apparence finale.
- La dernière opération consiste à mettre les bobines aux formats commandés.
- Des procédés supplémentaires permettent de produire des tubes, obtenus par roulage puis soudage.

## E. Verre



*Figure 16 : Schéma de la formation de verre. [20]*

Le verre est fabriqué à partir de silice  $\text{SiO}_2$  (contenue dans le sable). La silice ne fondant qu'à une température supérieure à  $1700^\circ\text{C}$ , il faut lui ajouter alors des fondants : de la soude, de la chaux ou de la potasse, ainsi que de l'eau et des calcins (débris de verre recyclé). Puis des additifs sont ajoutés en fonction des propriétés que l'on souhaite apporter au verre. Le mélange est ensuite porté à une température de  $1500^\circ\text{C}$  et se transforme en liquide. Suit alors sa mise en forme. [20]

## F. Silicone

La matière de base du silicone est la silice  $\text{SiO}_2$ . La silice est réduite à l'état de silicium par chauffage dans un four électrique en présence de carbone jusqu'à  $1800^\circ\text{C}$ . On obtient alors du silicium qui est chauffé avec du chlorure de méthyle. Le résultat de cette réaction (du méthylchlorosilane) est alors hydrolysé puis polycondensé pour donner du silicone. Celui-ci est inodore, sans toxine et sans PVC [21] [22].

## V. Procédé de fabrication des pailles

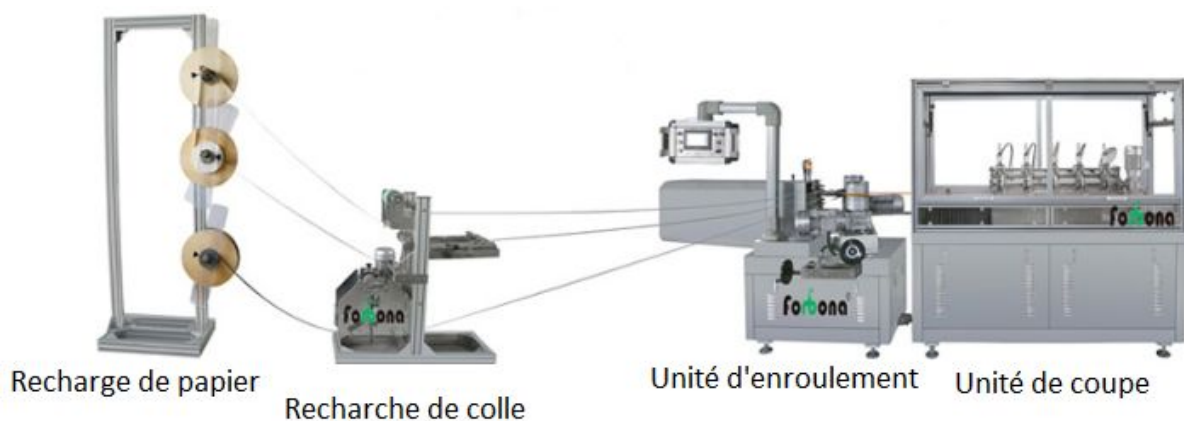
### A. Paille PLA

Les pailles en PLA sont fabriquées de la même manière que les pailles en PP soit par extrusion.

### B. Paille en papier

Le papier utilisé est du papier kraft brun ou blanc. Les feuilles interne et externe ont un grammage de  $60 \text{ g/m}^2$  quant à celle du milieu, son grammage est de  $120 \text{ g/m}^2$ . Les feuilles interne et externe sont traitées pour être résistantes à l'eau pendant environ 20 minutes tout en restant aptes au contact alimentaire. [27]

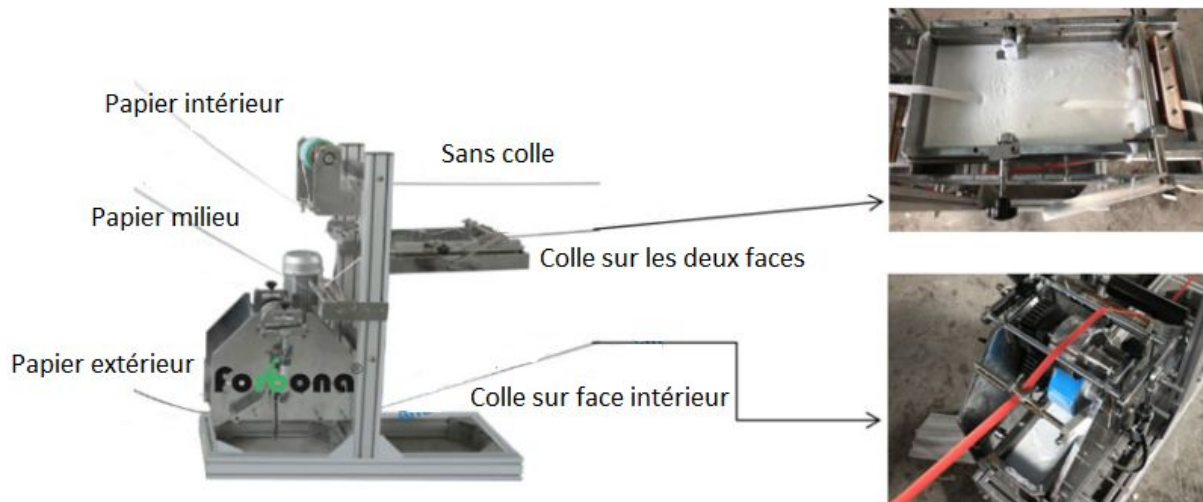
La colle utilisée est composée de 10% de PVA (alcool polyvinylique), de 40% de PVAC (acétate de polyvinyle) et de 50% d'eau. Cette colle coûte entre 1058 et 2115 €/tonnes. [28]



*Figure 17: Machine de fabrication de pailles en papier. [27]*

La fabrication des pailles en papier ressemble beaucoup à celle des mandrins. La différence majeure concerne le papier utilisé. En effet celui-ci doit être résistant dans les liquides pour une durée d'environ 20 minutes et ne doit pas donner de goût aux liquides lorsqu'il est bu.

#### Zoom sur la zone de collage



*Figure 18: Zoom sur la zone de collage. [27]*

Le papier intérieur ne contient pas de colle pour ne pas donner de goût aux liquides. Le papier extérieur aura de la colle sur sa face intérieure mais pas sur la face extérieure. Celle-ci pourra être décorée.

#### Zoom sur la zone d'enroulement

La paille sera donc formée de trois papiers, chacun ayant une fonction différente. La feuille intérieure devra être apte au contact alimentaire et résistante aux liquides, tout comme la feuille extérieure. La feuille du milieu a une fonction de structure d'où son grammage plus important. Elle va augmenter la rigidité de la paille et servira de liant entre les deux faces extérieures.

## Zone de découpe



*Figure 19 : Zone de découpe de la paille. [28]*

C'est en fin de chaîne que l'on va découper les pailles. On utilisera pour cela, cinq lames de découpe pour augmenter le rendement de la machine et accélérer la vitesse de production. Elles seront ensuite collectées pour permettre le packaging et l'expédition. Cette machine peut produire entre 150 et 200 pailles par minute.

Les pailles produites ont un diamètre compris entre 5 et 12 mm selon les paramètres machines et les largeurs de papiers utilisées.

Une paille ainsi produite pèse entre 2 et 3 grammes (colle inclus).

## C. Paille en inox

Il semble qu'il y ait deux possibilités quant à la fabrication des pailles en inox. Soit en utilisant une bande d'incox soit en utilisant un rouleau.

Pour la première possibilité, une bande d'incox est déroulée en continu et passe entre deux galets qui la courbe dans le sens de la longueur, ainsi les deux bords latéraux se touchent. Puis, la jointure est soudée et le tuyau formé est directement plongé dans l'eau.

Enfin, le tuyau est coupé en tronçons.

Pour la seconde possibilité, un cylindre en inox plein est chauffé et passé dans une presse hydraulique, cela va permettre de creuser le cylindre et d'obtenir un tube vide.

Puis on réalise un laminage sur ce cylindre. Ce dernier est contraint de passer entre deux matrices à gorges coniques et un mandrin conique. Le diamètre du tube est alors réduit à la taille désirée. [29]

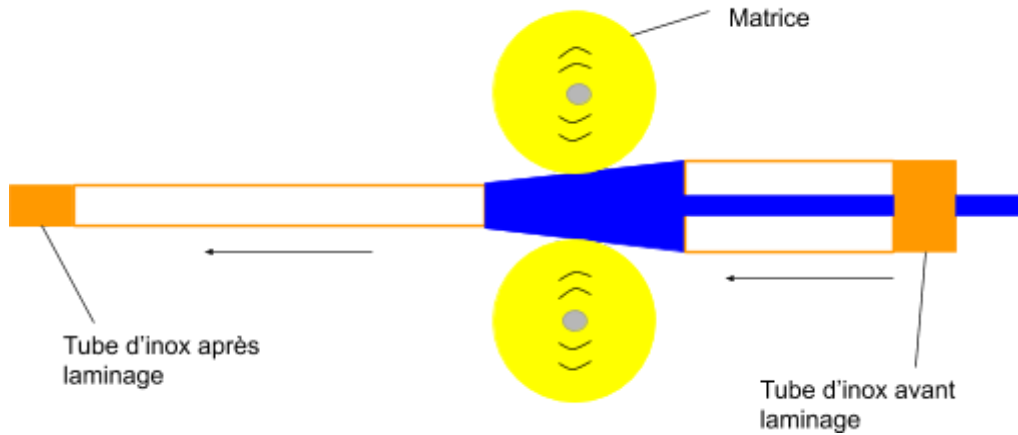


Figure 20: Schéma de fabrication de paille en inox

## D. Paille en verre

La fabrication d'une paille droite en verre est équivalente à la fabrication de tubes luminescents, le procédé est appelé soufflage-étirage.

Lorsque le verre sort du four à l'état fondu, il forme un ruban qui est enroulé autour d'un mandrin, cela forme alors un tube à large diamètre. [30]

Plus loin, une étireuse tire en continu sur le tube, cela permet d'atteindre le diamètre de tube désiré. Le verre est refroidit au cours de cette dernière étape, cela permet de fixer la dimension du tube.

Après l'étireuse, se trouve une machine de coupe qui sépare le tube en tronçons. Puis les extrémités sont recoupées et brûlées.



Figure 21: Pailles en verre. [31]

## VI. Analyse économique

### A. Caractérisation du marché

Chaque jour, 1 milliard de pailles sont jetées dans le monde, 8,8 millions sont utilisées en France, 500 millions aux Etats-Unis. Aujourd'hui, les pailles automatiquement mises dans les boissons représentent 80% de leur utilisation [32]. Ces chiffres sont alarmants quant à nos habitudes d'utilisation des pailles mais mettent en lumière un marché potentiel important pour les solutions alternatives innovantes et environnementalement compatibles.

Le marché actuel des pailles en plastique est énorme. De nombreux lobbies n'hésitent pas à défendre l'usage des pailles, les décrivant comme recyclables et que la seule problématique actuelle se pose quant à la collecte de ces petits bouts de plastique. Leur influence a réussi à réduire les ambitions et les deadlines prévues de certains gouvernements. [33] Cependant, les différentes actions environnementales prises par les gouvernement ou les peuples devraient radicalement bouleverser ce marché dans les années à venir, pour exemple la confirmation le 27/03/2019 de la fin des objet plastiques à usage unique en UE d'ici 2021. [34]

Il est alors possible de se demander si la suppression totale de l'usage des pailles est une solution acceptable. Moran, en 2018 [35], a essayé d'évaluer les habitudes des consommateurs d'un restaurant d'Oberlin, aux Etats-Unis, quant à l'utilisation de pailles. Pendant une journée, le patron a retiré les pailles de ses boissons.

Sur un total de 112 personnes interrogées, 30% ont demandé une paille.

Sur 113 personnes qui ont répondu au sondage rédigé par Moran :

- 33,8% n'utilisent pas de pailles contre 23,6% qui en utilisent tout le temps
- 53% sont conscients des risques causés par les pailles sur l'environnement
- 11% disent qu'il n'y a aucun avantage à ne pas utiliser de paille
- 30,9% disent que l'utilisation de paille augmente l'accessibilité et les conditions sanitaires

Cette étude met en lumière notre consommation excessive de paille, souvent sans réelle réflexion quant à la conséquence de notre acte. Cependant, seul un tiers des personnes demande une pailles, s'il n'en n'ont pas. Il serait donc, en théorie, facile de diminuer drastiquement la consommation de paille en arrêtant les pailles systématique dans les chaînes de restaurations ou les bars.

Cependant, la suppression totale des pailles ne semble pas envisageable. Notamment pour des conditions sanitaires ou des aides aux personnes malades. Mais également pour des conditions économiques. De grandes marques en ont fait un symbole et de nombreux usagers ne peuvent pas se passer de pailles, faisant tourner un marché économique important.

D'après tout cela, l'essor et la prise de contrôle du marché des pailles par des pailles alternatives plus respectueuses de l'environnement semblent inévitable. En 2018, ces pailles alternatives ne représentaient que 1% du marché mais leur évolution s'accélère et elles devraient être plus présentes dans les années à venir; profitant de la prise de conscience collective et d'un contexte législatif favorable.

## B. Comparaison des alternatives

Les alternatives étant nombreuses, il semble logique de comparer les différents cas pour présenter une solution économiquement viable au remplacement des pailles en plastique.

Si on compare une paille PP polluante à une paille en PLA biosourcée biodégradable, sa production émet moins de CO<sub>2</sub> mais son prix restant quatre fois plus élevé, ce qui explique sa difficulté à s'imposer. On relève ici l'importance du point de vue économique quant à la mise en place de solution plus verte.

Paille	GHG (kgCO <sub>2</sub> /kgpolymère)	Prix (\$)
PLA	0,6 à 1,3	0,08
PP	1,6 à 1,9	0,02

*Tableau 1 : Comparaison des alternatives*

L'analyse cycle de vie doit prendre en compte : l'extraction de la matière première, la fabrication de la matière première, la fabrication du produit, sa consommation et la destination de sa fin de vie.

En fonction de la localisation géographique du restaurant, les pailles pourraient se retrouver dans une décharge plutôt que dans une installation de compostage, car toutes les installations de compostage ne peuvent accepter les déchets alimentaires ou les plastiques biodégradables. Les empreintes environnementales et économiques doivent donc prendre en compte un certain nombre de facteurs : où est achetée la paille et comment elle est amenée jusqu'au point de vente ou de distribution, comment elle est fabriquée...

La comparaison avec les pailles en papier peut également être réalisée. Une paille en papier coûte en moyenne 10-20 centimes contre 2 pour une paille en PP. Selon certaines études, la production de paille en papier serait entre 5 et 10 fois plus coûteuse qu'une paille en PP avec le prix de la matière première, de la fabrication, et les coûts généraux [36]. Cependant, ces études ne prennent pas en compte le prix de l'élimination des déchets, les coûts environnementaux et les économies d'échelles (diminution du prix en fonction du volume de production).

Les pailles en papier semblent une solution plus favorable d'après les différents articles car sa fabrication est simple, son coût de production est raisonnable et sa biodégradabilité est intéressante. Il sera donc judicieux d'étudier les facteurs économiques de développement des pailles en papier.

Une étude réalisée en Angleterre en octobre 2018 par le département de l'environnement a étudié les conséquences économiques d'une suppression des pailles en plastique par des pailles en papier. [35]

Paille	Poids (g)	Pollution prod (tCO <sub>2</sub> /1t)	Coût Prod (£)	Émission carbone incinération (tCO <sub>2</sub> /1t)
--------	-----------	---------------------------------------	---------------	--



Papier	1,07	0,93	2,5	0,54
PP	0,55	3,08	0,65	1,34

Tableau 2 : Coût de production et pollution

En considérant que 99,9% des pailles sont collectées pour les déchets et 0,1% dans la mer.

Avec 70% des 99.9% collectées partant pour l'incinération et en comparant les coups (en Angleterre), utiliser des pailles en papier reviendrait à économiser 354 000€ par an.

Cette étude permet de souligner que l'usage de paille en papier, en plus d'être profitable pour l'environnement, et profitable économiquement. Le remplacement des pailles en plastique semble donc viable économiquement.

### C. Environnement économique : facteurs économiques de développement

Pour les pailles en papier, les prévisions d'évolution sont élevées. De nombreuses grandes marques telles que McDonald's ou Starbucks, soucieuses de leurs images, se mettent à utiliser des pailles en papier accélérant un peu plus cette tendance.



Figure 22 : Potentiel marché des pailles en papier. Transparency Market Research, 2018. [37]

Selon le Transparency Market Research, le marché des pailles en plastique sera de 1,6 milliards US\$ d'ici la fin de l'année 2019. Ce produit se situe actuellement dans sa période d'expansion. D'ici 2027, le marché des pailles en papier atteindra 4 milliards de dollars US.

Pour exemple l'évolution de Aardvark, le seul fabricant de paille en papier au USA, a enregistré une augmentation de 5000% de vente en 2018. [36]

Les pailles en plastique deviennent, parmi les autres ustensiles à usage unique, la chose à bannir des habitudes de chacun, et surtout des restaurants et fast food. De plus en plus de gouvernements adoptent des lois contre les objets en plastique à usage unique. Toutes ces actions permettent alors aux entreprises fabricant des pailles biodégradables d'augmenter leur marché et de pouvoir se démarquer. Pour l'instant, les prix des pailles biodégradables sont plus élevés que ceux des pailles en PP, cependant grâce aux lois votées et aux tendances actuelles pour le passage au biodégradable permettront à ces pailles d'avoir une place importante dans le marché.

## D. Contexte législatif et réglementaire

En France, l'objectif du ministère de la transition écologique est d'atteindre le zéro plastique rejeté dans les océans d'ici 2025. [32]

Le 14 septembre 2018, la loi Egalim avait été adoptée et interdisait plusieurs produits en plastique. Ces interdictions ont été repoussées dans le cadre de la loi pacte, ainsi en 2020, les gobelets, verre et assiettes en plastique seront interdits et en 2021 ce sera au tour des pailles, couverts, bâtonnets... [39]

Le 27 mars 2019, le parlement européen a approuvé avec 89% des voix le projet de directive [40] visant à interdire plusieurs produits en plastiques destinés à un usage unique : couverts et assiettes en plastique, pailles, cotons-tiges... La directive consiste à fixer aux états membres de l'UE un objectif de collecte de 90% des bouteilles en plastique d'ici 2029. De plus, les bouteilles devront contenir 25% de plastique recyclé en 2025 et 30% en 2030. [41]

Ce contexte législatif et réglementaire met en place un environnement de plus en plus favorable au développement des solutions alternatives.

# E. Diagramme de PORTER

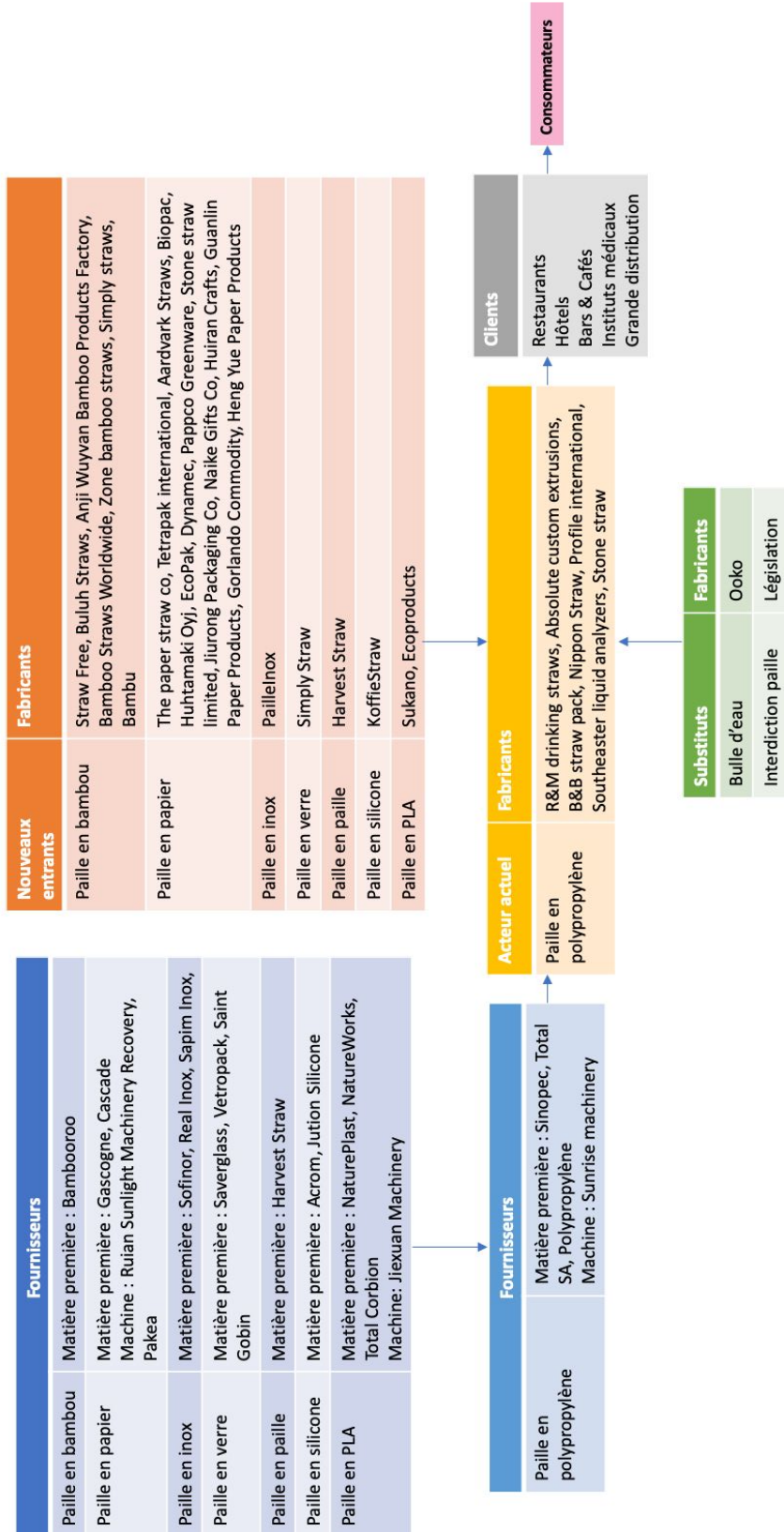


Figure 23 : Diagramme de Porter [42][43][44][45][46][47]

## F. Chaîne de valeur



*Figure 24 : Chaîne de valeurs*

## VII. Perspectives d'évolution

### A. Synthèses des tendances constatées

La prise de conscience actuelle des consommateurs fait tendre la tendance des pailles vers des solutions "eco-friendly". En effet, aujourd'hui la population semble plus concernée par l'environnement : une grande partie des consommateurs préfère acheter des produits bio et fait attention à leur origine.

De plus, il existe de nombreuses associations et organisations de protection de l'environnement qui sensibilisent le monde par rapport aux dangers des plastiques jetés dans la nature. Par exemple, l'association Surfrider Foundation Europe propose de nombreuses actions visant à protéger le littoral et à le nettoyer. L'association regroupe aujourd'hui 12000 adhérents et agit dans 9 pays. [48]

Enfin, l'utilisation des réseaux sociaux permet la diffusion de vidéos et d'informations en temps réel. Ainsi, la majeure partie des utilisateurs peuvent y avoir accès. Les images parfois choquantes permettent à la population de prendre conscience de ces dangers. Au début de l'année 2019, un nouveau challenge a envahi la toile : le trashtag challenge. Lancé par un jeune homme le challenge consiste à nettoyer une zone polluée, des photos avant/après sont alors postées sur les réseaux. Le hashtag et le challenge ont été très largement partagés et copiés. Le hashtag est né en 2015 mais n'a pas connu de succès à ce moment là. C'est en mars 2019 qu'il est relancé par l'américain Byron Roman, son post a été partagé 332 000 fois. Il s'avère que l'action était celle d'un activiste algérien. Son exploit a été repris dans le monde entier. [49]

## B. Diagnostic stratégique

Les solutions envisageables pour les pailles ont été divisées en deux parties car leur utilisation n'est pas la même : d'un côté les pailles à usage unique (papier, bambou, paille...), d'un autre côté les pailles réutilisables (inox, silicone, verre...)

### Paille en papier, bambou, paille et PLA à usage unique

<p><i>Forces</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Utilisation de matériaux recyclables</li> <li>❖ Matériaux aptes au contact alimentaire</li> <li>❖ Produit économique et recyclable</li> <li>❖ Produit biodégradable dans la nature</li> </ul>	<p><i>Faiblesses</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Procédé de fabrication lent (production 3 fois inférieure à celle des pailles en plastiques)</li> <li>❖ Résistance faible aux hautes températures (PLA)</li> <li>❖ Utilisation limitée en temps (dégradation de la paille)</li> <li>❖ Plus cher que le PP</li> </ul>
<p><i>Opportunités</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Législation</li> <li>❖ Mode (fabriqué à base de biomatériaux donc "eco-friendly")</li> <li>❖ Prise de conscience (utiliser des produits recyclables)</li> </ul>	<p><i>Menaces</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Lobbies</li> <li>❖ Prise de conscience (arrêt de l'utilisation des pailles)</li> </ul>

### Paille en inox, verre et silicone réutilisable

<p><i>Forces</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Matériaux aptes aux contacts alimentaires</li> <li>❖ Produit réutilisable</li> <li>❖ Produit recyclable</li> <li>❖ Produit de décoration, à forte valeur ajoutée</li> </ul>	<p><i>Faiblesses</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Procédé de fabrication en plusieurs étapes</li> <li>❖ Pour le verre, chauffage à 1500°C pour la fabrication</li> <li>❖ Relativement cher</li> <li>❖ Nécessite un lavage</li> </ul>
<p><i>Opportunités</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Législation</li> <li>❖ Mode (coloré, aspect, personnalisable...)</li> <li>❖ Prise de conscience (utiliser des produits réutilisables)</li> </ul>	<p><i>Menaces</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Lobbies</li> <li>❖ Prise de conscience (moins de pailles)</li> </ul>

## C. Elaboration de scénarios à partir de jeux d'hypothèses cohérents

Scénario 1 : "2035, La paille en plastique continue d'envahir les océans"

Probabilité : 25%

*Hypothèses :*

- La loi Pacte repoussée
- La production de pailles en plastique augmente
- Les pailles continuent d'être retrouvées dans les océans

En 2035, la loi visant à réduire l'incidence sur l'environnement de certains produits en plastique est encore repoussée. La crainte de la fermeture d'entreprises productrices de plastique et de paille motive les lobbys à empêcher l'application totale de la loi Pacte. Environ 2000 emplois seraient supprimés si la loi Pacte était appliquée. [39]

Désormais l'objectif est de diminuer de 50% la production de plastique destinés à l'emballage alimentaire à usage unique.

La production mondiale de pailles plastiques augmente, les actions de recyclage de ces pailles n'ont pas changé et restent considérées comme pas suffisamment rentable. L'explosion des marchés asiatique et africain associés à la multiplication des fast-food rendent les pailles omni-présentes, même dans les villages les plus éloignés.

Les pailles continuent de flotter dans les océans et de troubler la vie marine. L'impact sur les fonds marins s'accroît, de nombreux bénévoles entreprennent des actions pour préserver la faune et la flore, mais l'impact de notre consommation est trop grand pour être seulement contré par ces associations. Il est nécessaire que le gouvernement prenne des mesures de protection de l'environnement, et que celles-ci soient appliquées à l'échelle mondiale.

Il y a désormais plus de pailles dans les océans que de poissons. Si le monde continue dans cette voie, la vie aquatique ne pourra plus se relever et le point de non retour sera atteint.

Scénario 2 : " 2035, L'utilisation de paille biodégradable permet une renaissance de la vie aquatique."

Probabilité : 65%

*Hypothèses :*

- La loi Pacte est appliquée
- Les pailles en plastiques ne sont plus produites
- Toutes les pailles sont désormais réutilisables ou biodégradables

En 2035, la plupart des pays ont adopté des lois visant à supprimer l'utilisation des pailles en plastique.

Désormais, les chaînes de restauration rapide, les restaurants traditionnels et les hôpitaux fournissent des pailles en papier à la demande. Cette alternative s'est fortement

développée étant donné que sa durée de vie dans une boisson a été allongée et sa vitesse de production a été augmentée.

Quant aux restaurateurs plus "chics" et aux particuliers, les pailles en inox ou en silicone font leur bonheur : leur aspect moderne et le panel de couleurs sont des atouts majeurs, enfin leur réutilisation après lavage ne fait que consolider leur place dans le marché mondial.

L'utilisation de ces pailles biodégradables a permis une réduction de l'impact du plastique sur l'environnement. Avant les pailles plastiques flottaient dans les océans, voguant à la dérive. Ces pailles étaient trop petites pour être recyclées et souvent elles s'envolaient pour se retrouver dans les mers et océans. De nombreux animaux marins confondaient ces pailles avec leur nourriture, provoquant la mort d'un grand nombre d'entre eux.

Aujourd'hui les pailles utilisées se dégradent rapidement dans la nature n'ayant pas d'impact sur la faune et la flore.

### Scénario 3: "2035, La paille n'existe plus"

*Probabilité: 10%*

#### *Hypothèses:*

- Les pailles en plastique sont interdites
- Prise de conscience par la population qui n'utilise plus de pailles
- L'interdiction des pailles s'étend à d'autres pays du monde

En 2035, l'utilisation de paille n'est plus qu'un souvenir. La loi alimentation interdisant les objets à usage unique en plastique a été parfaitement acceptée et mise en place par l'ensemble de la société française. Une prise de conscience de plus en plus importante de la population a rendu l'utilisation de ces objets, même biosourcés et recyclables, marginale. Les pailles n'apparaissent plus comme indispensables. Les hôpitaux utilisent désormais des bulles d'eau pour leurs patients. Les anciens producteurs de pailles se sont pour la plupart reconvertis dans la fabrication de bouteilles biosourcées.

Dans le monde entier, des campagnes de sensibilisation voient le jour. L'union européenne a signé un amendement qui s'appliquera dès l'année prochaine en garantissant l'interdiction de l'usage de pailles pétro sourcées ainsi que de lourdes sanctions judiciaires pour les organismes et les individus ne respectant pas cette loi.

Sous influence du Canada, les USA supprimeront à la même date leur utilisation de pailles pétro sourcées, même si de nombreuses grandes villes n'utilisent plus de pailles depuis déjà plusieurs années.

Les pays asiatiques commencent leur sensibilisation et le dialogue commence sur ce sujet ; le Japon ayant déjà interdit ces objets à usage unique pétro sourcés.

Les premiers effets de ces interdictions sont visibles. Les pailles ne font plus partie du top 10 des objets les plus retrouvés sur les plages. Elles restent cependant visibles et nous rappellent nos erreurs passées.

## D. Analyse des risques associés aux hypothèses des différents scénarios

Le pourcentage de chance que les scénarios se produisent est de:

- 25% pour le scénario 1
- 65% pour le scénario 2
- 10% pour le scénario 3



# CONCLUSION

La paille est utilisée depuis de nombreuses années : au départ pour des raisons pratiques (éviter les dépôts dans les bols communs) puis pour des raisons médicales, elle est aujourd'hui largement utilisée par habitude.

Cependant elle est devenue depuis quelques années, l'un des ennemis principaux des écologistes avec les 8,3 milliards de pailles retrouvées sur les plages en 2018. De nombreuses vidéos et photos chocs ont fini d'alerter le grand public quant à sa dangerosité et son impact sur l'environnement.

Aujourd'hui en polypropylène, les pailles sont vouées à muter. La législation, à travers la loi EGALIM, et la prise de conscience collective permettent l'entrée de nombreuses alternatives sur le marché des pailles. Qu'elles soient en PLA, en bambou, en amidon, en papier, en pâte pour les pailles à usages uniques ou en inox, en silicone et en verre pour les pailles réutilisables, toutes les alternatives sont envisageables et surtout en phase d'élaboration. Les acteurs de ce marché sont de plus en plus nombreux. Leurs parts de marché semblent enclin à un développement rapide.

# Bibliographie

- [1] @NatGeoFrance. « La guerre des pailles : la lutte pour débarrasser les océans du plastique ». In : *Guerre Pailles Lutte Pour Débarrasser Océans Plast. Natl. Geogr.* [En ligne]., 2017. Disponible sur : < <https://www.nationalgeographic.fr/environnement/la-guerre-des-pailles-la-lutte-pour-debarrasser-les-océans-du-plastique> > (consulté le 19 mars 2019)
- [2] Bénis O. « Après les sacs plastiques, la bataille contre les pailles ». [s.l.] : [s.n.], 2018. Disponible sur : < <https://www.franceinter.fr/societe/pollution-la-bataille-contre-les-pailles> > (consulté le 20 février 2019)
- [3] @NatGeoFrance. « Comment les pailles en plastique ont envahi le monde ». In : *Comment Pailles En Plast. Ont Envahi Monde Natl. Geogr.* [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], 2018. Disponible sur : < <https://www.nationalgeographic.fr/environnement/comment-les-pailles-en-plastique-ont-envahi-le-monde> > (consulté le 19 mars 2019)
- [4] « A brief history of how plastic straws took over the world ». In : *Environment* [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], 2019. Disponible sur : < <https://www.nationalgeographic.com/environment/2018/07/news-plastic-drinking-straw-history-ban/> > (consulté le 20 février 2019)
- [5] « D'où vient la paille à boire ? » In : *E-Santé* [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <https://www.e-sante.fr/ou-vient-paille-boire/blog/1414> > (consulté le 20 février 2019)
- [6] « Ca sert à quoi une paille ? sur le forum Blabla 18-25 ans - 03-12-2017 19:11:51 ». In : *Jeuxvideo.com* [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <http://www.jeuxvideo.com/forums/42-51-54310057-1-0-1-0-ca-sert-a-quoi-une-paille.htm> > (consulté le 20 février 2019)
- [7] Libre.be L. « Pourquoi boit-on avec une paille? ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <https://www.lalibre.be/lifestyle/magazine/pourquoi-boit-on-avec-une-paille-59f84500cd703cdd752dd106> > (consulté le 20 février 2019)
- [8] « ISO 18188:2016(fr), Spécifications des pailles à boire en polypropylène ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:18188:ed-1:v1:fr> > (consulté le 20 février 2019)
- [9] « Pompage, Torricelli et fontainiers ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <http://villeminegerard.free.fr/aScience/Physique/PRESSION/Pompe.htm#paille> > (consulté le 27 février 2019)
- [10] « Contact alimentaire : sécurité sanitaire des matériaux et emballages au contact des aliments ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <http://www.contactalimentaire.com/> > (consulté le 20 février 2019)
- [11] Chef K. B. « Quand les pailles aspirent à être normalisées ». In : *ISO* [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <http://www.iso.org/cms/render/live/fr/sites/isoorg/contents/news/2016/02/Ref2047.html> > (consulté le 20 février 2019)

- [12] « Qu'est-ce que le polypropylène ? | MDM ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < [https://www.mdm.fr/fr/qu-est-ce-polypropylene\\_16.html](https://www.mdm.fr/fr/qu-est-ce-polypropylene_16.html) > (consulté le 27 février 2019)
- [13] « Futerro ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < [http://www.futerro.com/fr/index\\_pla.html](http://www.futerro.com/fr/index_pla.html) > (consulté le 3 mars 2019)
- [14] Biopolymères, Cours de Julien Bras
- [15] « Les techniques sucrières – Les 10 étapes de fabrication du sucre ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <https://www.lesucre.com/sucre-a-a-z/les-plantes-sucrieres/process-d-extraction.html> > (consulté le 3 mars 2019)
- [16] « Polysaccharides alimentaires - Obtention de l'amidon ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < [http://biochim-agro.univ-lille1.fr/polysaccharides/co/Contenu\\_1\\_a.html](http://biochim-agro.univ-lille1.fr/polysaccharides/co/Contenu_1_a.html) > (consulté le 3 mars 2019)
- [17] Beaux-Arts D. du G. Des. *Fabrication du papier sur table plate ou sur forme ronde*. [En ligne]. Disponible sur : < <http://lateliergeant.geant-beaux-arts.fr/aaa-classer/fabrication-du-papier/> > (consulté le 3 mars 2019)
- [18] SORBOS FRANCE – *We are SORBOS*. [En ligne]. Disponible sur : < <http://sorbos.fr/> > (consulté le 20 février 2019)
- [19] « Procédé de fabrication ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < </fr/node/110> > (consulté le 20 février 2019)
- [20] Futura. « La fabrication du verre en 5 étapes ». In : *Futura* [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <https://www.futura-sciences.com/sciences/questions-reponses/physique-fabrication-verre-5-etapes-6225/> > (consulté le 20 février 2019)
- [21] Honorine. « Les 12 (vraies) alternatives écologiques aux pailles en plastique ». In : *Lespailles.com* [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], 2019. Disponible sur : < <https://lespailles.com/quelles-alternatives-pailles-plastique/> > (consulté le 27 février 2019)
- [22] « How is Silicone Made? | SIMTEC ». In : *SIMTEC Silicone Parts* [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], 2017. Disponible sur : < <https://www.simtec-silicone.com/how-is-silicone-produced/> > (consulté le 15 avril 2019)
- [23] « EXTRUSION OF THERMOPLASTICS ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <https://www.pitfallsinmolding.com/extrusion1.html> > (consulté le 3 mars 2019)
- [24] « Cooper Technology - Products ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <http://www.coopertech.com/pipe.html> > (consulté le 3 mars 2019)
- [25] Mise en forme des polymères, Cours de Alain Dufresne
- [26] Biocomposites, Cours de Alain Dufresne

- [27]« Paper Drinking Straw Machine - China Forbona Group ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <https://www.forbona.com/paper-straw-machine/paper-drinking-straw-machine> > (consulté le 3 mars 2019)
- [28]« (118) YouTube ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <https://www.youtube.com/watch?v=SiPIYH2bUoo> > (consulté le 15 avril 2019)
- [29]Institut Européen du Cuivre. *La fabrication du tube de cuivre*. [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <https://www.youtube.com/watch?v=zk8pxdMzV5M> > (consulté le 15 mars 2019)
- [30]« Paille De Verre En Pyrex Droite Réutilisable Pour Fête d'anniversaire w/ Brosse • EUR 7,99 ». In : *PicClick FR* [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <https://picclick.fr/Paille-De-Verre-En-Pyrex-Droite-R%C3%A9utilisable-Pour-113218719374.html> > (consulté le 15 mars 2019)
- [31]« Les différentes étapes de la fabrication du verre d'emballage / Le verre d'emballage / Page d'accueil - Verre Avenir ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <http://www.verre-avenir.fr/Le-verre-d-emballage/Les-differentes-etapes-de-la-fabrication-d-u-verre-d-emballage> > (consulté le 15 mars 2019)
- [32]« La fin des pailles en plastique approche, et c'est une très bonne chose ! » In : *Cosmopolitan.fr* [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <https://www.cosmopolitan.fr/la-fin-des-pailles-en-plastique-approche-et-c-est-une-tres-bonne-chose,2020965.asp> > (consulté le 15 avril 2019)
- [33]BFMTV. « L'Union européenne interdit pailles, gobelets et couverts en plastique d'ici 2021 ». In : *BFMTV* [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <https://www.bfmtv.com/politique/l-union-europeenne-declare-la-guerre-aux-produits-en-plastique-a-usage-unique-1591724.html> > (consulté le 15 avril 2019)
- [34]« Pailles, touillettes : les objets en plastique à usage unique bannis de l'UE dès 2021 ». In : *L'Express.fr* [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], 2019. Disponible sur : < [https://www.lexpress.fr/actualite/societe/environnement/pailles-touillettes-cotons-tiges-bannis-de-l-union-europeenne-des-2021\\_2069784.html](https://www.lexpress.fr/actualite/societe/environnement/pailles-touillettes-cotons-tiges-bannis-de-l-union-europeenne-des-2021_2069784.html) > (consulté le 15 avril 2019)
- [35]Simon R. « Impact Assessment ». p. 25.
- [36]Eil K. « Paper straws are better for the environment, but they will cost you ». [s.l.] : [s.n.], 2018. Disponible sur : < <https://www.cnbc.com/2018/07/09/paper-straws-are-better-for-the-environment-but-they-will-cost-you.html> > (consulté le 15 avril 2019)
- [37]« Paper Straws Market Scope, Scenario, SWOT Analysis, Business Overview 2027 ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <https://www.transparencymarketresearch.com/paper-straws-market.html> > (consulté le 15 avril 2019)
- [38]*Plastic\_Straw\_Program\_Activist\_Toolkit.pdf*. [En ligne]. Disponible sur : < [http://publicfiles.surfrider.org/Plastics/Plastic\\_Straw\\_Program\\_Activist\\_Toolkit.pdf](http://publicfiles.surfrider.org/Plastics/Plastic_Straw_Program_Activist_Toolkit.pdf) > (consulté le 29 mars 2019)

- [39] « Le Sénat repousse à 2021 l'interdiction de certains ustensiles en plastique ». In : *Actu-Environ*. [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <https://www.actu-environnement.com/ae/news/Senat-repousse-2021-interdiction-certains-ustensiles-plastique-32790.php4> > (consulté le 29 mars 2019)
- [40] *news-33170-resolution-plastique-Plmt-UE.pdf*. [En ligne]. Disponible sur : < <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-33170-resolution-plastique-Plmt-UE.pdf> > (consulté le 20 mars 2019)
- [41] « L'Union européenne vote l'interdiction des plastiques jetables en 2021 ». In : *Actu-Environ*. [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <https://www.actu-environnement.com/ae/news/Union-europeenne-interdiction-plastiques-jetables-2021-33170.php4> > (consulté le 29 mars 2019)
- [42] *The case against straws*. [En ligne]. *Our Seas Our Future Charit. Trust*. 3 décembre 2016. Disponible sur : < <http://osof.org/the-case-against-straws/> > (consulté le 29 mars 2019)
- [43] « Bamboo Straws Market Global Industry Analysis, Size and Forecast, 2018 to 2028 ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <https://www.futuremarketinsights.com/reports/bamboo-straws-market> > (consulté le 29 mars 2019)
- [44] « Drinking Straw Market 2018-2023 Key Players: R&M Plastic Products, Aardvark, Absolute Custom Extrusions, B&B Straw Pack, Nippon Straw, and More - Press Release - Digital Journal ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <http://www.digitaljournal.com/pr/4044157> > (consulté le 20 mars 2019)
- [45] « Harvest Straws - Sustainable Drinking Straw ». In : *Harvest Straws - Sustain. Drink. Straw* [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <http://www.harveststraws.com/> > (consulté le 29 mars 2019)
- [46] « Water Bottle Accessories, Caps, Lids, Maintenance Kits ». In : *Klean Kanteen* [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <https://www.kleankanteen.com/collections/accessories> > (consulté le 20 mars 2019)
- [47] « About Us ». In : *KoffieStraw* [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <https://koffiestraw.com/pages/about-us-v2> > (consulté le 29 mars 2019)
- [48] « ONG Européenne De Protection Des Océans ». In : *Surfrider* [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <https://www.surfrider.eu/> > (consulté le 29 mars 2019)
- [49] *Le Parisien. Le trashtag challenge, le défi de Younes pour nettoyer la planète*. [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <https://www.youtube.com/watch?v=ijOXRfIBJKg> > (consulté le 29 mars 2019)
- [50] « Loliware ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < [https://www.loliware.com/?fbclid=IwAR23zQ56TFgLy9ebw1BEU-ikzc4HDEgckWDeZFSLXvUzdRTve\\_Cf3qVU](https://www.loliware.com/?fbclid=IwAR23zQ56TFgLy9ebw1BEU-ikzc4HDEgckWDeZFSLXvUzdRTve_Cf3qVU) > (consulté le 15 mars 2019)
- [51] « Fiche générale relative à la réglementation des matériaux au contact des denrées alimentaires ». In : *Portail Ministères Économiques Financ.* [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : <

<https://www.economie.gouv.fr/dgccrf/Fiche-generale-relative-a-la-reglementation-des-ma> >  
(consulté le 15 avril 2019)