

***Projet de Physique P6***  
***STPI/P6/2022 –20***

***Les brûleurs à swirl***



**Etudiants :**

**Mathis LESAGE**

**Paul GOOSSENS**

**Marine TOUBIN**

**Anthony ROURE**

**Thomas MAIRESSE**

**Victor PASTEL**

---

**Enseignant-responsable du projet :**

**David HONORE**



Date de remise du rapport : **08/06/2022**

Référence du projet : **STPI/P6/2022 –20**

Intitulé du projet : **Les brûleurs à swirl**

Type de projet : **Bibliographique et expérimental**

Objectifs du projet :

- **Appréhender l'effet de swirl**
- **Comprendre l'intérêt des swirlers dans l'industrie**
- **Découvrir et tenter de créer une zone de recirculation**
- **Comprendre l'enjeu derrière les biocarburants**
- **Calculer un nombre de swirl pour un écoulement**
- **Comparer nos recherches bibliographiques à nos résultats expérimentaux**

Mots-clefs du projet : **Swirl, combustion, zone de recirculation, bioéthanol**

## TABLE DES MATIERES

Introduction.....	6
Méthodologie / Organisation du travail.....	7
1. Chapitre 1 - Les swirlers.....	8
1.1. La combustion.....	8
1.2. Effet de swirl.....	8
1.3. Stabilisation d'une flamme par mise en rotation de l'écoulement.....	9
1.4. Combustion prémélangée et non-prémélangée.....	10
1.5. Différents types de swirler.....	10
1.6. Applications.....	11
2. Chapitre 2- Nombre de Swirl & caractéristiques de la flamme.....	12
2.1. Le nombre de swirl.....	12
2.2. Influence du nombre de Swirl sur la flamme.....	13
2.3. Phénomènes instationnaires.....	14
2.3.1. Zone de recirculation.....	14
2.3.2. Phénomènes de Precessing Vortex Core et de respiration de la zone de recirculation.....	15
2.4. Expériences et création de nouveaux brûleurs.....	16
2.4.1. Modèle de base.....	16
2.4.2. Modèle 1 : augmentation de l'inclinaison des ailettes.....	17
2.4.3. Modèle 2 : augmentation de la largeur des ailettes.....	17
2.4.4. Modèle 3 : augmentation du nombre d'ailettes.....	18
2.5. Synthèse et analyse des expériences.....	18
3. Chapitre 3 - Chimie.....	20
3.1. Étude de la combustion.....	20
3.1.1. Couleur d'une flamme.....	20
3.1.2. Expérience.....	21
3.2. Les biocarburants .....	22
3.2.1. Les différentes générations de biocarburants.....	22
3.2.2. Le bioéthanol.....	23

3.3. La chimie verte.....	24
Conclusions & Perspectives.....	25
Bibliographie.....	26
Annexes .....	28
Annexe 1: Schéma du Swirler Sydney fonctionnant avec des injecteurs tangentiels et des injecteurs le long de l'axe.....	28
Annexe 2: Photo des brûleurs à swirl utilisés durant notre projet.....	29
Annexe 3: Photo de flammes à différentes températures.....	30
Annexe 4: Schéma de production des biocarburants de première génération.....	31
Annexe 5: Schéma de production des biocarburants de seconde génération.....	32
Annexe 6: Schéma de production des biocarburants de troisième génération.....	33
Annexe 7: Schéma d'émission du CO2 dans l'air avec la production de bioéthanol.....	34

## INTRODUCTION

De nos jours, pour atteindre des hautes températures, les industriels utilisent des brûleurs à fort débit et à forte puissance. Il est clair que les flammes produites au sein de ces installations doivent nécessairement être stabilisées afin de limiter tout risque d'incident. L'un des moyens les plus courants pour arriver à ce résultat est de stabiliser la flamme dans un écoulement tourbillonnaire. Ce dernier permet également d'optimiser la combustion et de réduire les émissions polluantes.

A ce jour, deux technologies utilisant des phénomènes aérodynamiques existent pour stabiliser une flamme: le swirler et le bluff body.

Dans le cadre de notre étude, nous étudierons le brûleur à swirl ainsi que tous les phénomènes qui en découlent afin de bien comprendre cette technologie.

Ainsi, dans un premier temps nous allons situer le contexte de notre sujet en définissant ce qu'est l'effet de swirl afin de comprendre l'intérêt de ces brûleurs dans l'industrie. Nous allons également étudier les différents types de swirlers, leurs avantages et leurs inconvénients.

Ensuite, dans une seconde partie, nous verrons comment quantifier l'effet de swirl à travers les expériences que nous avons réalisées avec différents modèles de swirlers. Nous y ferons quelques analyses en comparant ce que l'on a pu observer avec nos recherches bibliographiques. De plus, l'un des objectifs d'un swirler étant de stabiliser une flamme, nous allons également nous intéresser aux phénomènes instationnaires qui perturbent cette stabilité.

Enfin dans une dernière partie nous nous intéresserons à l'aspect chimique engendré par les brûleurs à swirl. Nous commencerons par expliquer la couleur des flammes et le principe de la combustion. Par la suite nous expliquerons l'expérience de combustion que nous avons réalisée et nous terminerons en abordant le thème des biocarburants, du bioéthanol et de la chimie verte.

## MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Au début de notre projet nous avons fait des recherches bibliographiques chacun de notre côté afin de bien assimiler le sujet et voir les axes de recherche à partir de notre expérience. Ensuite, afin d'optimiser notre temps et de gagner en efficacité, nous avons décidé de se répartir les tâches en fonction de nos préférences et des enseignements choisis au semestre 4. La répartition a été la suivante :

Tableau 1: répartition des tâches

Thomas MAIRESSE	Combustion, le nombre de swirl, phénomène de Vortex Breakdown et poster.
Paul GOOSSENS	Moyens pour stabiliser une flamme, combustion pré mélangée et non-prémélangée, swirlers à injection tangentielle et phénomènes instationnaires.
Mathis LESAGE	Influence du nombre de swirl, effet de swirl, phénomènes instationnaires, influence de la zone de recirculation, applications, création des trois brûleurs (CAO et fabrication) et rapport.
Anthony ROURE	Nombre de swirl (calcul, signification, influence), observation des flammes et analyses et relevés thermiques.
Marine TOUBIN	Couleur des flammes, les biocarburants, le bioéthanol, expérience de calcul de la masse et poster.
Victor PASTEL	Combustion, chimie verte et les résultats de l'expérience.

A chaque début de séance, nous faisons un briefing entre nous pour savoir où en était l'avancement du projet, ce qu'il fallait chercher pour les séances prochaines etc. Pour cela, nous avons un Google doc qui nous permettait d'y mettre des informations et nos références bibliographiques. Y figurait également tous les axes de recherches qui étaient mis à jour à chaque séance afin de savoir sur quoi il fallait faire des recherches.

La communication au sein du groupe a été essentielle dans la mesure où cela a été très fréquent que l'on se partage des informations qui pouvaient intéresser certaines personnes du groupe.

## 1. CHAPITRE 1 - LES SWIRLERS

### 1.1. La combustion

Avant d'aborder l'effet de swirl et de parler de flamme, donnons quelques notions fondamentales sur la combustion. C'est une réaction chimique exothermique d'oxydo-réduction selon le schéma global :

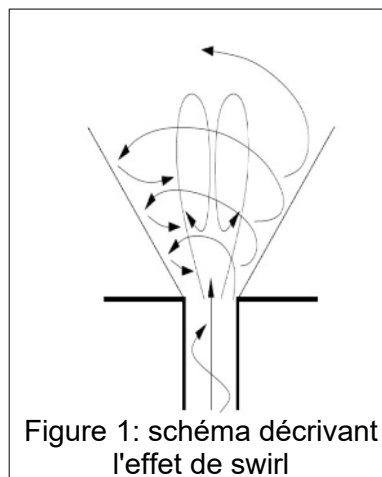
Combustible + Comburant = Produits de combustion + Chaleur

Pour qu'une combustion soit réalisable, trois critères sont nécessaires. Ceux-ci forment le triangle du feu. On a tout d'abord un combustible qui joue le rôle réducteur, c'est-à-dire l'objet que l'on brûle, le bioéthanol dans nos expériences. Ensuite, il faut un comburant afin de jouer le rôle d'oxydant qui est très souvent le dioxygène de l'air ambiant et pour finir une énergie d'activation, en général une flamme ou une étincelle. Une combustion produit de l'énergie mais aussi des produits qui varient en fonction du combustible que l'on utilise. La combustion idéale du bioéthanol entraîne la création de 2 produits : le dioxyde de carbone  $CO_2$  et de l'eau  $H_2O$ . Nous reviendrons sur ce résultat dans le chapitre 3.

Une combustion est aussi caractérisée par son pouvoir calorifique qui correspond à l'énergie obtenue par la combustion d'un kilogramme de combustible que l'on pourra étudier lors de la partie dédiée à la chimie.

### 1.2. Effet de swirl

On dit qu'un écoulement est "swirlé" lorsque le fluide a un mouvement de rotation et de translation suivant la direction principale de l'écoulement. Le fluide prend alors la forme d'un tourbillon. Nous pouvons distinguer deux zones dans ce type d'écoulement, l'une proche de l'axe de rotation où le fluide se comporte comme un bloc solide en rotation autour de l'axe et l'autre où le fluide a un comportement plutôt chaotique et qui subit l'entraînement de la masse de fluide en rotation autour de l'axe.





Dans les brûleurs à swirl, l'écoulement est turbulent, c'est-à-dire que la vitesse des gaz mesurée en un point, fluctue continuellement. Ce phénomène découle de la mise en rotation de l'air qui génère un écoulement tourbillonnaire hélicoïdal induisant un gradient radial négatif de pression vers l'axe (cf figure 1). Si ce dernier atteint une valeur critique (cf 2.1 Le nombre de swirl), cette zone dépressionnaire se transforme en une zone de recirculation. De nombreuses études concernant la turbulence dans ce type de combustion ont montré que le phénomène de swirl assurait un mélange efficace des différentes espèces chimiques et une augmentation de l'intensité de combustion.

Par ailleurs, le débit de combustible brûlé par unité de volume est plus grand en proportion. Il permet donc d'accroître considérablement l'énergie dégagée par unité de volume. C'est pour cette raison que tous les brûleurs qui nécessitent une forte puissance tels que les turboréacteurs utilisent une combustion turbulente.

### **1.3. Stabilisation d'une flamme par mise en rotation de l'écoulement**

Avant toute chose, pour stabiliser une flamme, il est nécessaire de disposer d'une source de chaleur permanente et suffisamment intense dans l'optique d'amorcer des réactions de combustion. Pour cela, on utilise en industrie des artifices aérodynamiques qui ont pour but de créer une zone de recirculation en aval du nez du brûleur au sein de laquelle les produits de combustion sont piégés. Ainsi, cette dépression va mélanger les gaz chauds aux gaz frais et alimenter ainsi la réaction par des sources de chaleur et d'espèces chimiques actives (radicaux). Ces phénomènes induisent donc la stabilisation de la flamme. [1]

Dans le rapport qui suit, nous nous sommes intéressés à un artifice aérodynamique qui permet la mise en rotation du fluide dans le brûleur. Ces artifices peuvent être assimilés à de petites ailettes qui permettent de mettre en rotation l'écoulement et ainsi de créer l'effet de swirl.

La plupart des brûleurs se décomposent comme suit. Il comporte en général un conduit cylindrique pour l'air où il est mis en rotation grâce à des ailettes (effet de Swirl). Le combustible (bio-éthanol) est quant à lui disponible en quantité suffisante dans un compartiment placé au centre du cylindre. Il faut ensuite déclencher la combustion du bioéthanol et le placer au sein du conduit pour apercevoir une flamme plus ou moins stabilisée par effet de Swirl.

## 1.4. Combustion prémélangée et non-prémélangée

Il existe également d'autres types de combustion qui cette fois ne dépendent pas du mouvement de la flamme mais plutôt de la composition des réactifs, c'est-à-dire du gaz ou du liquide que l'on va brûler ainsi que du comburant. On peut ainsi parler soit de combustion pré mélangée ou non-prémélangée. Cette dernière fera l'objet de ce présent rapport.

On parle de combustion prémélangée lorsque les réactifs (combustible et comburant) sont déjà mélangés avant d'entrer en combustion. Ils ne sont donc pas combinés grâce à la turbulence. Ce type de combustion est la situation la plus efficace en termes de dégagement d'énergie. Cependant, les flammes pré mélangées sont particulièrement sensibles au retour de flamme, au soufflage et aux transitions de topologie.

En revanche, les combustions non-prémélangées dépendent, quant à elles, de la turbulence puisque c'est cette dernière qui permet aux réactifs de se mélanger. En effet, le combustible et le comburant sont amenés séparément. Ce type de brûleur permet une plus grande souplesse de fonctionnement et une meilleure sécurisation de l'installation. Cependant, dans ce cas de figure, l'air et le combustible ne sont pas parfaitement mélangés avant la réaction de combustion. Par conséquent, ces types de mélange donnent généralement une combustion de mauvaise qualité et produisent des hydrocarbures non brûlés, de la suie et d'importantes émissions polluantes ( $\text{NO}_x$  et  $\text{CO}$ ). [2]

## 1.5. Différents types de swirler

Pour créer un écoulement swirlé, il existe plusieurs solutions technologiques. La première, celle qu'on utilise par ailleurs, consiste à injecter le carburant et l'air le long de l'axe et à créer l'effet de swirl grâce à des ailettes qui vont mettre en rotation cet écoulement. Cependant, ce type de dispositif génère des pertes de charge importantes, et l'intensité du tourbillon est limitée. [3]

Une autre solution technologique est l'utilisation d'injecteurs tangentiels combinés avec des injecteurs le long de l'axe (cf Annexe 1). Ici, la grande différence réside dans l'absence de pales pour réaliser l'effet de Swirl. Elles sont remplacées par des injecteurs tangentiels. Cet ensemble possède l'avantage de pouvoir régler séparément les débits d'air axiaux et tangentiels. Il est ainsi possible d'obtenir une large gamme d'intensité de rotation pour un débit d'air total constant. Cependant, ce type d'installation est plus complexe à mettre en œuvre. On retrouve ainsi ces solutions technologiques dans l'industrie pour des utilisations bien spécifiques. [4]

## 1.6. Applications

L'effet de swirl se retrouve dans de nombreux systèmes industriels basés sur la combustion. Les injecteurs mettent le flux en rotation pour créer un mouvement tourbillonnaire qui aide à stabiliser la combustion. Les brûleurs à tourbillons sont par exemple utilisés dans les chaudières et les fours industriels pour de la combustion de matériaux. On peut citer le brûleur Pillard GRC 70 MW, le brûleur John Zink Co. 12 MW, ou le brûleur Proyce S.A. TENOX 17 MW qui sont des exemples utilisant cette technologie. [5]

Ces dispositifs sont également utilisés dans les turbines à gaz pour la production d'électricité.

La propulsion des avions est également assurée par des moteurs équipés d'injecteurs tourbillonnaires d'air et de carburant. Le Rolls-Royce Trent 900 équipant l'Airbus A380 et le General Electric GENx installé sur le Boeing 787 en sont deux exemples célèbres. [5]

Les swirlers à injection tangentielle sont également utilisés dans les moteurs à combustion interne. Il s'agit de donner aux gaz frais, introduits dans la chambre de combustion du moteur lors de la phase d'admission, une vitesse de rotation autour de l'axe du cylindre. L'intérêt de générer du swirl dans un moteur à combustion interne est d'améliorer l'homogénéité du mélange air-carburant dans la chambre de combustion. La vitesse de combustion s'améliore et donc le rendement de combustion du moteur devient ainsi meilleur.

Il semble également important de rappeler que les écoulements peuvent aussi être de nature non-réactive, c'est-à-dire des écoulements où il n'y a pas de combustion. Pour les écoulements non-réactifs, on peut retrouver un effet de swirl dans les cyclones séparateurs, les tourbillons de sillages des avions ou les machines d'épandage agricole. Des phénomènes naturels tels que les tornades ou les cyclones entrent aussi dans la catégorie des écoulements swirlés. [6]

## 2. CHAPITRE 2- NOMBRE DE SWIRL & CARACTÉRISTIQUES DE LA FLAMME

Les méthodes actuelles de conception de brûleurs au gaz naturel sont essentiellement basées sur de l'empirisme. En effet pour ces écoulements, le fort couplage entre la chimie et la turbulence rend délicat l'utilisation des modèles classiques (équation de Navier Stokes moyenné). Il est donc difficile de prévoir à l'avance le comportement d'une flamme dans ce genre d'installation.

### 2.1. Le nombre de swirl

Pour définir un écoulement, deux grandeurs sans dimension sont habituellement utilisées. La première, bien connue en mécanique des fluides, est le nombre de Reynolds (Re) qui caractérise le régime d'un écoulement (laminaire, transitoire, turbulent). La seconde est le nombre de Swirl (S), qui permet de décrire l'intensité de la rotation d'un écoulement. Plus ce nombre est important plus le tourbillonnement est fort. Ce dernier peut être calculé de différentes manières, dont chacune à ses avantages et ses inconvénients.

Tout d'abord, par définition la formule pour calculer ce nombre de swirl, en fonction des flux axiaux de quantité de mouvement axiale et tangentielle  $G_x$  et  $G_\theta$  ainsi que du rayon ou de la largeur de la conduite R est :

eq 1. 
$$S = \frac{G_\theta}{R G_x}$$

Cette définition mathématique a pour avantage d'être précise et extrêmement polyvalente car elle peut s'adapter à tout type de géométrie de swirler. Cependant, elle nécessite de pouvoir mesurer précisément des vitesses axiales et tangentielles ce qui est impossible sans avoir les outils adaptés.

Par conséquent, il nous a été nécessaire de chercher une nouvelle méthode pour calculer le nombre de swirl produit par notre mécanisme mais cela n'a pas été simple. En effet, nous avons donc dû trouver comment le calculer en fonction des caractéristiques géométriques de notre système. Or, cette formule va évidemment changer pour chaque nouveau type de swirler.

Nous avons finalement obtenu une formule adaptée à notre cas et ne faisant appel qu'à des données géométriques que sont l'angle d'inclinaison  $\theta$  de l'ailette par rapport à la verticale, et du rapport  $a = \frac{r_1}{r_2}$  avec  $r_1$  et  $r_2$  les rayons intérieurs et extérieurs de l'ailette [1] :

eq 2. 
$$S \simeq \frac{\tan(\theta)}{3} \cdot \frac{1-a^3}{1-a^2}$$

Cette nouvelle définition nous permet donc d'estimer le nombre de swirl plus facilement. Cependant, il reste important de garder un regard critique sur ce résultat. En effet, cette méthode reste approximative et la valeur obtenue nous permet uniquement de nous donner une vague idée de la valeur réelle. Ce calcul ne prend pas en compte la vitesse des gaz et n'est valable que pour des valeurs d'angles inférieures à  $60^\circ$ .

## 2.2. Influence du nombre de Swirl sur la flamme

Chen et Driscoll [7] ont montré que lorsque le nombre de swirl augmente, la longueur de la flamme peut être réduite d'un facteur 5. L'écoulement swirlé permet donc d'obtenir des flammes plus puissantes tout en étant plus compactes. En comparaison avec un brûleur standard, un brûleur à swirl permet donc de réduire la taille de l'installation du fait de la compacité de la flamme produite.

Susset [8] quant à lui met en évidence que l'augmentation du nombre de swirl permet d'obtenir une flamme plus stable. Il explique que plus le nombre de swirl est faible et plus la flamme semble « molle » et bouge chaotiquement. Pour prouver ce résultat, il a tout simplement comparé deux flammes avec un nombre de swirl respectif de  $S=0.1$  et  $S=0.82$ . Il a observé que pour le plus faible nombre de swirl, la zone réactive est plus large et sa position fluctue plus radialement que pour un nombre de swirl plus élevé.

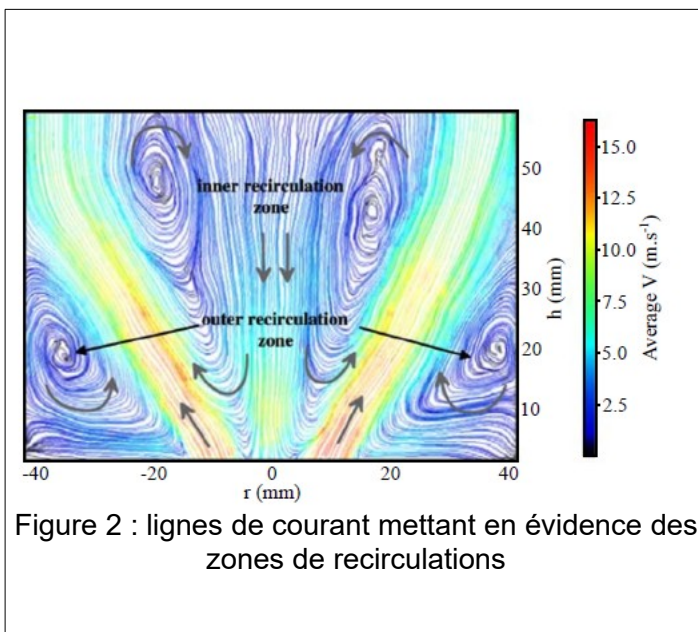
Chen [9] a également remarqué que la formation de  $\text{NO}_x$ , qui est un polluant, dépend du nombre de swirl. A travers ses expériences, il a pu montrer que plus le nombre de swirl est élevé, plus la formation de  $\text{NO}_x$  diminue. Il explique que dans un fort écoulement swirlé, des cisaillements importants homogénéisent le mélange de gaz frais ce qui évite la formation des flammes de diffusion génératrice de  $\text{NO}_x$ . Aussi, le mélange gaz chauds/gaz frais est aussi accru, on évite ainsi la création de  $\text{NO}_x$  thermiques.

## 2.3. Phénomènes instationnaires

Il est clair que le nombre de swirl influe sur la flamme et peut permettre l'apparition d'une zone de recirculation. Différents phénomènes instationnaires peuvent ainsi apparaître à cause de cette dernière. On parle principalement de Vortex Breakdown, de Respiration (contraction/dilatation) et de Precessing Vortex Core. Ces instationnarités interagissent de manière forte avec la flamme.

### 2.3.1. Zone de recirculation

Rawe et Kremer [10] déclarent que dans un écoulement swirlé, la mise en rotation de l'air génère un écoulement tourbillonnaire hélicoïdal induisant un gradient radial négatif de pression vers l'axe. Si cette dépression est suffisamment importante, elle peut générer une zone de recirculation. Ce phénomène est appelé le Vortex Breakdown. Cette instabilité hydrodynamique modifie ainsi la structure du vortex.



Beér et Chigier [11] rapportent quant à eux que pour les écoulements swirlés non-réactifs, un nombre de swirl supérieur à 0.6 est nécessaire pour établir une zone de recirculation interne. Cependant, avec l'addition d'une flamme et donc d'un dégagement de chaleur, des zones de recirculation peuvent apparaître dans les écoulements ayant des nombres de swirl sensiblement plus petits. Pour prouver ce résultat, Tangirala et Driscoll [12] ont montré qu'en condition réactive, la formation de la zone de recirculation est favorisée. En effet, ils ont effectué la même expérience sans combustion et ils ont pu remarquer l'absence de ce phénomène.

Dans certaine configuration comme on peut le voir figure 2, il existe également des zones de recirculation latérales des produits de combustion en sortie du brûleur. Elles vont participer au mélange de l'écoulement entre les gaz et l'air ambiant. Ainsi, ces tourbillons homogénéisent le mélange en augmentant la surface de contact entre l'air, les gaz naturels et les produits de combustion. La température du milieu ambiant est alors augmentée.

Ces structures tourbillonnaires sont causées par la précession de l'écoulement.

### 2.3.2. Phénomènes de Precessing Vortex Core et de respiration de la zone de recirculation

Syred [13] a mis en évidence la présence de fluctuations de position du jet instantané de structures tourbillonnaires dans le plan  $(x, r)$ . Cette fluctuation est associée à deux types de mouvements: la précession du noyau tourbillonnaire autour de l'axe du brûleur et la « respiration » (dilatation/contraction) de la zone de recirculation.

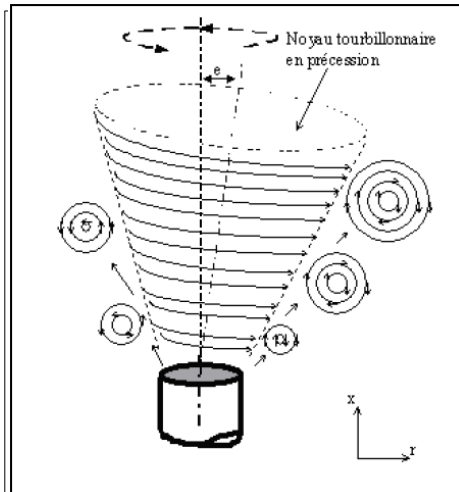


Figure 3 : schéma montrant le phénomène de précession du noyau tourbillonnaire

La précession du noyau tourbillonnaire (Precessing Vortex Core : PVC) est une instabilité tridimensionnelle périodique due à l'interaction entre le noyau tourbillonnaire et le milieu environnant. Ce phénomène se traduit par une inclinaison de l'axe de l'écoulement et de la zone de recirculation par rapport à l'axe du brûleur. Ce phénomène de précession n'apparaît pas uniquement lorsque le nombre de swirl est élevé.

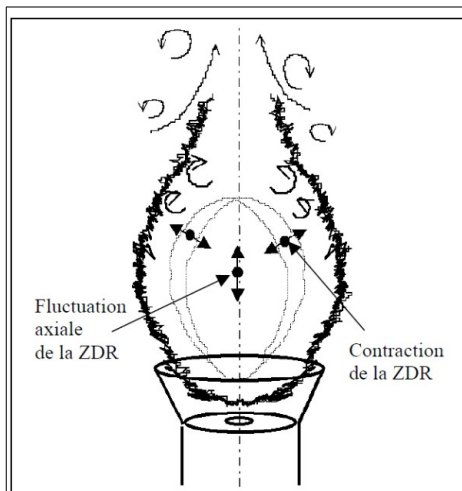


Figure 4 : schéma montrant le phénomène de respiration de la zone de recirculation

La respiration de la zone de recirculation quant à elle, est induite par la libération périodique des produits de combustion contenus au sein de celle-ci. On a donc l'impression que la zone de recirculation oscille en se contractant et en se dilatant.

Cependant comme l'explique Susset [8], l'amplitude de ces instabilités n'est pas modifiée par l'augmentation de l'intensité de rotation de l'écoulement. La morphologie de la zone de recirculation est aussi invariante en fonction du nombre de swirl.



## 2.4. Expériences et création de nouveaux brûleurs

Après plusieurs estimations de l'angle des ailettes du brûleur initial grâce à différentes méthodes (numériques et manuelles) nous avons obtenu un angle  $\theta \approx 59^\circ$ . Cette valeur est sûrement peu précise mais elle reste tout de même intéressante pour pouvoir ensuite la comparer avec les nombres de swirl géométrique des nouveaux designs créés dont l'angle, le nombre et la largeur des ailettes ont changé.

Désormais capable d'obtenir un nombre de swirl ne dépendant que de la largeur des ailettes ainsi que de leur inclinaison (cf eq.2), nous avons donc souhaité modéliser sur le logiciel Solidworks trois nouveaux modèles.

Pour des facilités de fabrication, nous avons utilisé l'impression 3D pour fabriquer trois petits cylindres en PLA comprenant les ailettes disposés sur des supports cylindrique en aluminium contenant le combustible. Nous tenons à remercier chaleureusement M.Breteau d'avoir accepté de s'occuper de la fabrication de ces pièces. Nous avons pris la liberté d'utiliser directement le socle en aluminium comme réservoir pour des raisons de simplicité de fabrication puisque nous n'avons pas eu besoin d'usiner une pièce faisant office de réservoir. De plus, ce compartiment a été conçu trois fois plus petit que celui original afin de maximiser le contact entre la flamme et l'air swirlé. Ces trois modèles ont été conçus de telle sorte à ce qu'un paramètre soit modifié à la fois. Ces paramètres sont l'inclinaison des ailettes, leur largeur et leur nombre. Ces derniers pouvant faire varier le nombre de swirl d'après notre formule, l'objectif a été de pouvoir corrélérer des comportements de flamme spécifiques à des nombres de swirl particuliers. (cf Annexe 2)

Ceci nous permettra donc de constater si la forme des flammes créées est cohérente au nombre géométrique de swirl associé à chaque swirler.

### 2.4.1. *Modèle de base*

Ce modèle, dont nous avons déjà brièvement parlé précédemment comprend des ailettes de rayons intérieur et extérieur  $r_1 = 34$  mm et  $r_2 = 42$  mm, et d'inclinaison estimée  $\theta \approx 59^\circ$ .



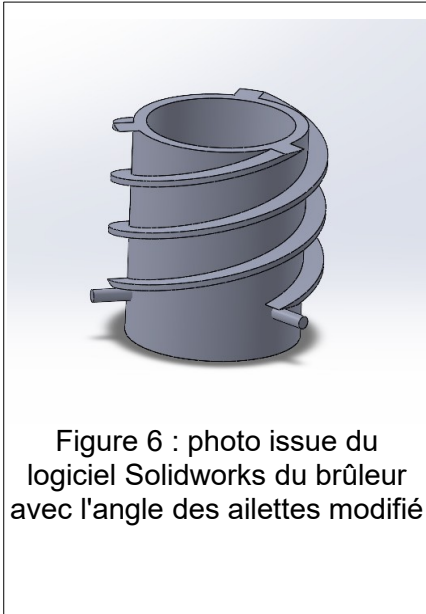
Figure 5 : flamme du brûleur initial

Ainsi nous obtenons d'après notre formule :

$$S=0,76$$



### 2.4.2. *Modèle 1 : augmentation de l'inclinaison des ailettes*



Ce brûleur modélisé sur SolidWorks puis imprimé, comprend des ailettes de rayons intérieur et extérieur  $r_1 = 34$  mm et  $r_2 = 42$  mm, identique aux dimensions du modèle initial. L'inclinaison est estimée numériquement à  $\theta \approx 73.30^\circ$ . Ici, les ailettes font un tour complet autour du cylindre tandis que pour le modèle original, elles ne parcourent qu'un demi tour.

Ainsi nous obtenons d'après notre formule :

$$S=1,51$$

### 2.4.3. *Modèle 2 : augmentation de la largeur des ailettes*



Ce modèle a également été modélisé numériquement puis imprimé et testé. Il comprend des ailettes de rayons intérieur et extérieurs  $r_1 = 26$  mm et  $r_2 = 42$  mm, et d'inclinaison estimée numériquement à  $\theta \approx 59,05^\circ$ . Ici, nous avons agrandi les ailettes de 8 mm afin de pouvoir faire pénétrer plus d'air dans le système.

Ainsi nous obtenons d'après notre formule :

$$S=0,69$$

### 2.4.4. *Modèle 3 : augmentation du nombre d'ailettes*



Figure 8 : photo de la flamme du brûleur modélisé avec une augmentation du nombre d'ailettes

Ce modèle conçu numériquement, n'est pas censé avoir d'influence sur l'écoulement d'après la formule que nous utilisons. En effet, les ailettes sont de mêmes dimensions. Seul leur nombre à changer ce qui n'est pas un paramètre influent le nombre de Swirl d'après notre formule. Cependant, nous pensons que l'augmentation du nombre d'ailettes peut aider à rendre le flux plus régulier et ainsi impacter la combustion. Ce modèle comprend donc sept ailettes ayant les mêmes dimensions que celles du modèle de base, c'est à dire :  $r_1 = 34$  mm et  $r_2 = 42$  mm ;  $\theta \approx 59,04^\circ$

Ainsi nous obtenons d'après notre formule :

$$S=0,76$$

## 2.5. Synthèse et analyse des expériences

Contrairement à ce que l'on pensait au départ, les swirlers imprimés en PLA ont plutôt bien résisté à la chaleur des flammes. En effet, nous avons pu remarquer grâce à un thermocouple que la chaleur se diffusait très bien dans le tube et qu'elle se stockait peu au niveau du réservoir où brûle la flamme. D'après nos mesures qui ont été réalisées pendant des expériences d'une vingtaine de minutes, la température des swirlers n'a jamais dépassé  $55^\circ\text{C}$ , ce qui est la température à laquelle où le PLA commence à se déformer. Nous avons à chaque fois mesuré des températures de l'ordre de  $40^\circ\text{C}$ .

Sur le brûleur qui nous a été prêté par l'INSA, nous avons observé que la flamme a bel et bien un mouvement tourbillonnaire. Cependant, la zone réactive est très turbulente et assez large. Dans ce cas de figure, on s'attend à avoir un nombre de swirl faible.

Concernant la flamme du brûleur 1, elle est plus petite et ne tourne pas autant que celle générée par celle du modèle de base. Cela vient contredire les valeurs des nombres de swirl des deux modèles car l'augmentation de l'angle des ailettes aurait dû selon notre formule le faire passer de 0,76 à 1,51. Or, par l'observation nous pouvons affirmer que le nombre de swirl est ici bien plus faible. Cela peut s'expliquer par le fait qu'une trop forte augmentation d'angle diminue fortement la capacité d'aspiration de notre système à cause des frottements sur la paroi. Les quantités de mouvement axiale et tangentielle sont donc fortement diminuées ce qui expliquerait la différence notable entre le nombre de swirl géométrique et le nombre de swirl effectif.

A propos de la flamme du brûleur 2, malgré un nombre de swirl calculé inférieur à celui du modèle de base (0,69 contre 0,76), elle s'est avérée être extrêmement performante. En effet, nous avons pu observer une flamme plus petite, plus fine, mieux centrée et plus stable que les autres. En effet, la flamme a un tel mouvement de rotation qu'en la regardant de profil celle-ci semble presque immobile. Nous avons pu noter que la hauteur maximale de la flamme est également plus basse d'environ 10cm en comparaison avec les autres modèles. Comme expliqué précédemment, cette réduction de hauteur décrit un nombre de swirl plus élevé. De plus, on a observé que cette flamme est plus bleue que les autres. Cela peut signifier une plus haute température ou bien une meilleure oxygénation de la flamme. La première hypothèse semble peu probable étant donné que nous avons obtenu des températures ne dépassant pas les 280°C en sortie du tube en verre, là où avec les autres modèles, nous avons pu mesurer des températures se stabilisant entre 420 et 450°C. La seconde hypothèse quant à elle, est cohérente puisqu'en augmentant la largeur des ailettes, nous avons accru la quantité d'air pouvant être aspirée et par conséquent la quantité d'oxygène pouvant être consommée.

Concernant le brûleur 3, contrairement à ce qu'indique l'absence de changement de nombre de swirl entre ce swirler et celui d'origine, la flamme obtenue ici est beaucoup plus stable et centrée que celle du modèle de base. La différence est notamment frappante à la base de la flamme où l'on observe un tourbillon très important à la surface du combustible. Ceci n'est pas du tout le cas avec le modèle originel, dans lequel la combustion est plus saccadée et l'effet de swirl moins net. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'augmentation du nombre d'ailettes permet d'homogénéiser le flux d'air entrant en le forçant davantage à suivre l'inclinaison des ailettes.

Grâce à nos observations et à nos recherches bibliographiques, nous arrivons à la conclusion que le modèle possédant un nombre de swirl le plus élevé est le modèle 2. En effet, nous avons remarqué que c'était la flamme la plus stable, la plus petite et qui tournait la plus vite. Or, d'après Susset [8] :

"Plus le nombre de swirl est faible, plus les zones réactives sont larges, ce qui est attribué à l'augmentation de la fluctuation spatiale."

Par conséquent, nous pouvons faire l'hypothèse que le nombre de swirl est en réalité plus élevé que celui que nous avons calculé. Or, d'après notre calcul il est deux fois plus petit que le nombre de swirl calculé pour le modèle avec une augmentation de l'inclinaison des ailettes. Ce swirler étant visuellement moins stable, nous pouvons donc ici voir les limites de notre méthode de calcul, qui je le rappelle était destinée pour des angles inférieurs à 60°.

L'autre critique est le fait que d'après nos recherches bibliographiques, à partir de  $S=0,6$  est censé se former une zone de recirculation. Malheureusement nous n'avons pas pu en observer une. Nous pensons à deux raisons particulières. La première est le fait qu'en réalité ce critère dépend de la géométrie du brûleur et que dans notre cas, il faut peut-être atteindre un nombre de swirl bien plus grand que 0.6. La deuxième raison est que, du fait de la configuration de nos swirlers, le débit d'air entrant est trop faible. C'est très plausible étant donné que c'est grâce au modèle 2 que nous avons obtenu la flamme avec un nombre de swirl le plus élevé. De plus, Susset l'a confirmé dans sa thèse en expliquant que :

"Pour un faible débit d'air (faible nombre de Reynolds), il faut accroître l'intensité de rotation minimale capable de générer une zone de recirculation et donc une flamme stable." [8]

## 3. CHAPITRE 3 - CHIMIE

### 3.1. Étude de la combustion

#### 3.1.1. *Couleur d'une flamme*

Lors d'une combustion, une grande quantité de chaleur est produite car la réaction provoquée est très exothermique.[15] La flamme qui est dégagée possède une couleur qui diffère selon la température et les composés qui sont mis en jeu.

Naturellement, la couleur des flammes donne une information sur la température. En effet, plus la couleur est froide, plus la température est élevée. De même, plus la couleur est chaude, moins la température est élevée. Les teintes d'une flamme vont du bleu jusqu'au rouge en passant par le blanc et le jaune-orangé. La flamme la plus froide est rouge alors que la flamme la plus chaude est bleue. La base de la flamme étant la partie la plus chaude, elle est souvent bleue (cf Annexe 3).[16]

On peut obtenir d'autres couleurs de flammes en faisant brûler différents composants. Le chlorure de strontium produit une flamme rouge, le chlorure de cuivre produit une flamme bleue, le chlorure de lithium brûle en rose, le borax teinte la flamme en vert et le potassium en violet.[14] De plus, l'état des particules brûlées influe sur la couleur. Si les substances sont riches en particules carbonées, elles auront une flamme jaune et brillante à l'image de celle d'une bougie alors que les substances pauvres en particules solides posséderont une flamme quasi incolore.[16]

La couleur de la flamme peut être observée grâce à des particules de suie. Ce sont les particules de carbone noircis émises dans l'air lors d'une combustion. Ces particules sont excitées par une augmentation de la température lors de la réaction chimique et émettent de la lumière.[15]

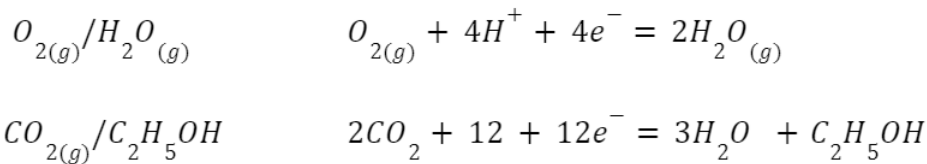
Dans le cas de notre étude, lorsque l'on fait brûler de l'éthanol, les particules de suie de la flamme émettent une couleur jaune orangé. Ce sont des particules et non des molécules car la réaction de combustion est incomplète dans cette zone. La couleur vient du rayonnement émis par les particules de suie à une longueur d'onde qui est proportionnelle à la température. Une flamme émettant dans le rouge est proche des 1000°C alors qu'une flamme blanche atteint les 1200°C. Au niveau de la base de la flamme, la zone de température maximale, on peut retrouver des teintes bleutées. On retrouve ce coloris grâce au rayonnement des électrons des atomes. C'est une partie de combustion complète dans laquelle on ne retrouve pas de suie.[17]

### 3.1.2. Expérience

Lors de ce projet nous avons décidé de réaliser une expérience en brûlant une certaine masse de bioéthanol, ce qui nous permet de voir l'évolution de la masse en fonction du temps, puis nous avons pu déterminer une puissance en fonction du débit massique et du pouvoir calorifique.

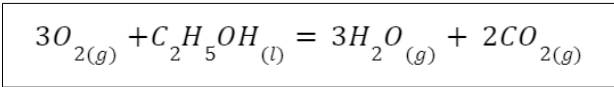
Rappelons ce qu'est une combustion :

Une combustion est une réaction d'oxydoréduction entre un combustible et un comburant. Le combustible, le réducteur, va se faire oxyder par le comburant et perdre des électrons, le comburant lui est l'oxydant, il va se faire réduire et gagner en électron. Dans le cas de la combustion du bioéthanol, nous avons 2 couples redox et 2 demi équations redox :



Ce qui donne comme équation redox :

eq 3.



Pour cela nous avons mesuré une masse de 86,6g de bioéthanol que nous avons placé dans le brûleur. Nous avons décidé de relever la masse toutes les 2 minutes. Malheureusement la balance que nous avons utilisé s'éteignait toutes les 4min30 environ. Nous avons dû faire des conversions en relevant le poids lorsque la balance s'éteignait, pour ensuite pouvoir convertir. Nous avons fait brûler 30 minutes avant que la combustion ne s'arrête. Nous avons donc effectué une régression linéaire :

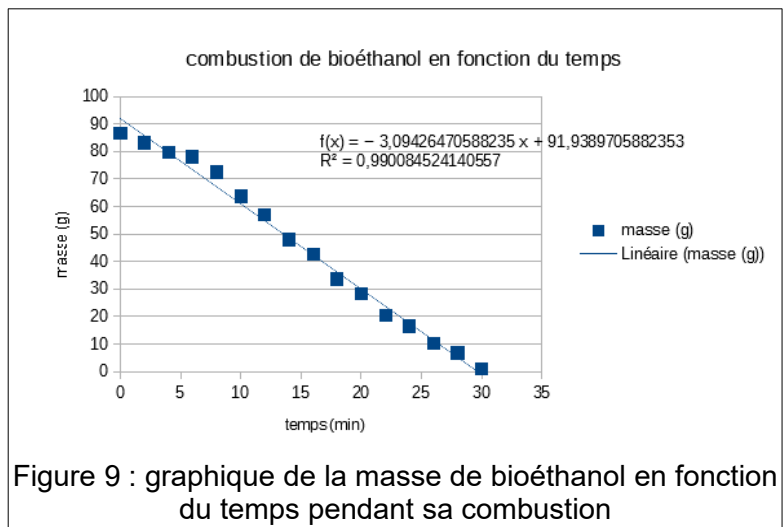


Figure 9 : graphique de la masse de bioéthanol en fonction du temps pendant sa combustion

Nous pouvons voir que nous obtenons quelque chose de linéaire puisque  $R^2=0.99$ .

Nous pouvons également calculer une puissance à partir du pouvoir calorifique PC de l'éthanol et du débit massique.

eq 4.            Ainsi  $P = \frac{m \cdot PC}{\Delta t} = 1.4 W$  pour cette expérience.

## 3.2. Les biocarburants

### 3.2.1. Les différentes générations de biocarburants

Un biocarburant est un carburant provenant de la biomasse.[18] Il provient du grec "bios" qui signifie vie et du latin "carbo" : carbone.[22] Le carburant est obtenu à partir de matière première animale, végétale ou de déchets.[23] Ces matières sont: la betterave, le blé, le maïs, le colza, la pomme de terre, le soja, la palme ou encore les micro-algues.[24] Ce système est développé pour remplacer à long terme les ressources fossiles comme le pétrole. Il permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre et d'améliorer la qualité de l'air.[20] Il est considéré comme une source d'énergie renouvelable. La combustion ne produit que du  $CO_2$  et de la vapeur d'eau.[21] On trouve cette source d'énergie sous différents états : liquides, solides et même gazeux. [22]

Il existe trois générations de biocarburants. Elles se distinguent de par les procédés de transformations utilisés et par la biomasse mise en jeu.[19]

#### 1 Les biocarburants de première génération

On retrouve le bioéthanol et le biodiesel issus principalement de céréales, de cannes à sucre et de betteraves pour le premier et d'acides gras comme l'huile de palme, de colza et de soja pour le second. Ils sont principalement utilisés dans les moteurs à essence et diesel. C'est la seule génération de biocarburants produite à l'échelle industrielle.

Pour produire du bioéthanol, il suffit de transformer le sucre produit par la matière végétale en alcool avec une fermentation. On peut ensuite le mélanger à de l'essence.

Pour la production du biodiesel, on réalise une transestérification lors de laquelle les huiles sont mélangées à de l'alcool et à un catalyseur. Il est ensuite mélangé au gazole (cf Annexe 4). [21]

La Commission Européenne a décidé d'arrêter progressivement les biocarburants de première génération car ils concurrencent la production alimentaire et usent les sols. La place est laissée aux biocarburants de seconde et troisième génération[24] qui possèdent des bilans énergétiques plus favorables.[23]

## **2 Les biocarburants de deuxième génération**

Ce sont des biocarburants issus de matières cellulosiques comme le bois, les feuilles, les tiges des plantes ou même des déchets. L'avantage principal de cette génération de biocarburant est qu'elle ne rentre pas en concurrence avec la chaîne alimentaire puisque sa production repose sur des composants très peu utilisés dans le domaine alimentaire. Ces matières permettent de produire du bioéthanol, du biodiesel, du biohydrogène ou du biogaz qui sont dit de deuxième génération. On ne retrouve pas encore ces produits au stade industriel mais leur production à grande échelle est prévue avant 2030.[21]

Il existe deux méthodes principales pour produire les biocarburants de seconde génération :

- La voie biochimique : la biomasse est transformée en sucre par des enzymes et se transforme en éthanol après fermentation.
- La gazéification ou voie thermochimique : la biomasse est gazeuse puis transformée par le procédé de Fischer-Tropsch (cf Annexe 5).[21]

## **3 Les biocarburants de troisième génération**

Ce sont des procédés encore à l'étude qui cherchent à utiliser des micro-organismes tels que les micro-algues. Le but est de produire du biodiesel, du bioéthanol, du biogaz et du biohydrogène. Pour cela, ils utilisent les acides gras, les sucres et le méthane pour produire les différentes énergies (cf Annexe 6). [21]

### **3.2.2. Le bioéthanol**

Le bioéthanol est un carburant produit à partir de matière végétale, appelée biomasse. Sa production est réalisée à partir de betteraves sucrières et de céréales comme le maïs et le blé. C'est le biocarburant le plus utilisé au monde. Ce carburant est plus écologique que les autres car lors de la croissance des betteraves et des céréales, du CO<sub>2</sub> est absorbé. Après leur transformation en bioéthanol, le CO<sub>2</sub> relâché dans l'atmosphère correspond au CO<sub>2</sub> absorbé lors de la pousse de la biomasse (cf Annexe 7).[25]

On retrouve le bioéthanol de première génération dans les stations essence. On les repère avec la lettre E suivie d'un chiffre correspondant au pourcentage de bioéthanol introduit dans l'essence.[27] Il y a trois carburants : E10 qui contient 10% de bioéthanol. E5 qui contient jusqu'à 5% de bioéthanol. E85 ou super éthanol E85 avec 85% de bioéthanol. [24]



Il existe deux formes de bioéthanol : liquide ou en gel.

Le bioéthanol en gel a une consistance sirupeuse et possède une durée de combustion plus importante que sous forme liquide. La couleur de la flamme est orangée et laisse des résidus après la combustion. Il possède aussi une plus grande teneur en eau.[26]

Le bioéthanol liquide peut être à 96.6 % ou 100% de teneur en éthanol. Les deux types de bioéthanol ne laissent aucun résidu après combustion. Le bioéthanol à 100% possède une teneur en eau plus importante que celui à 96.6%. La couleur de la flamme à 100% sera blanche ou bleu alors que dans l'autre cas elle sera jaune orangé.[26]

### 3.3. La chimie verte

L'industrie de la chimie s'est beaucoup développée au XXe siècle, notamment après la Seconde Guerre mondiale. En 1991, l'agence américaine pour la protection de l'environnement lance la première initiative de recherche en chimie verte en proposant la définition suivante :

La chimie verte a pour but de concevoir et de développer des produits et des procédés chimiques permettant de réduire ou d'éliminer l'utilisation et la synthèse de substances dangereuses.

Produire plus et mieux tout en consommant et en rejetant moins, tel est l'enjeu de l'industrie aujourd'hui. Il s'agit de faire face au développement de l'humanité qui pourrait compter près de 9 milliards d'individus à l'horizon 2030-2050, et consommer moins pour préserver la planète (en prélevant moins de matière première, en rejetant moins de déchets et en consommant moins d'énergie). Ainsi, à l'aube du XXIème siècle, la chimie est révolutionnée par l'émergence du concept de chimie verte dans le but de relever cinq grands défis :

- produire de la nourriture (agriculture, élevage)
- produire des médicaments
- produire de l'énergie
- produire de l'eau potable
- protéger l'environnement

Suite à cela, de nos jours, nous pouvons retrouver 12 principes de la chimie verte qui comprennent prévention des déchets, économie d'atomes, conception de méthodes de synthèse moins dangereuses, conception de produits chimiques plus sûrs, solvants et auxiliaires moins polluants, recherche du rendement énergétique, utilisation de ressources renouvelables, réduction du nombre de dérivés, catalyse, conception de produits en vue de leur dégradation, observation en temps réel en vue de prévenir la pollution et une chimie fondamentalement plus fiable.

Dans notre projet nous utilisons donc un biocarburant, le bioéthanol, qui rentre dans ces critères. En effet, pour créer ce biocarburant on utilise des plantes sucrières, des céréales... Ces plantes sont des sources renouvelables et naturelles, de plus leur production n'est pas polluante, et elles sont biodégradables. Les processus de fabrication permettent aussi de dégager des aliments pour animaux ou des compléments alimentaires riches en protéines pour l'homme.



## CONCLUSIONS & PERSPECTIVES

Ce projet à travers son côté à la fois expérimental et bibliographique, a été très enrichissant pour nous tous. En effet, ce projet pluridisciplinaire nous a apporté des connaissances en mécanique des fluides, en chimie, en CAO et en fabrication additive. Il nous a permis de découvrir une technologie que l'on ne connaissait pas et qui est présente dans de nombreux domaines.

La principale difficulté à laquelle nous avons dû faire face est le manque de renseignements à propos de ce sujet. Nous avons dû lire principalement des thèses et qui bien souvent ne sont pas en français.

Bien que nous n'ayons pas observé de zone de recirculation, nous sommes tout de même ravis d'avoir pu observer des changements de flamme ce qui a été une réelle source de motivation pour essayer de mieux comprendre les phénomènes liés à l'effet de swirl. En effet, nous avons eu la chance de mettre en pratique l'effet de swirl initialement grâce à un brûleur fourni par l'INSA puis par trois autres modèles que nous avons fabriqués.

En termes de perspectives, nous aurions aimé poursuivre ce projet en travaillant sur des brûleurs à swirl plus puissants pour pouvoir observer une zone de recirculation ainsi que des phénomènes instationnaires tels que le PVC ou la respiration de la zone de recirculation. Cela aurait été l'occasion de pouvoir manipuler des swirlers à injection radiale fonctionnant avec une combustion prémélangée.

Nous aurions également aimé nous pencher un peu plus sur l'impact des émissions de polluants générés par un swirler en comparaison avec un brûleur classique.

Enfin, nous aurions souhaité pouvoir calculer le nombre de swirl sans faire d'approximations en mesurant les différentes vitesses de l'écoulement avec du matériel adapté.

Pour conclure ce rapport, nous souhaitons remercier M.HONORE de nous avoir aidé tout au long du projet à mener nos expériences, à répondre à nos interrogations et à nous orienter sur des pistes de recherche. Nous tenons également à remercier M.BRETEAU de nous avoir conseillé et aidé à concevoir et fabriquer les trois brûleurs modèles.

## BIBLIOGRAPHIE

### Chapitre 1 : Les swirlers

- [1] G. Monnot, A. Feugier, F. Le Bouc, F. Mauss, C. Meyer, "La combustion dans les fours et les chaudières", Technip, 2000
- [2] Mémoire de Cherifi Mouna, "Simulation Et Caractérisation De L'effet D'un Brûleur A Swirl Sur La Production Des Émissions", 2019-2020
- [3] Iyogun CO, Birouk M, Kozinski JA, "Experimental investigation of the effect of fuel nozzle geometry on the stability of a swirling non-premixed methane flame", 2011
- [4] Nazim Merlo, "Caractérisation expérimentale d'une flamme turbulente non prémélangée swirlée: effet de l'enrichissement en oxygène", 2015
- [5] Paul Palies, "Dynamique et instabilités de combustion des flammes swirlées", 2010
- [6] Toufik Boushaki, "Introductory Chapter: Swirling Flows and Flames", 2019

### Chapitre 2- Nombre de Swirl & caractéristiques de la flamme

- [1] G. Monnot, A. Feugier, F. Le Bouc, F. Mauss, C. Meyer, "La combustion dans les fours et les chaudières", Technip, 2000
- [7] Feikema, Chen, Driscoll, « Enhancement of flame blowout limits by the use of swirl » - Comb. and Flame, 1990
- [8] Susset, « DÉVELOPPEMENT DE TRAITEMENTS D'IMAGES POUR L'ÉTUDE DE LA STABILISATION DE FLAMMES TURBULENTES NON-PRÉMÉLANGÉES GÉNÉRÉES PAR DES BRÛLEURS INDUSTRIELS MODÈLES », 2002
- [9] Vauchelles, « Etude de la stabilité et des émissions polluantes des flammes turbulentes de prémélange pauvre à haute pression appliquées aux turbines à gaz », INSA de Rouen, 2004
- [10] Rawe et Kremer, « Stability limits of natural gas diffusion flames with swirl », 1981
- [11] Beér et Chigier, « Combustion Aerodynamics », Elsevier Science Ltd, 1972
- [12] Tangirala, Chen and Driscoll, « Effect of heat release and swirl on the recirculation within swirl stabilized flames » - Combust. Sci. and Tech, 1987.
- [13] Syred, Beér, « Effect of combustion upon precessing vortex cores generated by swirl combustion », 14th Symp. Int. on Comb, 1973.

### Chapitre 3: Chimie

#### couleur de flamme :

- [14] Plast magazine, "quelles sont les différentes couleurs du feu ?", 12 juillet 2021  
lien internet (valable à la date du 04/06/2022) : <https://www.plastgrandouest.net/quelles-sont-les-differentes-couleurs-de-feu/>

[15] lien internet (valide à la date du 04/06/2022) : <https://couleur-science.eu/?d=063d63--cest-quoi-une-flamme>

[16] Ça m'intéresse, "Pourquoi les flammes ont différentes couleurs ?", par Aude Claire de Parcevaux, le 24 avril 2018

lien internet (valide à la date du 04/06/2022) : <https://www.caminteresse.fr/societe/pourquoi-les-flammes-ont-elles-differentes-couleurs-1163741/>

[17] Le Hollandais volant, "D'où vient la couleur d'une flamme ?", Timo Van Neerden, mercredi 5 septembre 2012

lien internet (valide à la date du 04/06/2022) : <https://lehollandaisvolant.net/?d=2012/09/05/19/59/19-dou-vient-la-couleur-dune-flamme>

### **biocarburant :**

[18] lien internet (valide à la date du 04/06/2022) : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Biocarburant>

[19] Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, Ministère de la Transition énergétique, "Biocarburants", 14 avril 2022

lien internet (valide à la date du 04/06/2022) : <https://www.ecologie.gouv.fr/biocarburants>

[20] Ministère de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire, "Qu'est-ce que les biocarburants ?", 12 octobre 2018

lien internet (valide à la date du 04/06/2022) : <https://agriculture.gouv.fr/quest-ce-que-les-biocarburants>

[21] lien internet (valide à la date du 04/06/2022) : <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/biocarburant>

[22] Geo, "Le biocarburant : qu'est ce que c'est ?", Guillaume Dumazet, 4 juin 2012

lien internet (valide à la date du 04/06/2022) : <https://www.geo.fr/environnement/biocarburant-agrocarburant-microalgues-40233>

[23] lien internet (valide à la date du 04/06/2022) : <http://www.biocarburant.com/>

[11] Fred Auto Sport, "Quels sont les différents carburants disponibles en France ?", 15 mars 2022

lien internet (valide à la date du 04/06/2022) : <https://www.fred-auto-sport.fr/quels-sont-les-differents-carburants-disponibles-en-france>

### **bioethanol:**

[24] Fred Auto Sport, "Quels sont les différents carburants disponibles en France ?", 15 mars 2022

lien internet (valide à la date du 04/06/2022) : <https://www.fred-auto-sport.fr/quels-sont-les-differents-carburants-disponibles-en-france>

[25] Bioéthanol-carburant, "Tout sur le bioéthanol", 2020

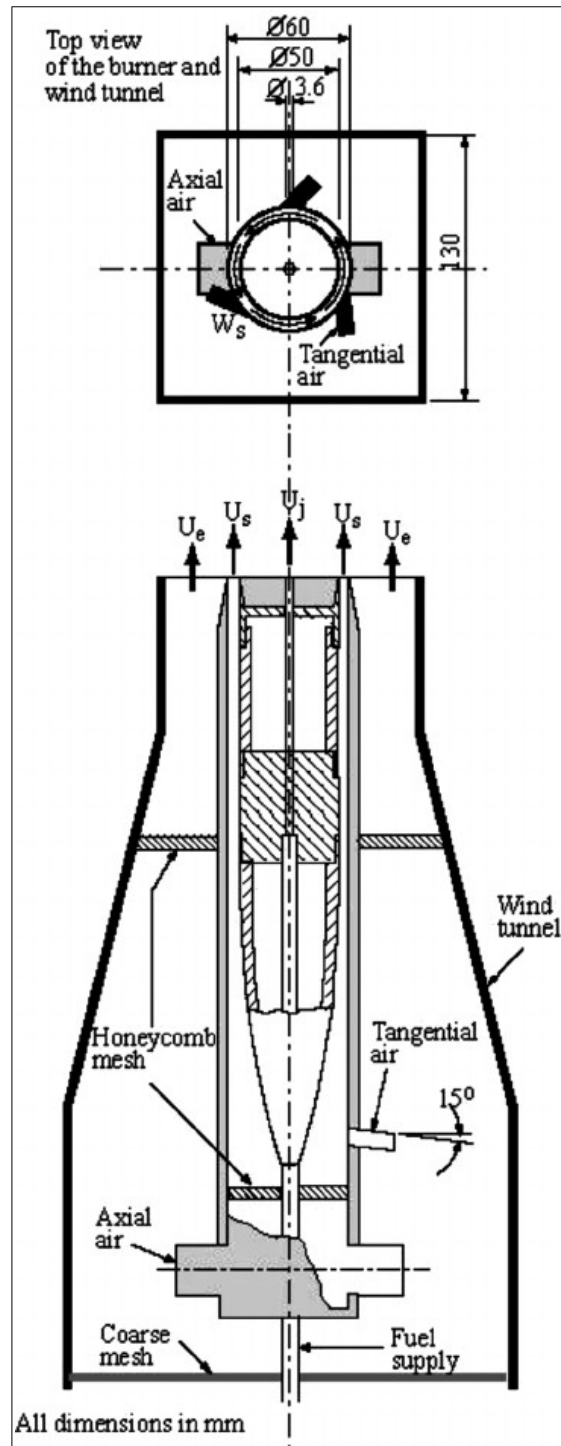
lien internet (valide à la date du 04/06/2022) : <https://www.bioethanolcarburant.com/tout-sur-le-bioethanol/>

[26] lien internet (valide à la date du 04/06/2022) : <https://cheminee-au-bioethanol.fr/bioethanol-gel-liquide-lequel-utiliser/>

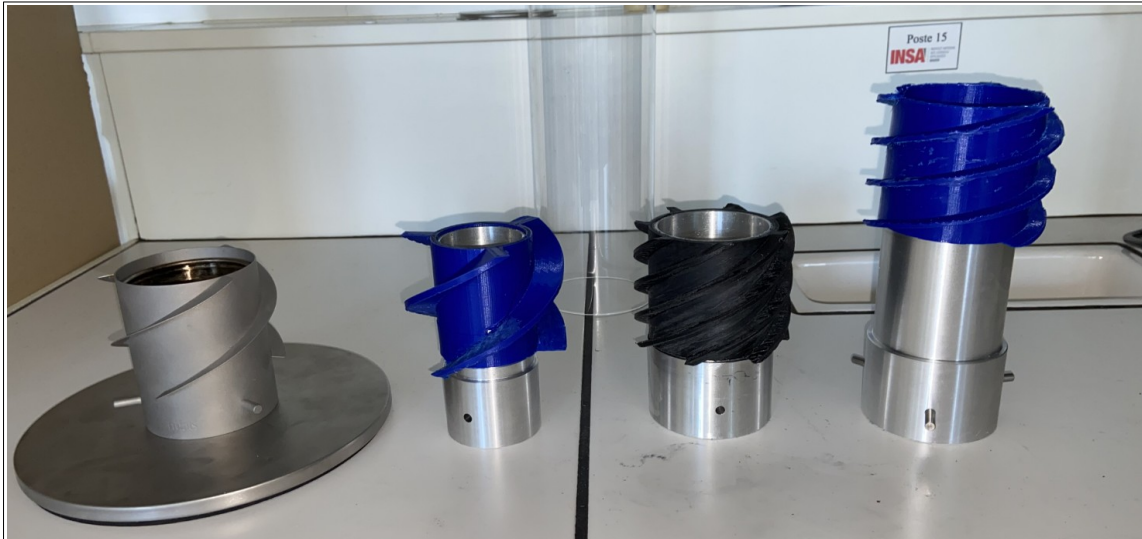
[27] lien internet (valide à la date du 04/06/2022) : <https://www.autobutler.fr/blog/types-carburants>

## ANNEXES

### Annexe 1: Schéma du Swirler Sydney fonctionnant avec des injecteurs tangentiels et des injecteurs le long de l'axe

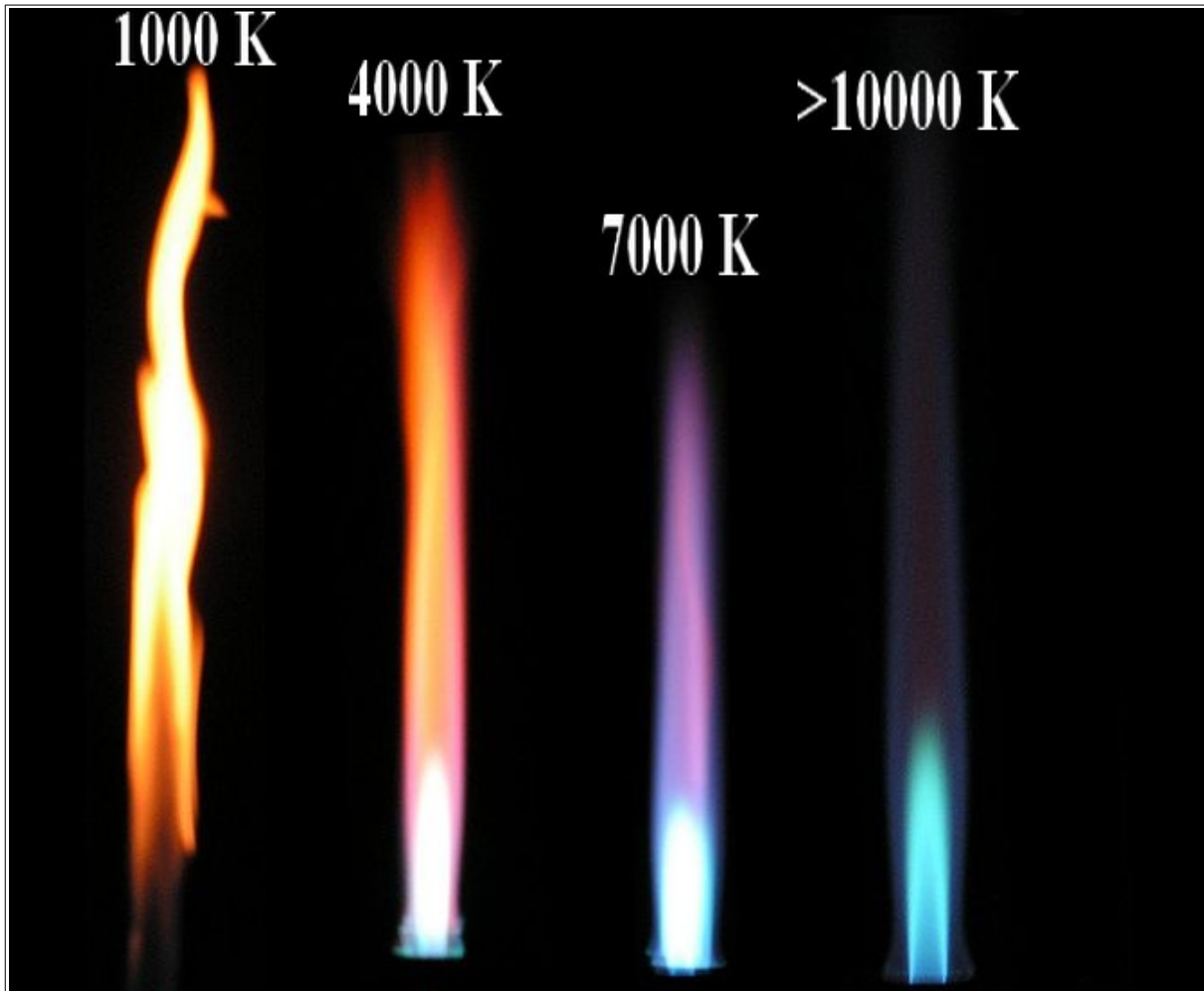


## Annexe 2: Photo des brûleurs à swirl utilisés durant notre projet

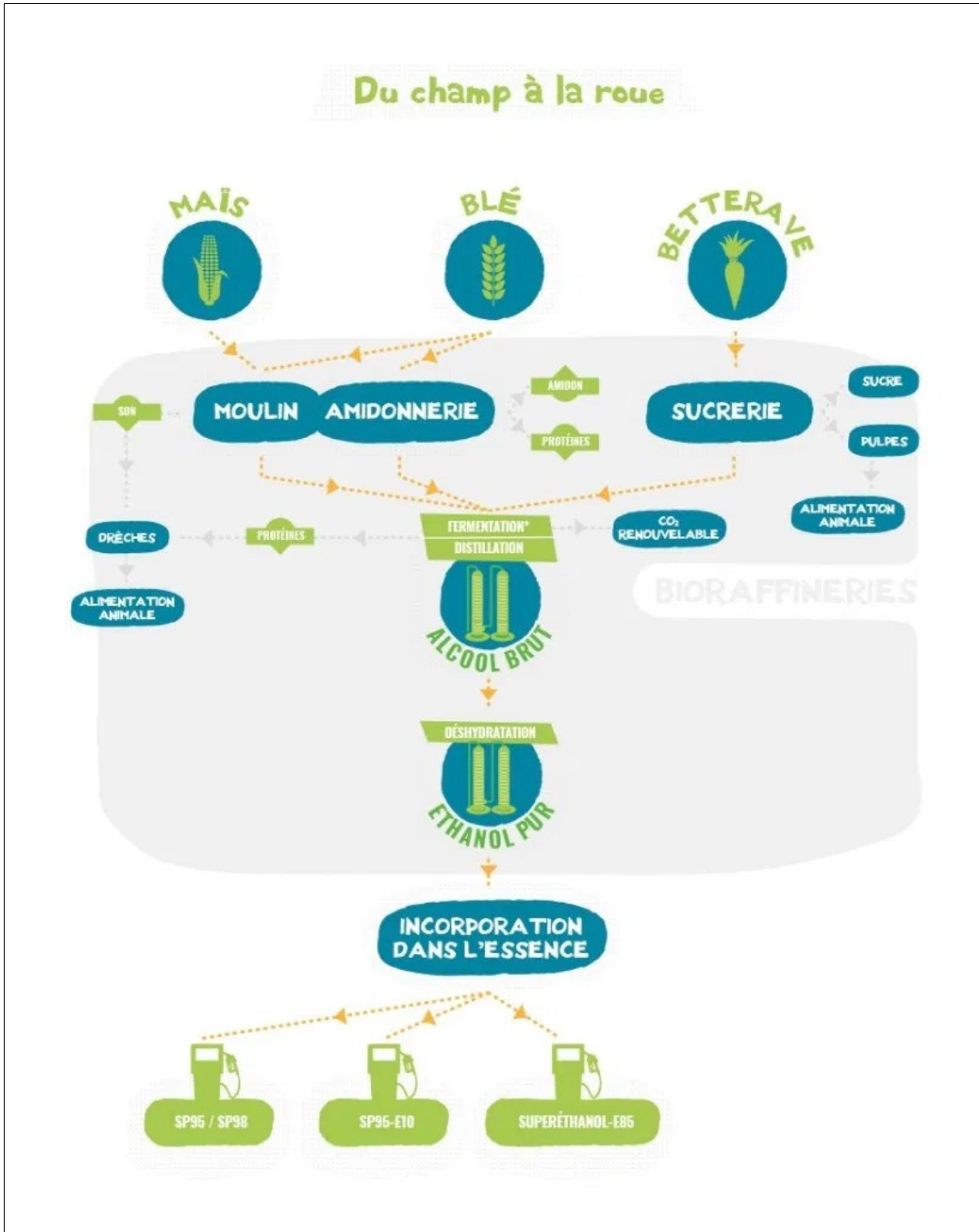


A gauche, on retrouve le brûleur initial fourni par l'INSA. A sa droite celui à qui on a modifié la largeur des ailettes, puis à côté on retrouve celui avec le nombre d'ailettes qui a changé. A droite est placé le swirler dont l'angle des ailettes a été modifié. Ces trois brûleurs imprimés en 3D sont posés sur leur base en aluminium qui ont été usinées.

### Annexe 3: Photo de flammes à différentes températures

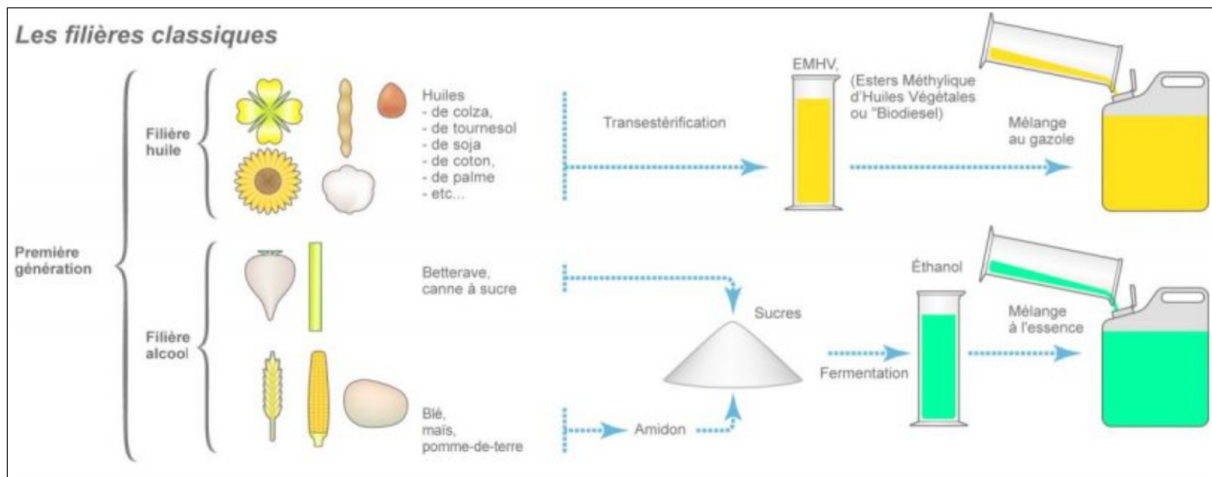


## Annexe 4: Schéma de production des biocarburants de première génération



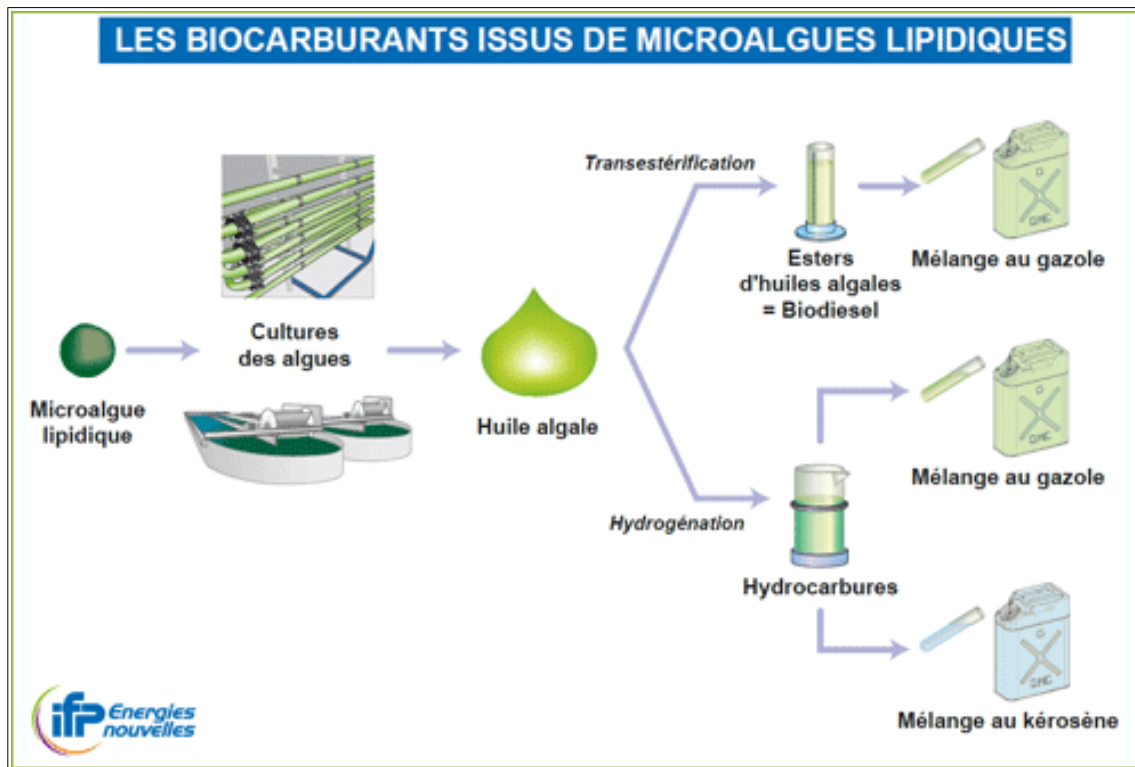


## Annexe 5: Schéma de production des biocarburants de seconde génération





## Annexe 6: Schéma de production des biocarburants de troisième génération



## Annexe 7: Schéma d'émission du CO<sub>2</sub> dans l'air avec la production de bioéthanol

