

# Filière Systèmes industriels

Orientation Design and Materials

## Diplôme 2008

*Ludovic Bürgler*

*Bioréacteur pour  
la fermentation de  
substrats solides*

Professeur

Jean-Claude Héritier

Expert

Marc McCormick

**HES-SO Valais**

**Données du travail de diplôme  
 Daten der Diplomarbeit**

FO 1.2.02.07.DB  
 mam/30/06/2008

SI	TV	EE	IG	EST
X	X			

Confidentiel / Vertraulich

oui / ja  non / nein

<input checked="" type="checkbox"/> FSI <input type="checkbox"/> FTV	Année académique / Studienjahr <b>2007/2008</b>	No PS / Nr. PS <b>dm/2008/4</b>
Mandant / Auftraggeber <input checked="" type="checkbox"/> HES—SO Valais <input type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Ecole hôte	Etudiant / Student <b>Ludovic Bürgler</b>	Lieu d'exécution / Ausführungsort <input checked="" type="checkbox"/> HES—SO Valais <input type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Ecole hôte
Professeur / Dozent <b>Jean-Claude Héritier</b>	Expert / Experte (données complètes)	

Titre / Titel <p style="text-align: center;"><b>Bioréacteur pour la fermentation de substrats solides</b></p>
Description et Objectifs / Beschreibung und Ziele <p>Etude, développement et réalisation d'un bioréacteur permettant la fermentation de substrats solides. Les caractéristiques principales sont les suivantes</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— Chambre en acier inox fermée de 5 litres, dans laquelle la température, l'humidité et l'aération (apport constant d'air pré-humidifié) sont contrôlés</li> <li>— Actuateur permettant d'agiter la masse qu'il contient, typiquement du son de blé ou de la sciure de bois sur laquelle vont se développer les microorganismes (champignons filamenteux). Ces réacteurs sont très utilisés pour la production de diverses enzymes, que l'on peut ensuite mettre en œuvre pour la production de bioéthanol ou autres biotransformations industrielles.</li> </ul> <p>Les points suivants seront particulièrement étudiés:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— Définition du cahier des charges</li> <li>— Conception du bioréacteur et de son châssis</li> <li>— Dossier de fabrication</li> <li>— Calculs, modélisations statique et dynamique du nouveau système</li> <li>— Définition des matériaux et des procédés de fabrication</li> <li>— Régulation complète.</li> </ul> <p>Ce projet débouchera sur un dossier d'exécution complet, y.c. les calculs et les plans de fabrication, permettant la réalisation d'un bioréacteur.</p>

Signature ou visa / Unterschrift oder Visum Resp. de la filière Leiter des Studieng.: .....  Etudiant/Student: ..... 	Délais / Termine Attribution du thème / Ausgabe des Auftrags: 01.09.2008 Remise du rapport / Abgabe des Schlussberichts: 21.11.2008, 12:00 Exposition publique / Ausstellung Diplomarbeiten: 28.11.2008 Défense orale / Mündliche Verfechtung: semaine/Woche 49
--	---

## Bioréacteur pour la fermentation de substrats solides

### **Objectif**

Etude, développement et dossier d'exécution d'un bioréacteur de laboratoire destiné à la production d'enzymes par fermentation sur divers substrats solides.

### **Résultats**

Une solution répondant en tout point au cahier des charges.

Un dossier technique complet, permettant la réalisation de l'appareil, qui comprend : une liste de pièces et de fournisseurs, les plans d'usinage et de montage, le câblage, la programmation de l'automate et l'interface utilisateur.

### **Mots-clés**

Biotechnologie  
Bioréacteur  
Substrat solide  
Fermentation

## Bioreaktor für die feste Substratgärung

### **Ziel**

Studie, Entwicklung und Verwirklichung von einem Laborbioreaktor, der für die Enzymproduktion von verschiedenen festen Substratgärungen bestimmt ist.

### **Resultate**

Eine Lösung, die dem Pflichtenheft in allen Punkten entspricht.

Eine vollständige technische Akte, die die Verwirklichung des Geräts erlaubt bestehend aus: einer Stückliste und Lieferantenangaben, die Werkstatt und Montage pläne, die Kabelverbindungen, die Programmierung des Automat und die Benutzerschnittstelle.

### **Schlüsselwörter**

Biotechnologie  
Bioreaktor  
Feste Substrat  
Gärung

## TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION .....	5
2	OBJECTIFS .....	6
3	GENERALITE .....	6
3.1	Qu'est ce qu'une SFF .....	6
3.2	Les applications de la SFF .....	8
3.3	Description d'un processus classique d'une SSF .....	8
4	Etat de l'art .....	10
4.1	Type de bioréacteur pour la SSF .....	10
4.1.1	Groupe I : Bioréacteur sans aération ni agitation .....	10
4.1.2	Groupe II : Bioréacteur avec aération forcée sans agitation .....	11
4.1.3	Groupe III : Bioréacteur à tambour rotatif ou remué .....	13
4.1.4	Groupe IV: Bioréacteur avec aération forcée et agitation continue .....	14
4.2	Produits existants .....	15
5	CAHIER DES CHARGES .....	18
5.1	Général .....	18
5.2	Paramètres de service .....	18
5.3	Le réacteur .....	18
5.4	Sécurité .....	19
5.5	Energies à dispositions .....	20
6	THERMIQUES .....	20
6.1	Bilan énergétique .....	21
6.1.1	Energie d'évaporation .....	22
6.1.2	Pertes dans les conduites .....	22
6.1.3	Energie à évacuer .....	23
6.2	Chauffage/refroidissement de la masse microbienne .....	23
6.3	Echangeur thermique .....	25
7	MECANIQUE .....	26
7.1	Générale .....	26
7.2	Réacteur .....	29
7.2.1	Brasseur .....	32
7.2.2	Actuateur et transmission du couple .....	33
7.2.3	Presse étoupe .....	38

7.2.4	Prise d'échantillon .....	39
7.3	Bulleur .....	41
7.4	Châssis .....	42
7.5	Pertes de charge .....	45
8	AUTOMATION.....	46
8.1	Composition de l'automate .....	46
8.2	Schéma de raccordement.....	46
8.3	Régulation.....	50
8.3.1	Remplissage du bulleur .....	50
8.3.2	Humidification de la masse microbienne .....	50
8.3.3	Température dans le réacteur.....	51
8.4	Dimensionnement des corps de vannes .....	53
8.5	Interface .....	54
8.5.1	Interface de contrôle .....	54
8.5.2	Real Time Trend.....	56
8.5.3	Historical Trend .....	57
9	COMPOSANTS ET FOURNISSEURS .....	58
10	PRIX.....	61
11	CONCLUSIONS .....	62
12	TABLES DES ANNEXES.....	62
13	TABLES DES ILLUSTRATIONS.....	62
14	REFERENCES.....	64
15	REMERCIEMENTS.....	64

# 1 INTRODUCTION

La filière biotechnologie du département technologie du vivant de la HES SO de Sion souhaite se munir d'un nouveau bioréacteur de laboratoire. Il sera utilisé dans le cadre de fermentation sur substrat solide afin de cultiver des micro-organismes produisant divers enzymes. Enzymes pouvant être ensuite mis en œuvre dans divers procédés industriels, dont la production de bioéthanol. Les substrats peuvent être de nature différente suivant la fermentation désirée. Il peut s'agir de sciure de bois, de paille broyée ou de son de diverses céréales. Quant aux micro-organismes, se sont pour la plus part des *Aspergillus*, champignons filamenteux de type moisissures. Ce procédé de fermentation est notamment utilisé en agroalimentaire, comme par exemple pour la production de la sauce soja. En effet, dans le cadre de la fabrication de cette sauce, c'est l'*Aspergillus sojae* (Figure 1.1) qui, inoculé sur un substrat composé de graines de soja et de farine de froment produit après une longue fermentation, un cocktail d'enzymes appelé Koji. Puis le Koji est à son tour fermenté avec divers adjuvants afin de produire la sauce soja. Cependant, comme cité plus haut, le but de ce bioréacteur, dont l'étude et la conception sont décrites dans ce document, n'est pas agroalimentaire, mais écologique. Le bioéthanol ainsi produit est destiné à remplacer les combustibles dérivés du pétrole qui sont beaucoup plus polluant et dont le prix ne cesse d'augmenter. De plus cette méthode de production par décomposition enzymatique mais fin à toute la polémique créée autour des méthodes de production classique de bioéthanol qui contribue à diminuer un peu plus les réserves alimentaires mondial. On mesure donc toute l'importance de développer ce type de technologie.

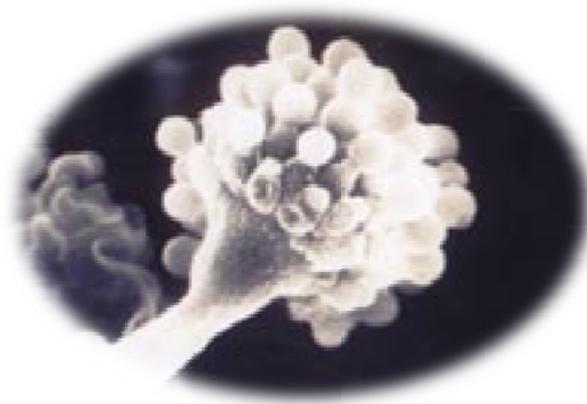


Figure 1.1: *Aspergillus sojae* servant à la préparation du Koji mis en œuvre dans l'élaboration de la sauce soja.

## 2 OBJECTIFS

Concevoir un bioréacteur se composant d'une chambre fermée en acier inox d'une contenance de 5 litres, dans laquelle la température, l'humidité et l'aération sont contrôlées et d'un actuateur permettant d'agiter la masse qu'elle contient.

Les objectifs à atteindre pour le projet de diplôme sont les suivants :

- Etude des systèmes existants
- Définition du cahier des charges
- Conception d'un nouveau bioréacteur, de ces équipements et de son châssis
- Etablissement d'un dossier de fabrication (dossier technique)
- Calculs, modélisation statique et dynamique du nouveau système
- Définition des matériaux et des procédés de fabrication
- Automation

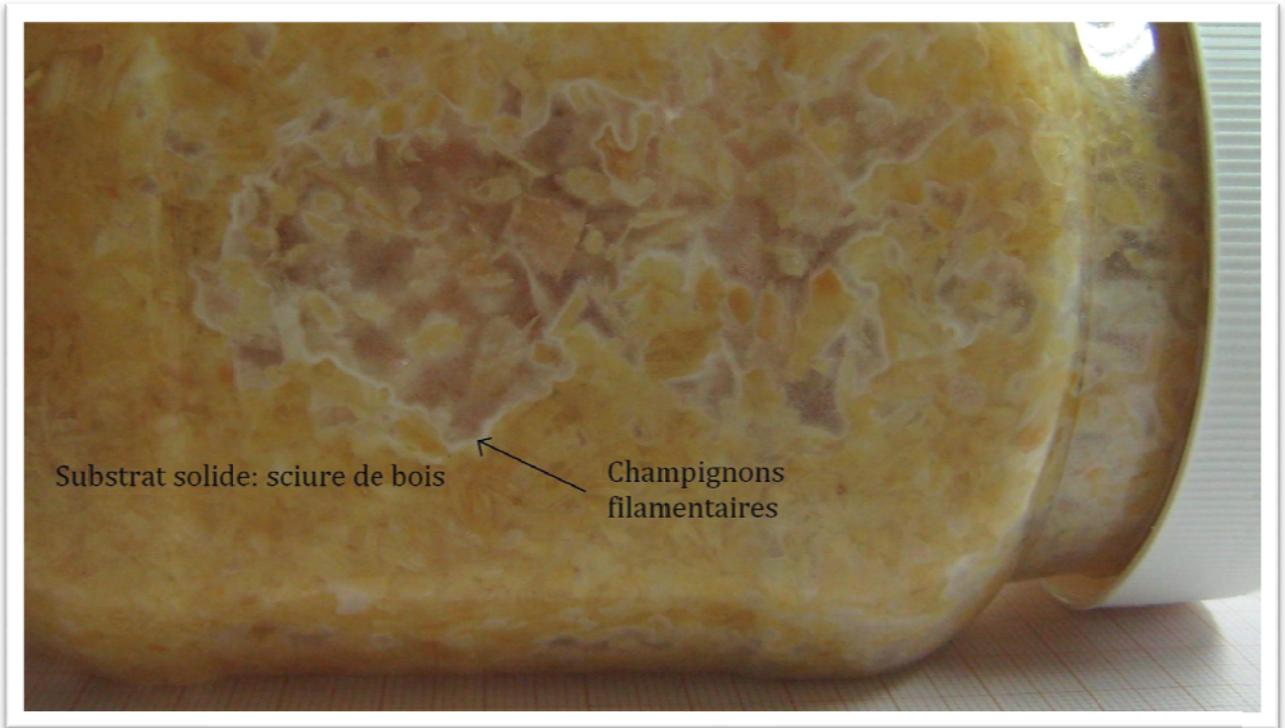
Le contenu de ce document reprend et se base sur les résultats obtenus lors du travail de semestre.

La construction du bioréacteur ne se fait pas durant le travail de diplôme faute de moyen financier et de disponibilité de l'atelier mécanique de la HES SO valais, mais aura lieu dans le courant de l'année 2009. Le dossier technique doit permettre la construction de l'installation dans les meilleures conditions.

## 3 GENERALITE

### 3.1 QU'EST CE QU'UNE SFF

La fermentation sur substrat solide (SFF) consiste à cultiver des micro-organismes sur un lit de matière solide appelé substrat. C'est un processus qui se déroule naturellement dans notre environnement. La décomposition naturelle des déchets organiques tels que les feuilles tombées des arbres et les animaux morts se fait de cette manière. Des champignons minuscules se développent sur la matière solide dont ils se nourrissent, la décomposant et la transformant sous d'autres formes. L'enjeu dans le domaine industriel est de contrôler ces cultures en choisissant les micro-organismes et les substrats adéquats afin de produire les substances voulues. On cherchera à obtenir les meilleurs rendements possibles en contrôlant l'environnement du micro-organisme (hygrométrie, température, ajouts de nutriments). Pour ce faire, les fermentations ont lieu dans des bioréacteurs. La *figure 3.1* est une photo d'un essai de culture d'un champignon filamentaire sur de la sciure de bois humide dans un bocal fermé et la *figure 3.2* est un schéma montrant les liaisons entre les champignons et le substrat.



Substrat solide: sciure de bois

Champignons filamenteux

Figure 3.1: Culture de champignons filamenteux sur de la sciure de bois dans un bocal.

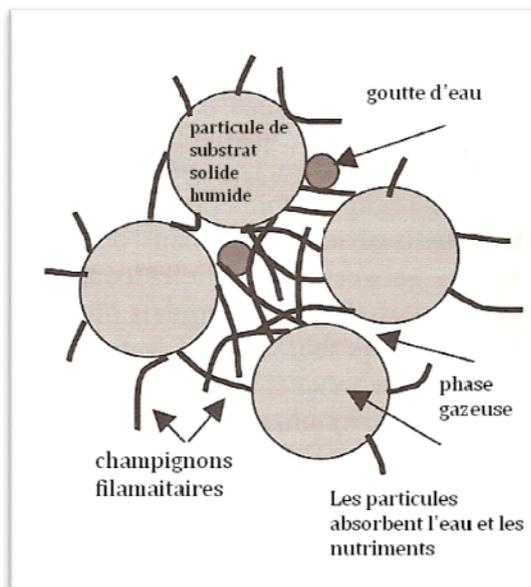


Figure 3.2 : Liaisons entre les champignons et le substrat

### 3.2 LES APPLICATIONS DE LA SSF

Les applications de la SSF sont variées et nombreuses. La technologie liée à ces procédés ne cessent d'évoluer depuis leur découverte il y a déjà plusieurs siècles. Mais ces trois dernières décennies une croissance de l'intérêt porté à la SSF à relancé la recherche pour une myriade de produits, dont :

- Divers enzymes
- Des pigments
- Des arômes et composés aromatiques
- Des produits organiques : éthanol, acide citrique, acide lactique,...
- Des résidus agricoles enrichis de protéines pour l'alimentation des animaux
- Des antibiotiques, tel que la pénicilline
- Des agents biologiques : bio insecticide et bio herbicide

### 3.3 DESCRIPTION D'UN PROCESSUS CLASSIQUE D'UNE SSF

Une fermentation sur substrat solide se déroule de la manière suivant :

- Préparation de l'inoculum<sup>1</sup> : La méthode de préparation de l'inoculum dépend du micro-organisme impliqué. Beaucoup de processus de SSF mette en œuvre des champignons filamenteux impliquant des inoculums sous forme de spores<sup>2</sup>. Le but de cette étape est de développer un inoculum de taille suffisant et de viabilité élevée. Il peut être préparé sous diverses formes. Pour une fermentation fongique il est possible de produire un inoculum mycélien<sup>3</sup> dissous dans un liquide. Une seconde solution consiste à sécher et concasser des spores afin d'obtenir un inoculum sous forme de poudre.
- Préparation du substrat : Il doit tout d'abord être coupé, haché, broyé, ou mis sous forme de granulé afin d'obtenir des particules de taille appropriée. On y ajoute de l'eau et des nutriments. Dans certain cas, il peut être cuit ou traité de différente manière pour augmenter sa valeur nutritive. Il est ensuite stérilisé, ou pasteurisé suivant les cas, en dehors du bioréacteur. Alternativement, il est possible et préférable de faire cette étape avec le substrat à l'intérieur du bioréacteur.
- Préparation du bioréacteur : Le bioréacteur doit être nettoyé complètement entre chaque fermentation. Il doit ensuite être stérilisé, soit vide, soit avec le substrat à l'intérieur.

<sup>1</sup> Préparation destinée à ensemencé le substrat avec des microorganismes

<sup>2</sup> Elément unicellulaire produit et disséminé par les végétaux et dont la germination donne un nouvel individu

<sup>3</sup> Appareil végétatif des champignons, formé de filaments ramifiés, généralement de couleur blanche

- Inoculation et chargement : L'inoculation peut se produire avant ou après le chargement. Si le lit de substrat ne peut pas être mélangé dans le bioréacteur via un brasseur, l'inoculation doit être faite en dehors du bioréacteur. Si le lit peut être brassé, alors la meilleure méthode d'inoculation est de pulvériser l'inoculum au-dessus du lit pendant qu'il est mélangé. Si le substrat est pasteurisé ou stérilisé et inoculé en dehors du bioréacteur, il est nécessaire d'effectuer le chargement très soigneusement afin d'empêcher ou du moins de minimiser la contamination.
- Opération durant la fermentation : Cette étape dépend du type de bioréacteur utilisé. On peut dire tout même que le pilotage du débit et de la température d'air de l'aération, de la vitesse de mélange du lit, et de la température de l'eau de refroidissement est commun à tous les types de bioréacteur. Tous ces paramètres doivent être pilotés de manière optimal afin d'avoir la meilleure croissance possible des micro-organismes.
- Déchargement : Dans certain cas, une lixiviation<sup>4</sup> ou une étape de séchage est nécessaire. Ces opérations sont exécutées dans le bioréacteur. Sinon, les étapes d'extraction du produit sont entreprises en dehors du bioréacteur. Quoi qu'il en soit, il faut enlever les particules solides de la cuve.
- Processus avals : Tout dépend de la fermentation exécutée. Parfois il faudra séparer les enzymes produites et les purifiées. Les enzymes peuvent ensuite être stockées ou directement utilisées pour d'autres productions industrielles.
- Traitement des déchets : Dans certain cas, il n'y a pas de déchets à proprement dit. Tout peut être utilisé, les enzymes produites et les résidus solides. C'est souvent le cas pour des applications en agroalimentaire. Dans les autres cas, le résidu solide devra être détruit de la manière adéquate.

---

<sup>4</sup> Opération qui consiste à faire passer un solvant à travers le substrat afin d'y récupérer les constituants solubles (enzymes)

## 4 ETAT DE L'ART

### 4.1 TYPE DE BIORÉACTEUR POUR LA SSF

Les différentes conceptions de bioréacteurs sont définies selon 4 groupes distincts dépendant de leur mode d'aération et d'agitation du lit de substrat. La *figure 4.1* est un diagramme qui décrit brièvement ces groupes. Chaque groupe est décrit plus en détail dans les sous-chapitres suivants.

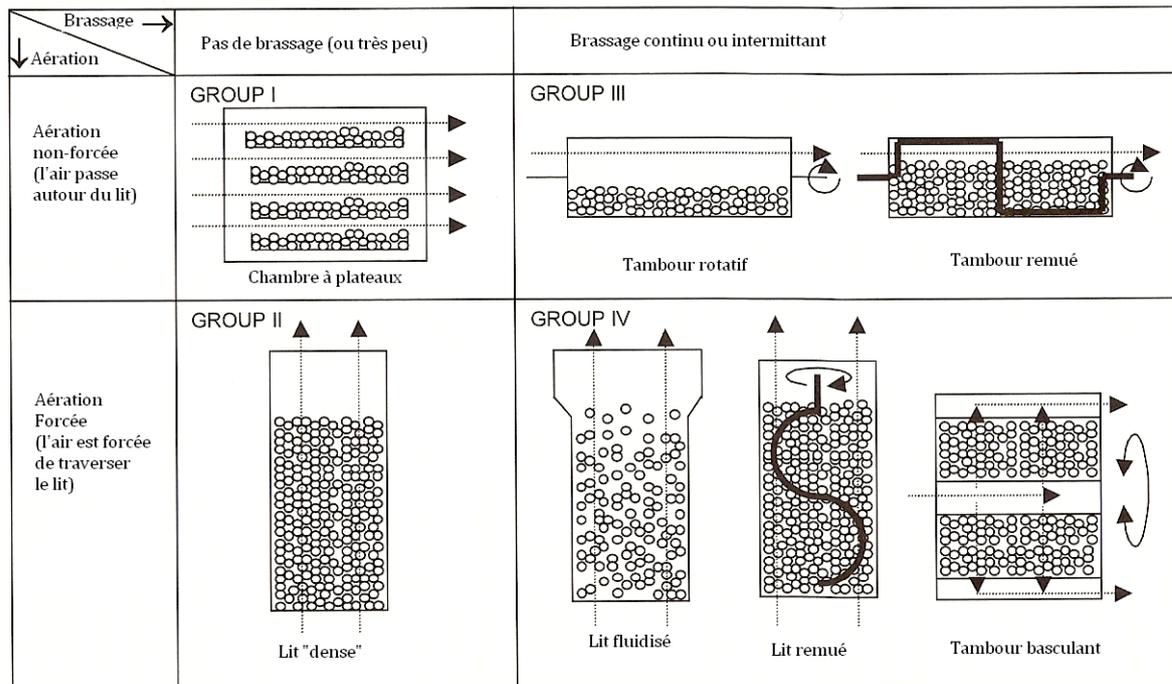


Figure 4.1 : Classification en 4 groupes des différents bioréacteurs selon leur mode d'agitation et d'aération.

#### 4.1.1 GROUPE I : BIORÉACTEUR SANS AÉRATION NI AGITATION

Le 1<sup>er</sup> groupe de bioréacteurs appelé aussi bioréacteurs à plateaux représente la technologie la plus simple pour la SSF. Il a été utilisé il y a plusieurs siècles déjà pour la production de la sauce soja. La *figure 4.2* décrit brièvement le principe utilisé et la structure de ce type de bioréacteur.

La chambre contenant les plateaux peut être relativement petite, ou au contraire assez grande pour que des personnes y entrent. Les plateaux peuvent être construits avec différents matériaux tels que du bois, du bambou, du tissu ou du plastique. Des sachets en plastique pourraient même être employés à la place des plateaux rigides. Le fond et les côtés du plateau peuvent être perforés afin d'améliorer l'aération et refroidis par un circuit d'eau.

Les caractéristiques importantes de conception pour ce type de bioréacteurs sont, les dimensions du plateau, à savoir sa longueur, sa largeur et sa profondeur, le positionnement des plateaux dans le bioréacteur et les surfaces disponibles pour le refroidissement des plateaux. Il est possible de contrôler la température, l'humidité et le débit d'air circulant dans la chambre. Si le bioréacteur est

pourvu d'un système de refroidissement à eau, on peut également intervenir sur la température de l'eau et son débit.

La couche du lit de substrat dans les plateaux est limitée à environ 5 cm à cause des transferts de chaleur et de la diffusion de l'oxygène. Ce qui implique que ce type de bioréacteur est très mal adapté à la production de masse, car il faut rapidement d'énorme surface pour entreposer les plateaux. De plus la grandeur et le nombre de plateaux demandent beaucoup de manutention. L'installation peut être robotisée, mais le prix de revient du bioréacteur va être démesuré. C'est pourquoi, il vaut mieux utiliser ces réacteurs en laboratoires pour la recherche et développement plutôt qu'en production.

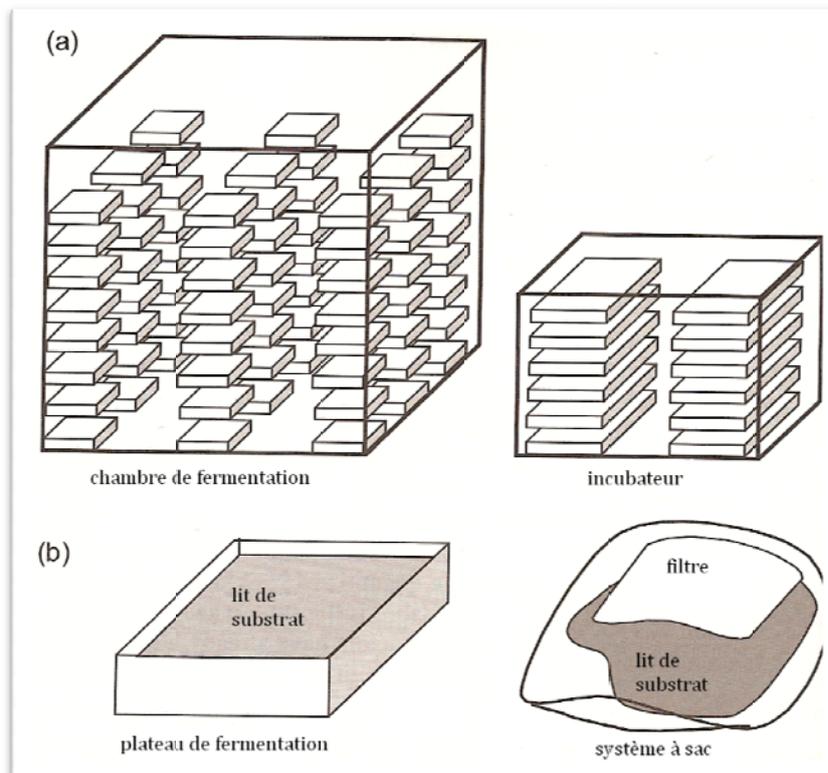


Figure 4.2 : Bioréacteur à plateau appartenant au 1<sup>er</sup> groupe.

- a) Différentes chambres de fermentations avec la disposition des plateaux.
- b) Différents concepts de plateaux : à droite un plateau rigide et à Gauche un sac pouvant être fabriqué en matériau poreux ou étanche avec un filtre permettant les échanges gazeux.

#### 4.1.2 GROUPE II : BIORÉACTEUR AVEC AÉRATION FORCÉE SANS AGITATION

La figure 4.3 décrit les caractéristiques fondamentales de construction de ce second groupe de bioréacteur que l'on caractérise par le fait qu'il contient un lit de substrat dense.

Ce type de bioréacteur doit être choisi lorsque le micro-organisme à cultiver ne peut supporter les forces de cisaillement créé par un agitateur. Le défi principal pour la production à grande échelle et de réduire au minimum le gradient de température. Pour ce faire, il faut que l'épaisseur du substrat soit aussi fine que possible afin de faciliter les échanges thermiques entre l'air et le substrat.

C'est pourquoi on développera plutôt des réacteurs horizontaux (*figure 4.3 d*) ou possédant plusieurs rampes de tubes perforés distribuant l'air depuis le centre du substrat (*figure 4.3 b*). Une autre option consiste à intégrer un échangeur de chaleur (à plaque ou serpentin) à l'intérieur du réacteur. L'épaisseur du substrat doit être comprise entre 20 cm et 1 m maximum suivant les cas.

On peut difficilement humidifier le substrat de manière homogène du fait qu'il n'y a aucune agitation. Il faut donc humidifier l'air à l'aide d'un bulleur avant de l'injecter à travers le substrat. De plus, il faut compter avec le phénomène d'évaporation qui va avoir tendance à faire sécher le substrat et donc ralentir la croissance des micro-organismes. Pour limiter ce phénomène il faut saturer l'air en eau. Avec l'évaporation, on peut observer de la condensation sur les parois supérieures du réacteur, ce qui paradoxalement va noyer le sommet du lit. Les réglages de température de l'air et d'hygrométrie sont donc très importants afin d'éviter ces phénomènes.

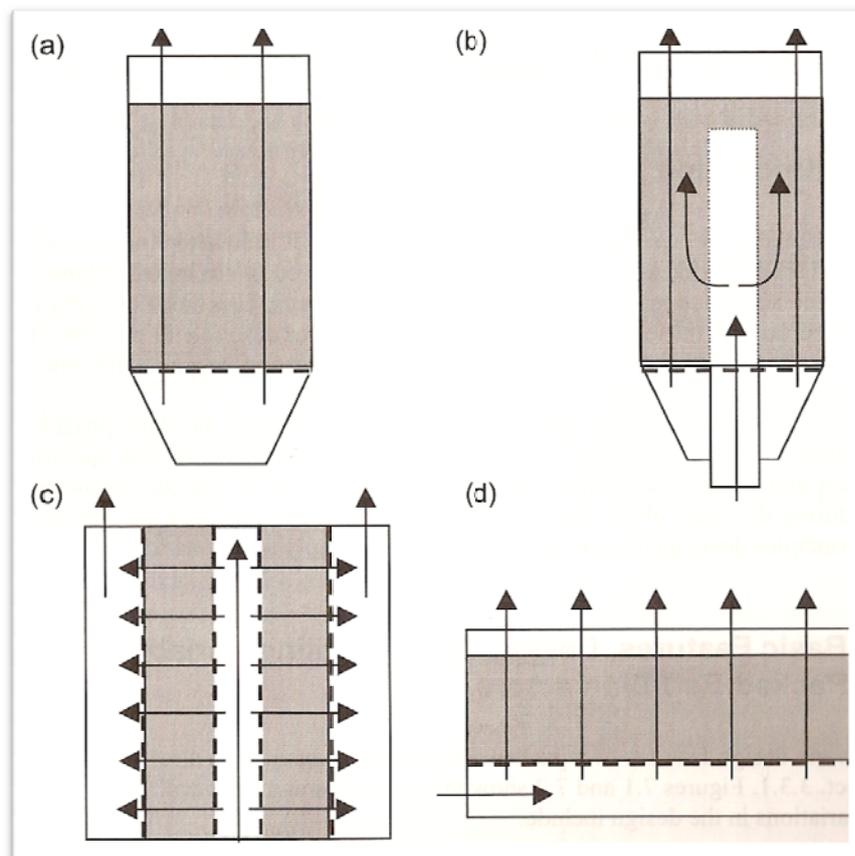


Figure 4.3 : Bioréacteur à lit dense du 2<sup>ème</sup> groupe et ces différentes variantes.

- a) Construction traditionnelle d'un bioréacteur à lit dense.
- b) Un ou plusieurs tubes perforés remonte le long de l'axe vertical du lit pour une meilleure distribution de l'air. S'utilise surtout si le lit de substrat est très épais.
- c) Bioréacteur avec flux d'air radial. L'aération est plus facile, car le lit à traverser est plus mince.
- d) Configuration horizontale.

#### 4.1.3 GROUPE III : BIORÉACTEUR À TAMBOUR ROTATIF OU REMUÉ

Ce 3<sup>ème</sup> groupe est certainement le plus apte à la production de masse. Comme on le voit à la *figure 4.4* un grand volume de substrat peut être traité en même temps tout en gardant une épaisseur raisonnable. Cela pour autant que le micro-organisme cultivé puisse supporter le brassage plutôt puissant qu'offre ce style de construction.

Dans ce type de bioréacteur, l'aération circule autour du lit, ce qui n'empêche pas une bonne diffusion de l'oxygène car la rotation du tambour génère de grand mouvement de brassage. La vitesse de rotation peut bien sûr être réglée. On peut également incliner l'axe de la cuve. Le brassage peut encore être amélioré en modifiant la section interne du tambour, en y soudant des chicanes par exemple. L'introduction de liquide est relativement aisée. On peut amener de l'eau par l'axe du tambour et la répartir de manière homogène en la pulvérisant à travers des buses.

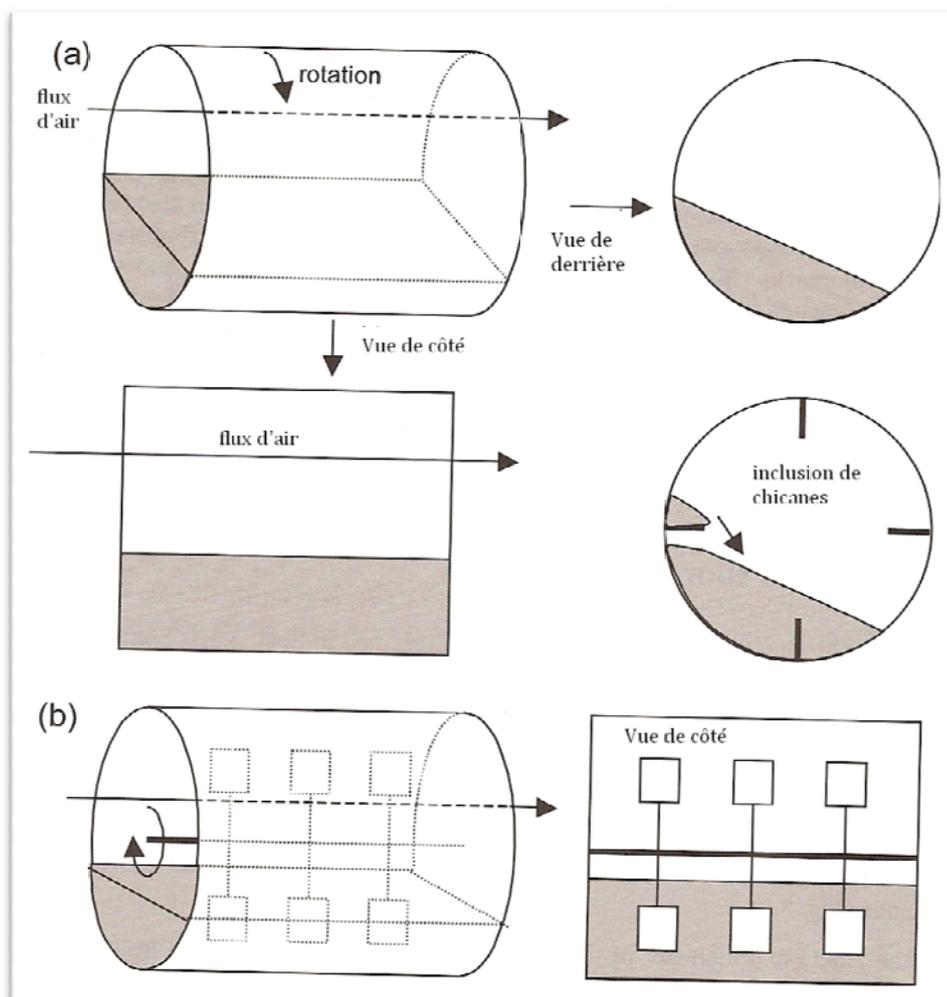


Figure 4.4 : Schématique des bioréacteurs du 3<sup>ème</sup> groupe.

a) Bioréacteur à tambour rotatif.

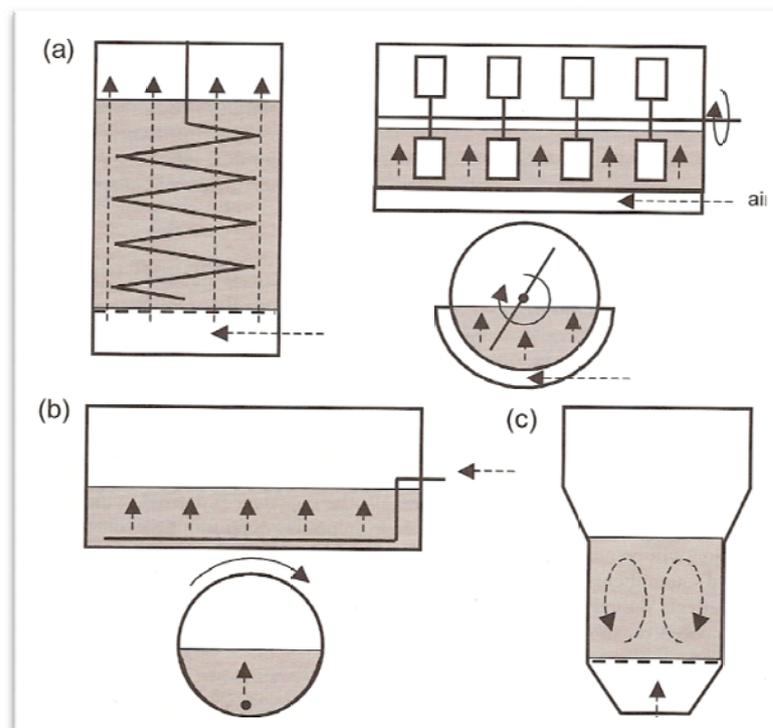
b) Bioréacteur à tambour remué

#### 4.1.4 GROUPE IV: BIORÉACTEUR AVEC AÉRATION FORCÉE ET AGITATION CONTINUE

Ce dernier groupe est divisé en 2 sous-groupes. Le premier est celui des bioréacteurs agités en continue et le second, ceux qui le sont qu'en intermittence. La différence au niveau construction réside uniquement à utiliser une temporisation sur le moteur du brasseur. Comme le montre la *figure 4.5*, il existe plusieurs géométries complètement différentes pour obtenir un brassage et une aération forcée.

Ces bioréacteurs sont donc caractérisés par leur forme et par le type de brasseur qu'ils possèdent. Durant la fermentation, on peut agir sur les paramètres de température, de débit et d'humidité de l'air, de la vitesse de rotation de l'agitateur et de l'injection d'eau ou d'autre matière. Cette dernière est particulièrement efficace dans ce type de bioréacteur, surtout dans ceux qui sont agités en continue, car le brassage homogénéise très bien la masse de substrat.

Ils possèdent donc un gros avantage par rapport au bioréacteur à lit dense aéré (groupe II). L'air doit constamment être saturé en eau pour limiter au mieux le phénomène d'évaporation dans un bioréacteur à lit dense, ce qui n'est pas facile. Si l'air était sèche, la croissance du micro-organisme diminuerait jusqu'à s'arrêter. Dans un bioréacteur agité, il est plus facile d'humidifier le substrat et de l'homogénéiser, par un arrosage avec dispersion par buse. On peut donc utiliser de l'air sec pour promouvoir l'évaporation et donc refroidir un peu le substrat. Pour couper la croissance, il suffirait de ne plus l'humidifier.



*Figure 4.5* : Différentes méthodes pour obtenir une aération forcée et une agitation du substrat.

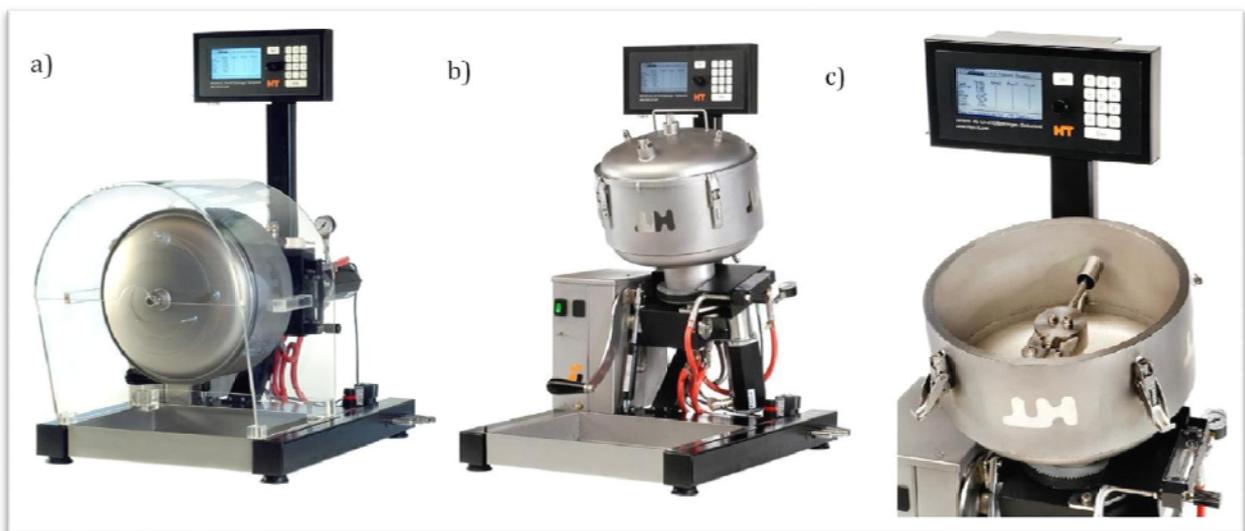
- a) Bioréacteurs avec une agitation mécanique verticale ou horizontale dans un tambour, et aération forcée par-dessous le substrat.
- b) L'agitation est assurée par le tambour tournant, l'aération se fait par un conduit amené par l'axe de rotation.
- c) L'agitation est causée par le mouvement de l'air. Bioréacteur également appelé à lit fluidisé.

## 4.2 PRODUITS EXISTANTS

Il existe peu de fabricant de bioréacteur spécifique à la fermentation sur substrat solide. La firme *INFORS HT* implanté à Bottmingen en Suisse à un modèle de sa gamme de bioréacteur destiné à des réactions sur des substrats solides. Il s'agit du *TERRAFORS*. C'est un modèle du groupe 3, soit à tambour rotatif comme on peut l'observer sur les différentes illustrations de la *figure 4.6*.

On recense aussi la firme *Bioreact GmbH* à Mülheimer en Allemagne, spécialisé dans la mise en œuvre et l'analyse des enzymes, qui propose 2 modèles de bioréacteurs pour traitement des substrats solides. Le *FUNGTRIX* en illustration à la *figure 4.7* est un réacteur vertical agité avec possibilité d'aération forcée et l'*AIRMIX* à la *figure 4.8* est du type tambour agité.

Sous chaque illustration figurent les caractéristiques correspondantes données par les fabricants.



*Figure 4.6* : Illustrations du bioréacteur *TERRAFORS* de la maison *INFORS HT* à tambour tournant conçu spécialement pour travailler avec des substrats solides.

- a) Vue d'ensemble, appareil en fonction.
- b) Vue d'ensemble en position de chargement/déchargement.
- c) Couvercle ouvert, on voit le brasseur à masselotte fixe.

- Volume total : 15 litres
- Matériaux : acier inox 316L
- Aération : 0.04 à 25 l/min
- Refroidissement : double manteau
- Pression utile : atmosphérique à 0.5 bar de surpression
- Agitation : moteur électrique. 0.1 à 10 tr/min, vitesse et durée programmable
- Raccord varié pour divers capteurs et injecteurs
- Injecteurs de gaz en acier
- Prix : environ 65'000 CHF

- Champs d'applications :
  - Etude et développement de méthodes de biodégradation
  - Etude et développement de méthodes de bioremédiation
  - Ecologie fondamentale et appliquée des sols
- Exemple d'utilisation :
  - Développement de procédés anaérobies<sup>5</sup>
  - Traitement des déchets solides, semi-solides ou liquides
  - Ensemencement des sols avec des micro-organismes spécialisés dans la dégradation des polluants
  - Production d'enzymes sur substrat solides
  - Ecologie microbienne
  - Contrôle biologique ou chimique des nuisibles



Figure 4.7 : Bioréacteur FUNGTRIX de la maison Bioreact GmbH

- Capacité : 6 litres
- Matériaux : acier inox
- Refroidissement : double manteau
- Agitation : moteur électrique et transmission par courroie
- Soupape de sécurité
- Raccord varié pour divers capteurs et injecteurs
- Injecteurs de gaz et de liquide disponible sur demande

<sup>5</sup> Micro-organisme qui peut se développer en l'absence d'air et d'oxygène.



Figure 4.8 : Bioréacteur AIRMIX de la maison Bioreact GmbH

- Capacité : 5 litres
- Matériaux : Acier inox
- Poids : 33 kg
- Encombrement : 355x328x325 mm (sans moteur)
- Pression max : 2 bars
- Refroidissement : double manteau
- Stérilisation : autoclave
- Agitation : moteur électrique, accouplement rigide
- Soupape de sécurité
- Raccords variés pour divers capteurs et injecteurs
- Injecteurs de gaz et de liquide

## 5 CAHIER DES CHARGES

Le cahier des charges rédigé ci-dessous à été réalisé en fonction des souhaits du mandant et des contraintes techniques imposées par la nature du produit, les installations existantes et la réalisation.

### 5.1 GÉNÉRAL

- L'installation doit être compacte toute en offrant un bon confort d'utilisation.
- Construction sur un châssis mobile.
- Le budget accordé au projet par la filière *Système du vivant de la HES SO valais* ayant été sous évalué, la construction de l'installation ne se fait pas durant le travail de diplôme, mais dans le courant de l'année 2009.

### 5.2 PARAMÈTRES DE SERVICE

- Paramètres à l'intérieure de la chambre en service :

Température : 20°C à 40°C  
Pression : atmosphérique

- Paramètres de stérilisation :

Température : 120°C  
Pression : 1 à 2 bars  
Durée : 20 minutes

### 5.3 LE RÉACTEUR

- Le réacteur doit pouvoir accueillir un volume de 5l de substrat solide. En tenant compte du fait que le réacteur ne doit jamais être plein à plus 80% du volume total, ce dernier est fixé à 8l. Le mandant préconise un design vertical dont la géométrie devra répondre au critère suivant :

$$1 < \frac{\text{diamètre}}{\text{hauteur}} < 1.5$$

- Un agitateur brasse la masse de substrat humide afin de l'aérer et de l'homogénéisée. La fréquence et la durée d'agitation doit pouvoir être réglée.
- La vitesse de rotation est comprise entre 1 et 30 tr/min environ avec possibilité de la régler.
- Ouverture facile de l'enceinte afin de pouvoir la nettoyer manuellement.
- Le réacteur est utilisé uniquement en production par charge. Il est donc complètement démonté entre chaque charge pour être nettoyé.
- Un système de ventilation forcée permet une bonne aération du substrat. Le débit d'air peut être réglé et la température contrôlée.
- Un système d'injection permet d'introduire des matières nutritives en solution.

- Garantir l'étanchéité de la chambre avec les paramètres de température et de pression de service. On choisit des joints O' Ring en EPDM : température d'utilisation max 160°C, résistant aux acides et aux bases organiques et inorganiques, à l'eau chaude et à la vapeur, non résistant aux huiles et graisses minérales, bonne caractéristique de vieillissement.
- Un système de chauffage/refroidissement permet de maintenir une température stable à l'intérieur de la chambre. La précision de réglage est de  $\pm 2^\circ\text{C}$ .
- Les fermentations demandent une certaine humidité à l'intérieur de la chambre. Il faut donc prévoir un moyen d'amener de l'eau dans le substrat pour l'humidifier et pour contrôler cette humidité.
- Un système de prise d'échantillon solide par carottage serait un plus afin de permettre à l'utilisateur d'effectuer des mesures de PH.
- Prévoir également des passages permettant à l'opérateur d'introduire des sondes de température (manuelle) à l'intérieur du substrat.
- Le réacteur est stérilisé entre chaque charge. De même pour le substrat. Il y a possibilité de stériliser le substrat et le réacteur en même temps. Cette opération a lieu dans un autoclave.
- Le réacteur est réalisé en acier inox. Les matériaux utilisés doivent supporter des PH allant de 4 à 9. L'acier inox 316L (1.4404 ou 1.4435) correspond aux spécifications demandées pour les parties en contact avec le produit et les gaz. Les autres parties peuvent être réalisées dans le même acier ou en 1.4301.
- La régulation du processus se fait par automate programmable NATIONAL INSTRUMENT de manière à être compatible avec les autres installations présentes dans le laboratoire ainsi que pour faciliter les opérations de modification, maintenance et débogage.
- L'interface utilisateur se fait au travers d'un Laptop connecté à l'automate par câble Ethernet. Elle doit permettre de transmettre les consignes de température, humidité vitesse de rotation et minuterie du brasseur, et de contrôler le bon déroulement des process. Elle devra également être pourvue d'un moyen d'analyse et d'enregistrement des processus.

#### 5.4 SÉCURITÉ

- Pas de mesure de sécurité particulière à prendre contre le feu et les explosions.
- Un système destiné à éviter les surpressions à l'intérieures du bioréacteur est nécessaire.
- Mise à la terre (standard) de tous les éléments métalliques.
- Les fermentations peuvent dégager des aérosols et des spores de champignons. Ce qui implique une filtration de l'air. Il faut donc dimensionner un filtre à l'extérieur de l'enceinte. La désintoxication de l'air par les gaz n'est pas à traiter dans le cadre du projet.

## 5.5 ENERGIES À DISPOSITIONS

- Vapeur industriel
- Eau de source pour refroidissement =>la température varie selon la saison entre 4°C et 12°C
- Electricité 230V/50Hz et 380V/50Hz
- Air comprimé industrielle 6 bar

## 6 THERMIQUES

La réaction se produisant lors d'une fermentation sur substrat solide est exothermique. Pour s'en convaincre, il suffit d'observer un composte. En l'ouvrant par le milieu on remarque que la température y est plus élevée que la température ambiante. Afin d'améliorer le rendement de chaque réaction, il convient de contrôler et de maintenir la température idéal à la croissance des champignons. Une température trop faible ralentie leur croissance et une température trop élevée les tue. C'est pourquoi il est important de dimensionner un bon système de régulation de la température. Dans notre cas, il s'agit surtout d'un système de refroidissement, cependant il peut servir de chauffage, pour démarrer une réaction par exemple. Afin de pouvoir quantifier et dimensionner un système de maintien de la température, j'ai travaillé sur la base d'une fermentation sur de la sciure de bois. Le *tableau 6.1* regroupe les caractéristiques de ce substrat, le *tableau 6.2* regroupe les caractéristiques de l'air à 20°C et le *tableau 6.3* les caractéristiques de la réaction. Les caractéristiques du substrat ont été défini par des expériences, calculs et estimations. Quand aux valeurs propres à la réaction, elles m'ont été fournies par le mandant ou correspondent à des valeurs critiques d'une réaction mettant en œuvre des *Aspergillus Niger*. [1]

Caractéristiques	Unités	Valeurs	Symboles
Densité théorique du bois (moyenne)	kg/m <sup>3</sup>	645	
Densité apparente de la sciure	kg/m <sup>3</sup>	84	
Densité tassée	kg/m <sup>3</sup>	105	
Densité moyenne	kg/m <sup>3</sup>	94.5	$\rho_s$
Volume total	m <sup>3</sup>	5.00E-03	V
Volume de substrat	m <sup>3</sup>	7.33E-04	$V_s$
Volume de pore	m <sup>3</sup>	4.27E-03	$V_p$
Surface projeté moyenne particule	mm <sup>2</sup>	20	$S_p$
Diamètre équivalent particule	mm	5	d
Surface active spécifique	m <sup>2</sup> /kg	13	$S_a$
Conductivité thermique	W/m K°	0.15	$\lambda_s$
Chaleur massique	J/kg K°	420	$c_b$

Tableau 6.1 : Caractéristiques du substrat

Caractéristiques	Unités	Valeurs	Symboles
Chaleur massique de l'air	J/kg K°	1000	$c_a$
Densité	Kg/m <sup>3</sup>	1.293	$\rho_a$
Viscosité dynamique	Kg/m s	1.7E-5	$\mu$
Conductivité thermique	W/m K°	0.023	$\lambda_a$

Tableau 6.2 : Caractéristique de l'air

Caractéristiques	Unités	Valeurs	Symboles
Volume de la cuve	m <sup>3</sup>	5.00E-03	V
Diamètre de la cuve	m	0.213	D
Section de la cuve	m <sup>2</sup>	3.56E-02	A
Hauteur utile	m	0.14	H
Conductivité thermique	W/m K°	47	$\lambda_s$

Tableau 6.3 Caractéristiques de la cuve et de l'acier

Caractéristiques	Unités	Valeurs	Symboles
Puissance thermique à évacuer (valeur critique)	W/kg	97	dQ/dt
Température à maintenir dans le substrat	°C	20-40	
Volume de la cuve	m <sup>3</sup>	5.00E-03	
Diamètre de la cuve	m	0.213	
Section de la cuve	m <sup>2</sup>	3.56E-02	
Hauteur de la cuve	m	0.14	

Tableau 6.4 : Caractéristiques de la réaction

## 6.1 BILAN ÉNERGÉTIQUE

Il est possible de dresser un bilan énergétique complet pour ce type de réaction. On peut tirer les informations nécessaires à l'établir dans l'ouvrage *Solid-State Fermentation Bioreactors* [1] pour diverses géométries. Dans le cas du dimensionnement de ce prototype, je prends en compte uniquement les valeurs de production d'énergie par les réactions et l'énergie soutirée par évaporation, qui peuvent également être trouvée dans l'ouvrage cité précédemment [1]. Quant aux divers pertes, qui ont principalement lieu dans les conduites, elles peuvent être minimisées en isolant toute la tuyauterie. Cependant, comme le démontre le chapitre 6.1.2, ces pertes sont négligeables. Les pertes dans le réacteur sont également négligeables du fait du caractère isolant du substrat.

### 6.1.1 ENERGIE D'ÉVAPORATION

L'énergie d'évaporation contribue au refroidissement du substrat, on peut la calculer de la manière suivante :

$$Q_{\text{évap}} = \lambda * k_w * A * (a_{\text{wsolid}} - a_{\text{wsolid}}^*)$$

Avec :

$Q_{\text{évap}}$  = Energie perdu par évaporation [J/h]

$k_w$  = Coefficient de transfert de masse [ $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ]

$A$  = Surface spécifique du substrat [ $\text{m}^2$ ]

$\lambda$  = Enthalpie de vaporisation de l'eau [ $\text{kJ}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$ ]

$a_{\text{wsolid}}$  = Activité de l'eau dans le solide

$a_{\text{wsolid}}^*$  = Activité de l'eau lorsqu'il y a équilibre avec la phase gazeuse

L'application numérique donne, avec des valeurs tiré de [1] :

$$Q_{\text{évap}} = 2256 * 0.2307 * 13 * (1.001 - 1) = 7.045 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{h}} = 19.6 \frac{\text{W}}{\text{kg}}$$

### 6.1.2 PERTES DANS LES CONDUITES

Application numérique avec Température de l'eau  $T_1=60^\circ\text{C}$  et température extérieure  $T_2= 20^\circ\text{C}$

Puissance perdue :

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{th}}$$

$$R_{th} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_e} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_a}} = \frac{1}{\frac{1}{300} + \frac{2 * 10^{-3}}{26} + \frac{1}{8}} = 7.68 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 * ^\circ\text{K}}$$

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R_{th}} = \frac{40}{7.68} = 5.2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Avec :

$Q$  = Energie perdu au travers des conduites [W/m]

$e$  = épaisseur de conduite [m]

$\alpha_e$  = Coefficient de convection de l'eau [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$ ]

$\alpha_a$  = Coefficient de convection de l'air [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$ ]

$\lambda$  = Conductivité thermique de l'acier [ $\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{K}$ ]

La perte de puissance est donc négligeable dans les conduites. Elle l'est également pour le réacteur, que l'on peut considérer comme une conduite fermée des 2 côtés.

### 6.1.3 ENERGIE À ÉVACUER

Finalement, l'aération forcée doit être dimensionnée pour évacuer l'énergie de la réaction, moins l'énergie perdue par évaporation, soit :

$$Q = Q_r - Q_{\text{évap}} = 97 - 19.6 = 77.4 \frac{W}{kg}$$

## 6.2 CHAUFFAGE/REFROIDISSEMENT DE LA MASSE MICROBIENNE

Bien que la presque totalité des bioréacteurs que l'on trouve sur le marché sont régulés en température par un double manteau, les calculs fait durant le projet de semestre [4] montrent que cette méthode n'est pas idéal. Du fait de la nature isolante thermique du substrat, la transmission de chaleur de l'extrémité du réacteur à son centre est longue. Ce qui n'est pas idéal pour une régulation précise et stable.

Une solution plus innovante et plus efficace consiste à utiliser l'aération forcée, dont la présence est obligatoire pour l'oxygénation des micro-organismes. En agissant sur la température de l'air injecté, on peut réguler de manière plus rapide et limiter le gradient de température dans le substrat. Car même si le coefficient de convection de l'air n'est pas très élevé et que le substrat est toujours aussi isolent, l'air à l'avantage de pouvoir circuler entre chaque particule. La surface d'échange thermique est par conséquent très grande. Elle atteint environ 13m<sup>2</sup> par kilo de substrat.

Le modèle de calcul présenté si dessous vise à déterminer le débit d'air nécessaire au maintient de la température dans le réacteur. Pour l'application numérique, je fixe les hypothèses suivantes :

- le flux d'air est turbulent
- la température est identique à l'intérieur du substrat en tout point et à tout moment, cette dernière est de 60°C
- la température de l'air à l'entrée est de 50°C
- La température de sortie de l'air de 54°C.

La *figure 6.5* est un schéma du modèle de calcul.

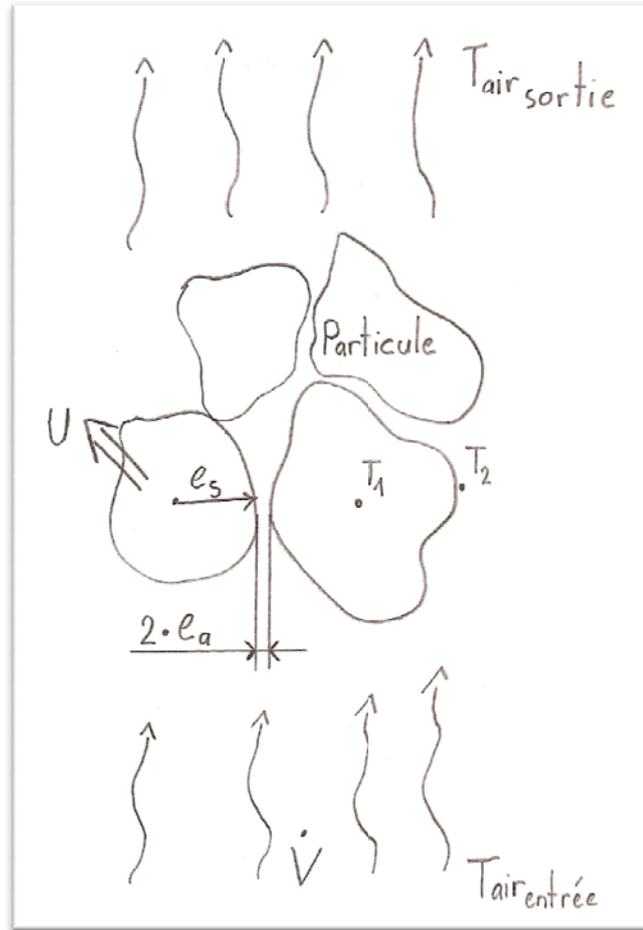


Figure 6.5: Schéma pour le calcul de la puissance thermique transmise entre les particules de substrat et l'air

En premier lieu, il faut évaluer le coefficient de transfert de chaleur du substrat vers le gaz, noté  $U$ :

Le facteur  $e_a$  correspond à l'épaisseur de la couche limite d'air autour d'une particule. Il s'agit d'une estimation, les autres valeurs sont tirées des *tableaux 6.1 à 6.4*

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

On peut ensuite calculer la différence de température entre le substrat et l'air permettant le transfert du flux thermique :

\_\_\_\_\_

Quant au débit d'air  $\dot{V}$  nécessaire :

$$\begin{aligned}
 \frac{dQ}{dt} * V * \lambda_s &= \dot{V} * c_a * (T_{air\ sortie} - T_{air\ entrée}) \leftrightarrow \dot{V} = \frac{\frac{dQ}{dt} * V * \lambda_s}{c_a * \Delta T} = \frac{77.4 * 5 * 10^{-3} * 94.5}{1000 * 4} \\
 &= 9.15 * 10^{-3} \frac{kg}{s} = 422 \frac{l}{min}
 \end{aligned}$$

Il reste à contrôler que nous sommes bien en situation d'écoulement turbulent pour valider les résultats :

$$Re_p = \frac{d * v * \rho_a}{\mu} = \frac{d * \frac{V}{A} * \rho_a}{\mu} = \frac{5 * 10^{-3} * \frac{7.03 * 10^{-3}}{3.56 * 10^{-2}} * 1.293}{1.7 * 10^{-5}} = 75$$

*Note: Le nombre de Reynolds calculé ici est relatif à la particule et non à la section de passage total du réacteur. On le nomme  $Re_p$ . Il est défini un écoulement laminaire si  $Re_p < 10$ .*

L'évacuation de la chaleur produite semble donc être possible avec des débits d'air relativement faible. En notant que c'est la valeur maximum de la température de consigne qui a été utilisée.

### 6.3 ECHANGEUR THERMIQUE

Différent type d'échangeur thermique ont été étudié pour permettre le transfert de chaleur de l'eau à l'air. Les échangeurs à flux croisés (radiateur) et à tubes coaxiaux se sont avérés inefficaces pour l'application. C'est finalement un échangeur à plaque de 1kW de la maison *COOLSON AG* qui a été retenu. Cette maison propose un type d'échangeur muni de plaques de forme particulière, adaptées à la transmission de chaleur entre un liquide et un gaz. La fiche technique de cet échangeur se trouve dans le dossier technique (*annexe 1*).

## 7 MECANIQUE

Ce chapitre décrit les différentes technologies et solutions adoptées pour ce bioréacteur. Il explique également le fonctionnement mécanique de l'installation. Tous les plans de fabrication sont à disposition dans le dossier technique (*annexe1*).

### 7.1 GÉNÉRALE

L'installation se compose d'un bioréacteur monté sur un châssis mobile. Le châssis accueille également tous les équipements nécessaires au fonctionnement du bioréacteur. Il doit être connecté aux diverses énergies telles que l'eau froide, l'eau chaude, l'air comprimé et l'électricité 230V 50Hz.

La température du substrat est régulée grâce à une aération forcée. L'air comprimé utilisée à cette fin est chauffée à travers un échangeur à plaques. Il puise l'énergie de l'eau chaude, liquide caloporteur de l'échangeur à plaque. Cette eau est préalablement mise à température et au débit adéquat. L'air est ensuite humidifié par un bulleur avant d'être injecté par le bas du réacteur. Ainsi le flux d'air traverse le lit de substrat et ressort par le sommet du réacteur. Il est filtré à 5  $\mu\text{m}$  afin d'éliminer les spores de champignons et les particules de sciures, puis évacué. Avec cette méthode, le réacteur travail à la pression atmosphérique, voir à une légère surpression. Par sécurité, une soupape de décharge réglable équipe le conduit de sortie des gaz, afin d'éviter toute surpression trop importante dans le réacteur. Incident qui pourrait provenir d'un filtre bouché.

Le réacteur est équipé d'une buse destinée à compléter l'apport en eau au sein du substrat. Elle vaporise un fin brouillard d'eau froide si nécessaire. Ce système est couplé avec une pompe péristaltique utilisée pour amener inoculum et nutriments en solutions liquide dans l'enceinte.

Un emplacement sur le châssis est réservé à l'armoire électrique contenant, entre autre, l'automate programmable et le transformateur 230V AC-24V DC. Le châssis est également pourvu de deux plateaux pouvant accueillir une pompe péristaltique, une balance, un becher et le Laptop servant d'interface de contrôle.

La *figure 7.1* est un schéma de principe résumant le fonctionnement de l'installation. La *figure 7.2* est composée de 2 vues de l'installation.

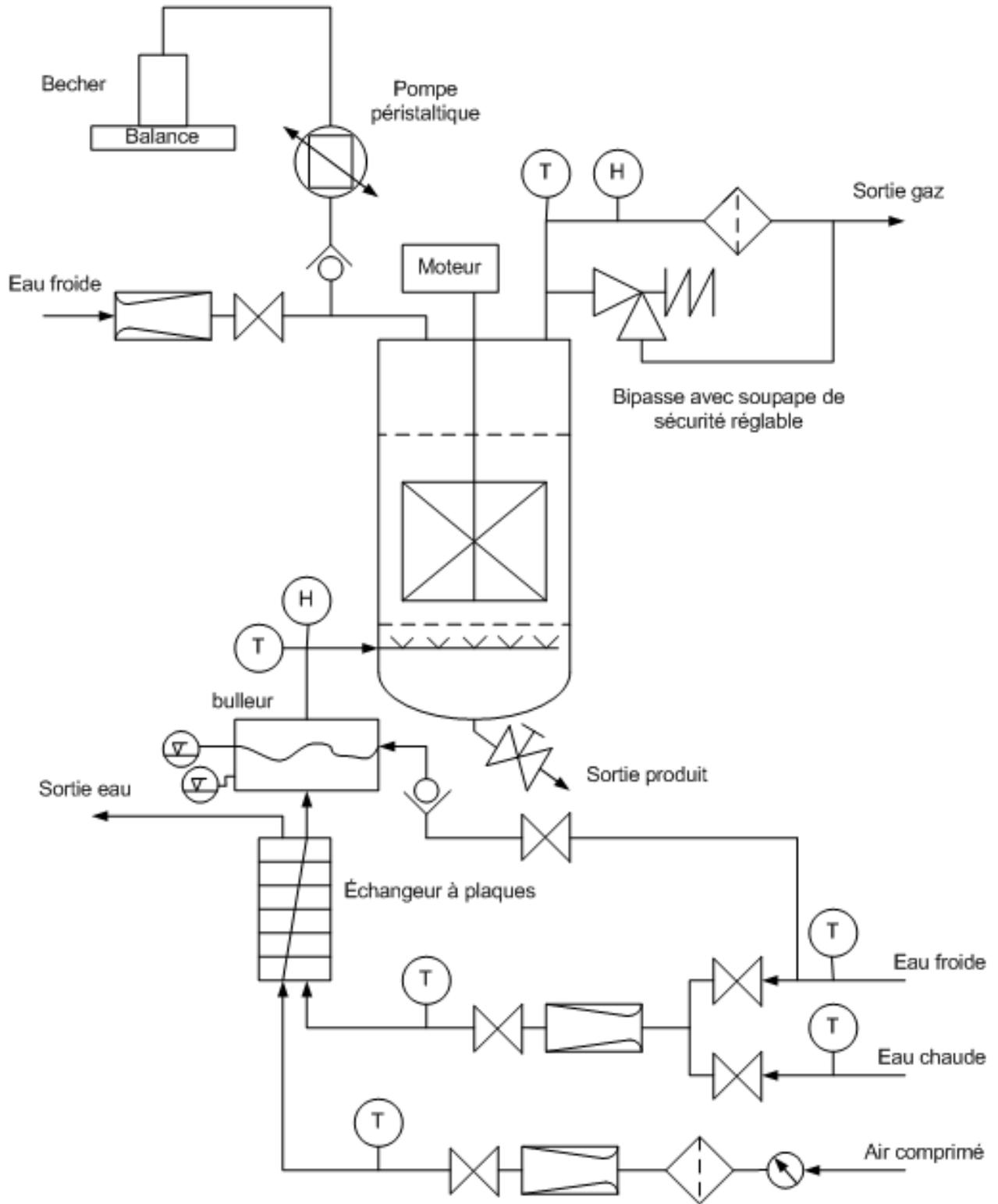


Figure 7.1 : Schéma de principe de l'installation

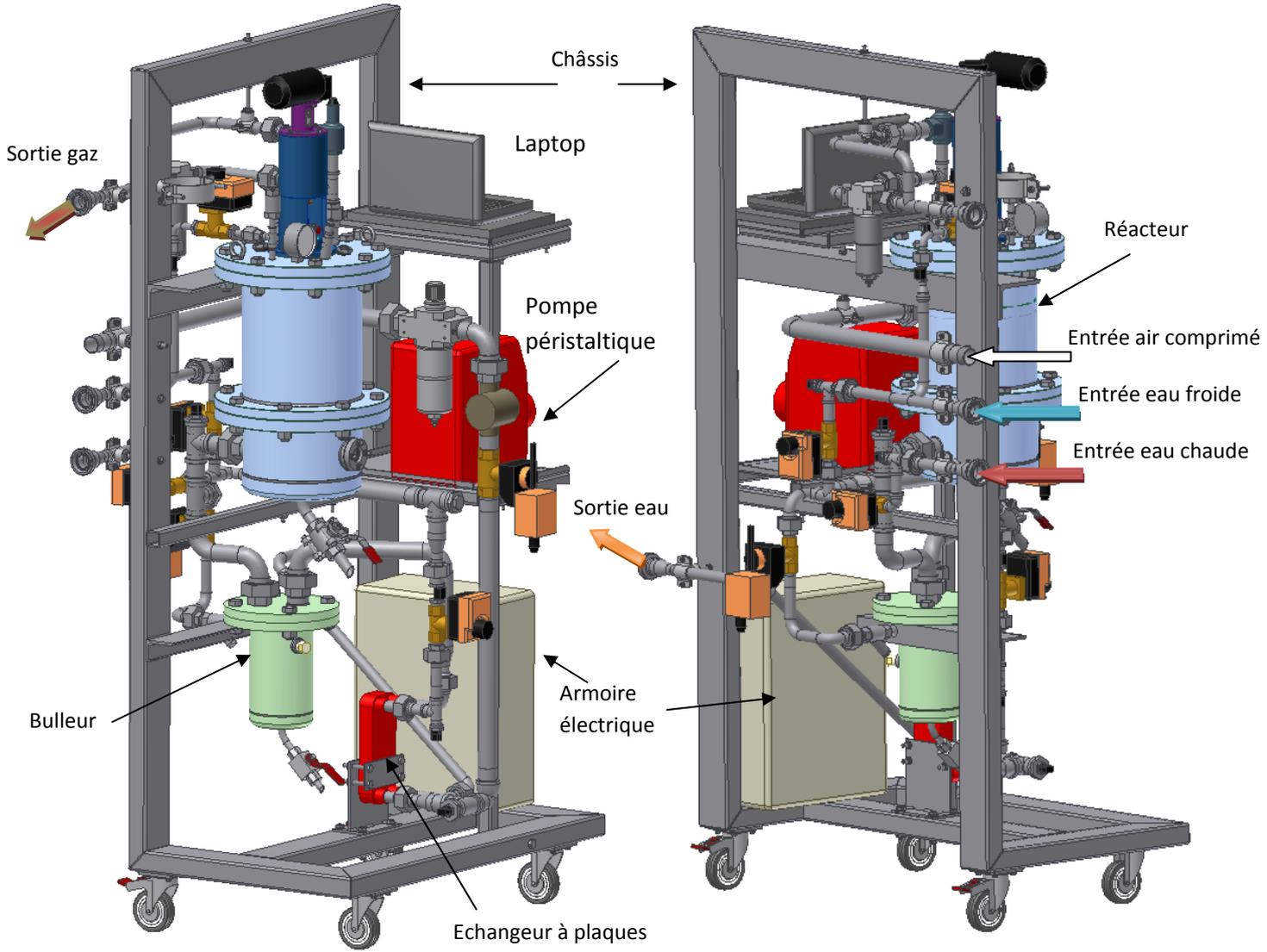


Figure 7.2 : Vues d'ensemble du bioreacteur et de ses équipements montés sur leur châssis

## 7.2 RÉACTEUR

Le réacteur est le centre de l'installation. C'est à l'intérieur de celui-ci que se déroule les fermentations. Il est entièrement réalisé en acier inox. La *figure 7.3* est une représentation du réacteur et de son agencement intérieur. On distingue la cuve, séparée en 2 sections : la partie supérieure dans laquelle ont lieu les réactions et la partie inférieure destinée à recevoir les liquides produits. La masse microbienne est prise entre deux filtres (*figure 7.4*) réalisés à partir de tissu métallique de faible ouverture (mesh 0,1 mm). Le filtre inférieur sert de support au substrat et délimite ainsi les deux parties de la cuve. Il doit permettre le passage de l'aération forcée (flèches bleues) et du produit (flèches rouges). Le filtre supérieur doit retenir les morceaux volatiles du substrat, laissé passer l'air afin qu'il puisse être évacué à l'extérieur du réacteur et permettre l'humidification du substrat par apport d'eau atomisé via une buse d'injection (*figure 7.4*).

La partie inférieure du réacteur est pourvue d'un hublot, seul moyen de contrôle du niveau de remplissage. Les cycles de production pouvant durer plusieurs semaines, l'écoulement des produits est long. Il n'a donc pas été prévu d'intégrer un capteur de niveau à cette cuve, mais cela reste une possibilité le cas échéant. Cette partie accueille également le distributeur d'air (aération forcée) dont le but est de répartir au mieux le flux d'air dans la section du réacteur (*figure 7.5*). Il s'agit simplement d'éléments de tuyauterie assemblés soit par soudure soit par vissage et étanché par bande téflon. L'air est orienté vers le bas par 16 orifices placés de chaque côté des tubes afin de créer des turbulences avant de traverser le lit de substrat.

Le réacteur est également pourvu de 2 systèmes de prises d'échantillons et de 2 tubes destinés à recevoir des sondes de températures.

Un moteur actionne le brasseur destiné à aérer et homogénéiser la masse microbienne<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup> Ensemble composé du substrat solide et des micro-organismes

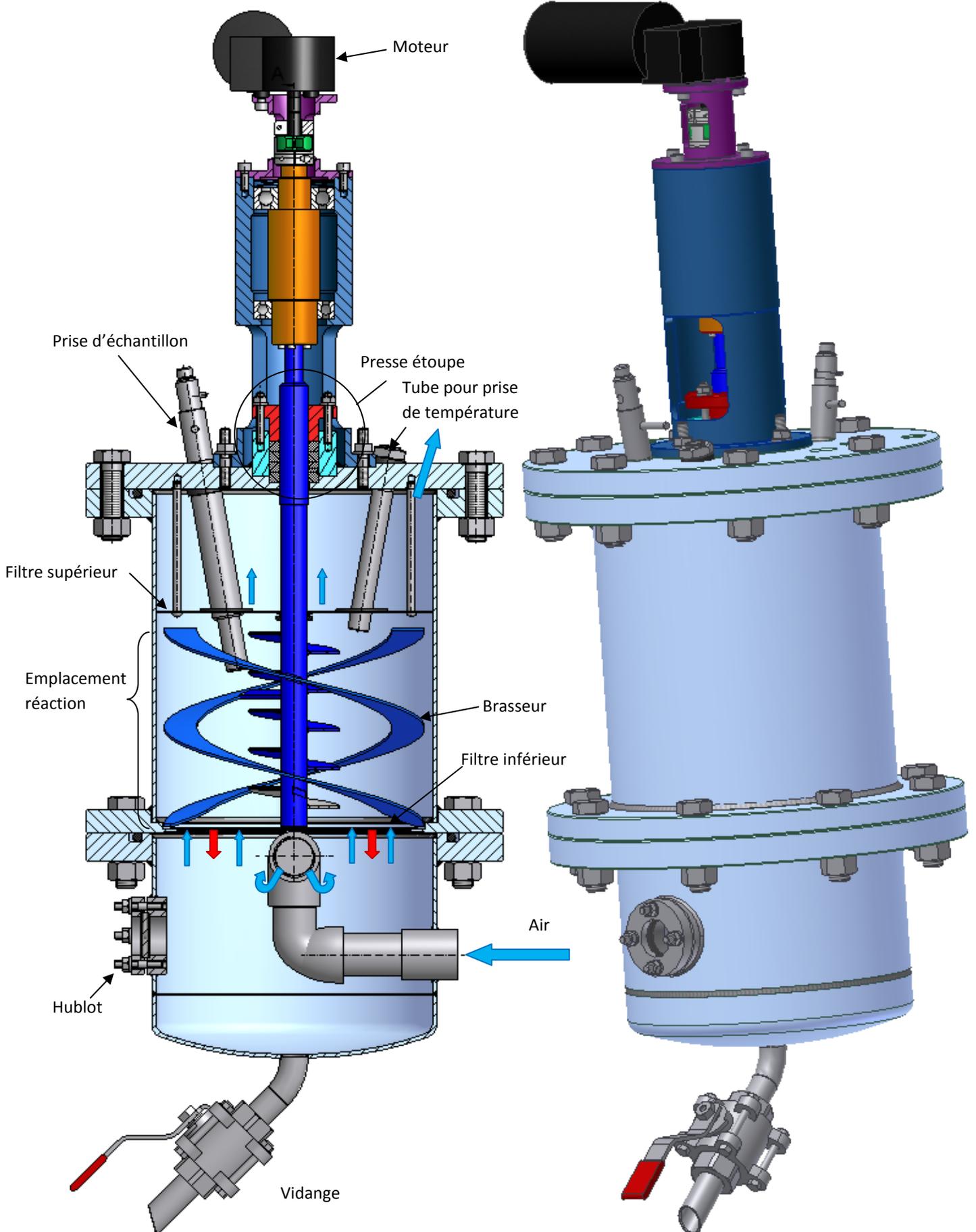


Figure 7.3 : Vues du bioréacteur

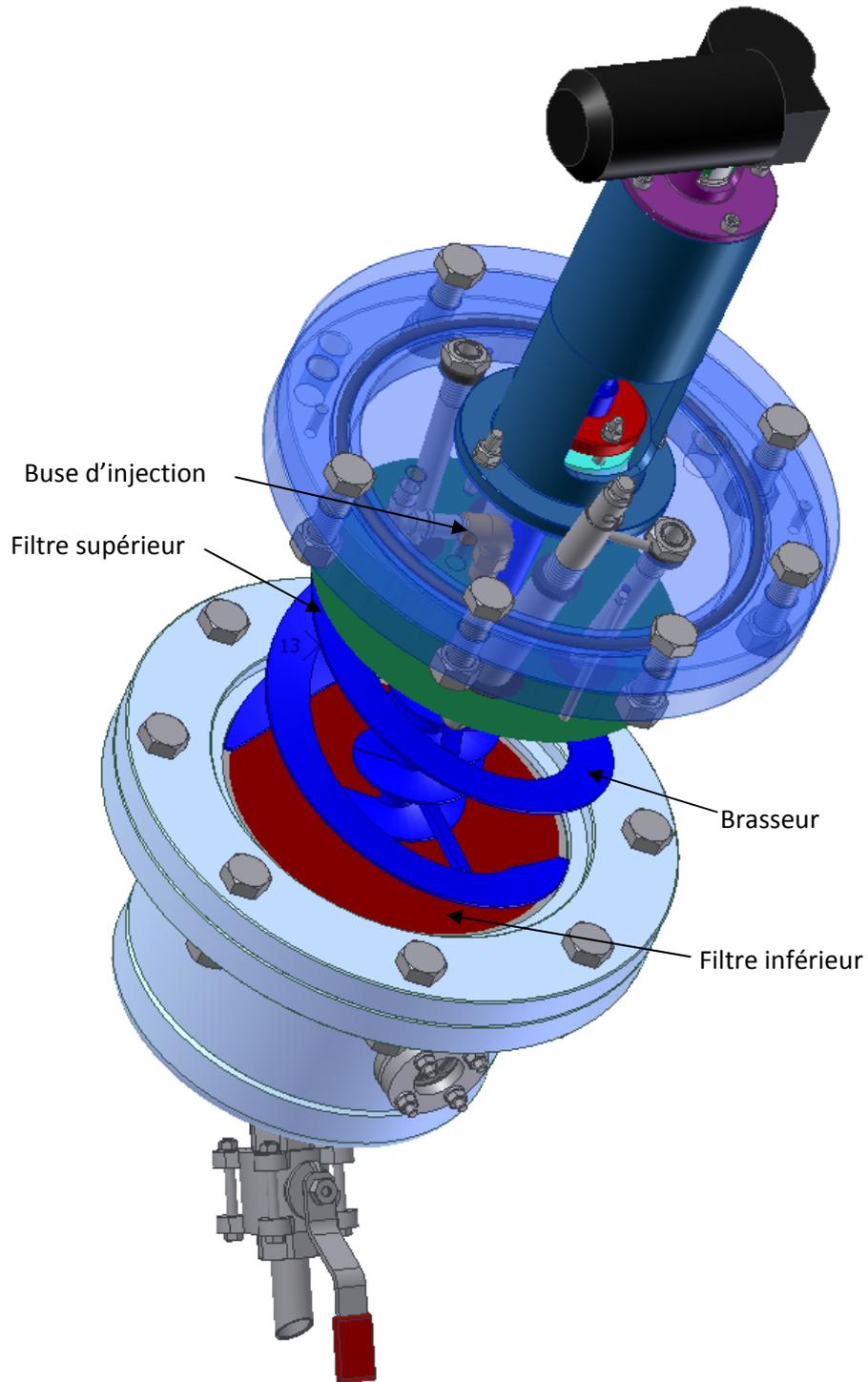


Figure 7.4 : Vue du bioréacteur en transparence

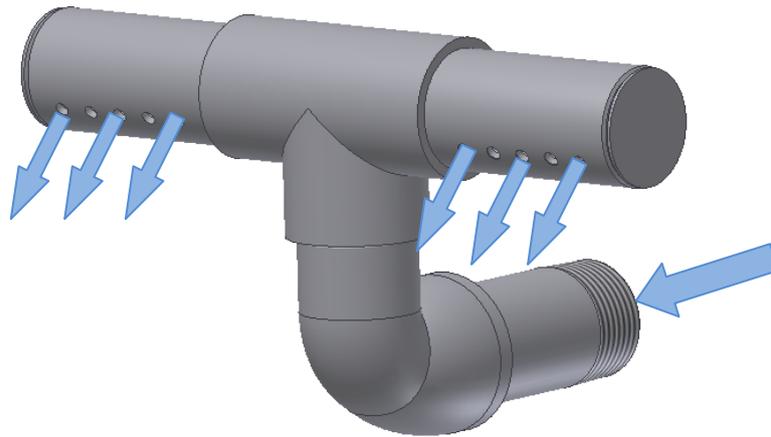


Figure 7.5 : Distributeur d'air

### 7.2.1 BRASSEUR

Le rôle du brasseur est d'homogénéiser le mieux possible la masse microbienne. C'est-à-dire qu'il doit répartir les micro-organismes dans le substrat, éviter les gros gradients de température et d'humidité, ainsi que permettre une bonne oxygénation. Il est donc particulièrement important d'utiliser le bon type de brasseur afin d'optimiser le rendement de production.

Le choix c'est arrêté sur un brasseur à double hélices inverses comme l'illustre la *figure 7.6*. Ce type de brasseur permet une bonne homogénéisation de la masse tout en limitant l'impact néfaste du cisaillement sur les micro-organismes. Grâce à ces 2 hélices de sens opposés, il crée un flux montant au centre du réacteur et un flux descendant dans les bords.

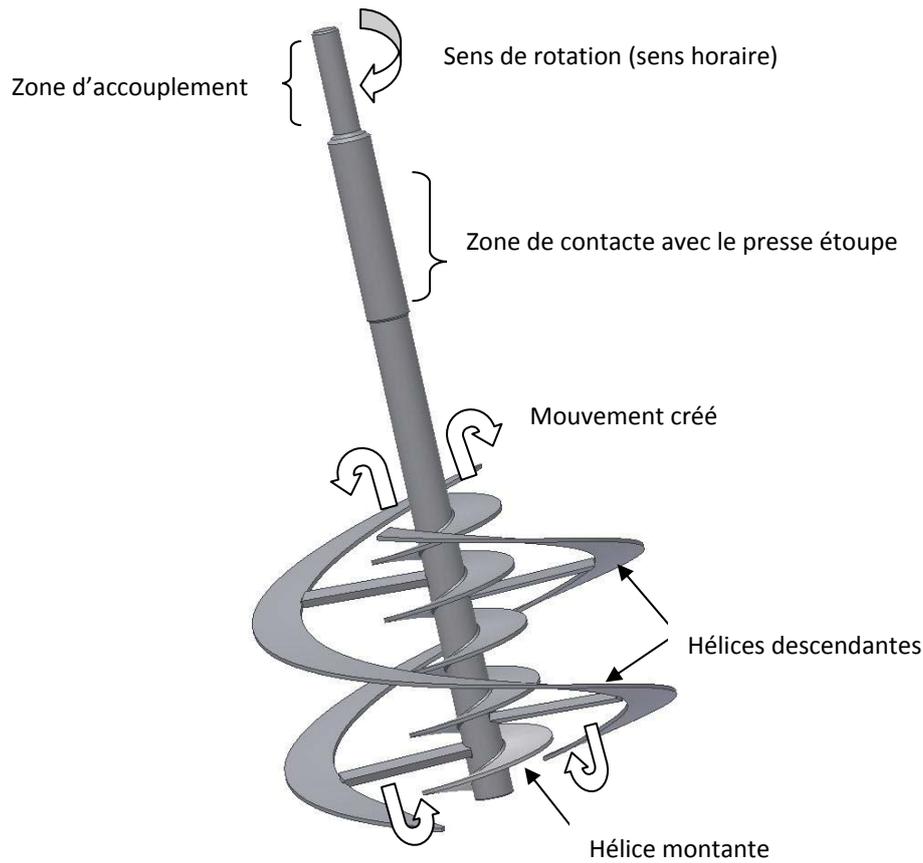


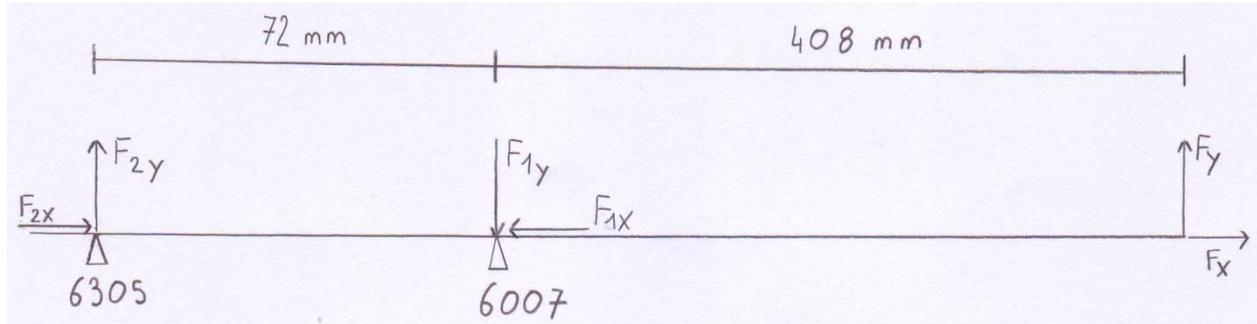
Figure 7.6 : Brasseur à double hélices inverses

## 7.2.2 ACTUATEUR ET TRANSMISSION DU COUPLE

### 7.2.2.1 Dimensionnement des roulements

Les roulements sont montés en X avec précontrainte. La précontrainte est garantie par une rondelle ondulée correspondant au roulement 6305 (figure 7.7). Elle fournit une force de précontrainte de 115N.

Il est difficile de mettre des valeurs sur les forces qui agissent sur le brasseur du fait de sa complexité. De plus n'ayant de tel brasseur à disposition je n'ai pu faire de test. De ce fait, la dimension des roulements a été choisie en fonction de la place à disposition et du confort de montage et d'usinage. Cependant on peut contrôler le montage et estimer la durée de vie des roulements en faisant les hypothèses suivantes :



$F_x=50N$   
 $F_y=100N$   
 $F_{2x}=115N$  (précontrainte)

Caractéristiques roulements selon SKF [5] :

Dénomination	Charge dyn C [kN]	Charge statique C <sub>0</sub> [kN]	Limite fatigue Pu [kN]	Coefficient de calcul f <sub>o</sub>
6305	23.4	11.6	0.49	12
6007	16.8	10.2	0.44	15

Calcul des forces sur les roulements :

$$\sum F_x = F_{2x} - F_{1x} + F_x = 115 - F_{1x} + 50 \rightarrow F_{1x} = 165 N$$

$$\sum F_y = F_{2y} - F_{1y} + F_y$$

$$\sum M_{z2} = -F_{1y} * 72 + F_y * 480 \rightarrow F_{1y} = \frac{F_y * 480}{72} = \frac{100 * 480}{72} = 666.7N$$

$$\rightarrow F_{2y} = F_{1y} - F_y = 666.7 - 100 = 566.7N$$

Charge dynamique équivalente :

$$P1 = X * F_{1y} + Y * F_{1x}$$

$$P2 = X * F_{2y} + Y * F_{2x}$$

$$\frac{F_{1x}}{F_{1y}} = \frac{165}{666.7} = 0.25$$

$$\frac{F_{2x}}{F_{2y}} = \frac{115}{566.7} = 0.2$$

$$f_o * \frac{F_{1x}}{C_0} = 15 * \frac{165}{10200} = 0.24 \rightarrow e = 0.2$$

$$f_o * \frac{F_{2x}}{C_0} = 12 * \frac{115}{16800} = 0.12 \rightarrow e < 0.19$$

$$\frac{F_{1x}}{F_{1y}} < e \rightarrow P1 = F_{1y} = 666.7N$$

$$\frac{F_{2x}}{F_{2y}} > e \rightarrow X = 0.56 \text{ et } Y = 2.5$$

$$P2 = 0.56 * 566.7 + 2.5 * 115 = 605N$$

Le roulement le plus sollicité est le roulement 6007

Calcul de durée de vie :

$a_1 = 1$  (fiabilité à 90%)

$a_{SKF} = 0.5$  (roulement graissé à vie, propreté normal, roulement explorer)

$$L_{nmh} = \frac{10^6}{60 * n} * a_1 * a_{SKF} * \left(\frac{C}{P}\right)^p = \frac{10^6}{60 * 30} * 1 * 0.5 * \left(\frac{16800}{666.7}\right)^3 = 4.4 * 10^6 \text{ Heures}$$

$L_{nmh} =$  durée de vie [h]

On remarque ainsi que le système est surdimensionné et que même si les forces en jeu sont plus grandes qu'estimées pour ce calcul, la marge de manœuvre est grande.

### 7.2.2.2 Dimensionnement du moteur

Dans ce cas également, il est difficile d'évaluer la valeur du couple résistant du brasseur de nouveau par manque de possibilité de faire des tests. De plus, la symétrie du brasseur ainsi que l'homogénéité de la matière à brasser (dans le cas idéal) font que les forces s'annulent.

On peut tout de même faire une évaluation pessimiste en prenant une force radiale  $F_r$  de 100N qui ne serait pas compensée et qui agirait sur l'extrémité d'une hélice extérieure :

Couple résistant :

$$M_r = F_r * R = 100 * 100 = 10'000 \text{ Nmm} = 10 \text{ Nm}$$

Avec :

$M_r =$  moment résistant [Nmm]

$F_r =$  Force radial [N]

$R =$  Rayon du brasseur [mm]

On n'ajoute à ce résultat le couple de frottement des roulements :

$$M = 0.5 * \mu * P * d$$

Avec

$M =$  moment de frottement [Nmm]

$\mu =$  coefficient de frottement constant du roulement

$P =$  Charge dynamique équivalente [N]

$d =$  diamètre d'alésage du roulement [mm]

Roulement 6305 :

$$M_1 = 0.5 * 0.0015 * 605 * 25 = 11.34 \text{ Nmm} = 0.113 \text{ Nm}$$

Roulement 6007 :

$$M_2 = 0.5 * 0.0015 * 666.7 * 35 = 17.5 \text{ Nmm} = 0.175 \text{ Nm}$$

Le moment résultant total est donc :

$$M = Mr + M1 + M2 = 10 + 0.113 + 0.175 = 10.288Nm$$

La puissance du moteur vaut :

$$P = M * \omega = M * \frac{2\pi * n}{60} = 10.288 * \frac{2\pi * 30}{60} = 32.32 W$$

Avec :

P= puissance [W]

$\omega$ = vitesse de rotation [rad/s]

n= vitesse de rotation [tr/min]

*Note : Le frottement que génère le substrat sur les pâles du brasseur n'ont pas été considéré par manque d'information à ce sujet. On peut cependant avancer qu'elle crée un couple résistant de l'ordre de grandeur de ceux des roulements.*

### 7.2.2.3 Résultats

Selon les valeurs de puissance et de couple trouvés ci-dessus, le prix de reviens et la disponibilité sur le marché, le motoréducteur choisi pour actionner le brasseur a une puissance de 25W. Il est alimenté en 24V DC et est capable de fournir un couple de démarrage de 35Nm et un couple nominal de 10Nm. Le réducteur est à vis sans fin et roue tangente offrant une grande réduction (1 :69). La vitesse de rotation en sortie de réducteur est de 35 tr/min maximum.

La transmission du couple se fait par liaison directe avec un accouplement rigide *ROTEX GS14* entre le moteur et l'arbre de reprise des forces, puis avec un accouplement rigide *KTR105* (accouplement à cône de serrage) entre cet arbre et le brasseur. Ces accouplements peuvent transmettre un couple maximum de 32Nm pour le *ROTEX GS14* et 40 Nm pour le *KTR105*. La *figure 7.7* illustre le montage des roulements et des accouplements.

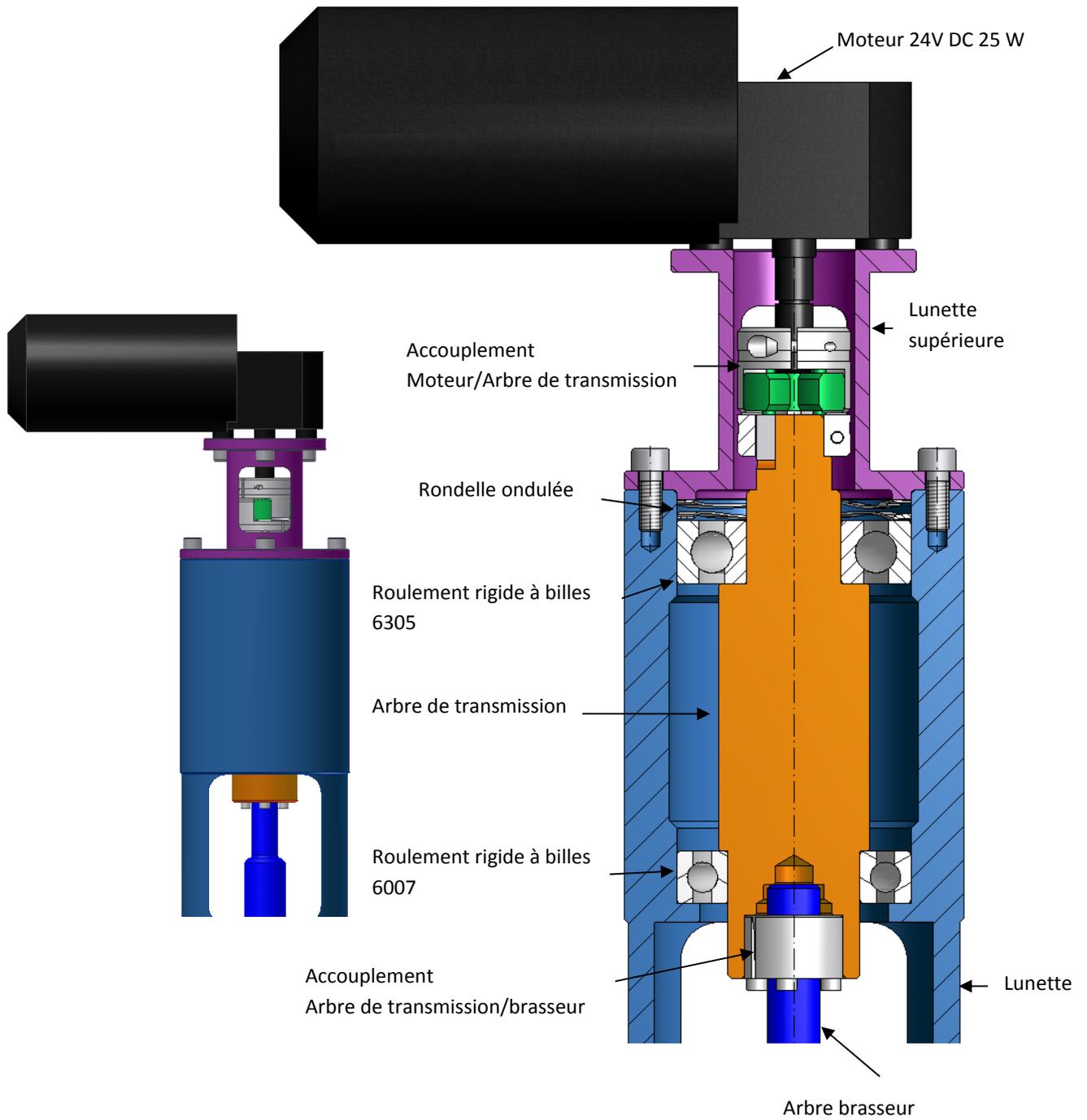


Figure 7.7 : Vues de la partie moteur et transmission du couple

### 7.2.3 PRESSE ÉTOUPE

Le presse étoupe garanti une bonne étanchéité au niveau de l'arbre du brasseur, malgré un faible débit de fuite propre à ce genre de montage. Les gaz produits dans le réacteur ne sont ni nocif pour la santé ni explosif mais un peu odorant. Ce petit désagrément est largement compensé par le faible prix de revient par rapport à une garniture mécanique sèche qui elle, aurait garantie une étanchéité total. Le choix c'est donc porté sur le presse étoupe en accord avec le mandant.

La *figure 7.8* illustre le montage du presse étoupe, composé d'une chemise, d'un presse étoupe et de 4 cordes de 8 mm de côté en fibre acrylique lubrifiée fil à fil avec du PTFE. Un système de serrage a vis permet la compression des cordes. Des lumières sont fraisées dans la lunette afin de pouvoir accéder aux écrous de serrage.

Le dimensionnement des éléments et les tolérances d'usinage des pièces sont réalisés suivant les conseils du fabricant de presse étoupe *GLOSTER PACK*.

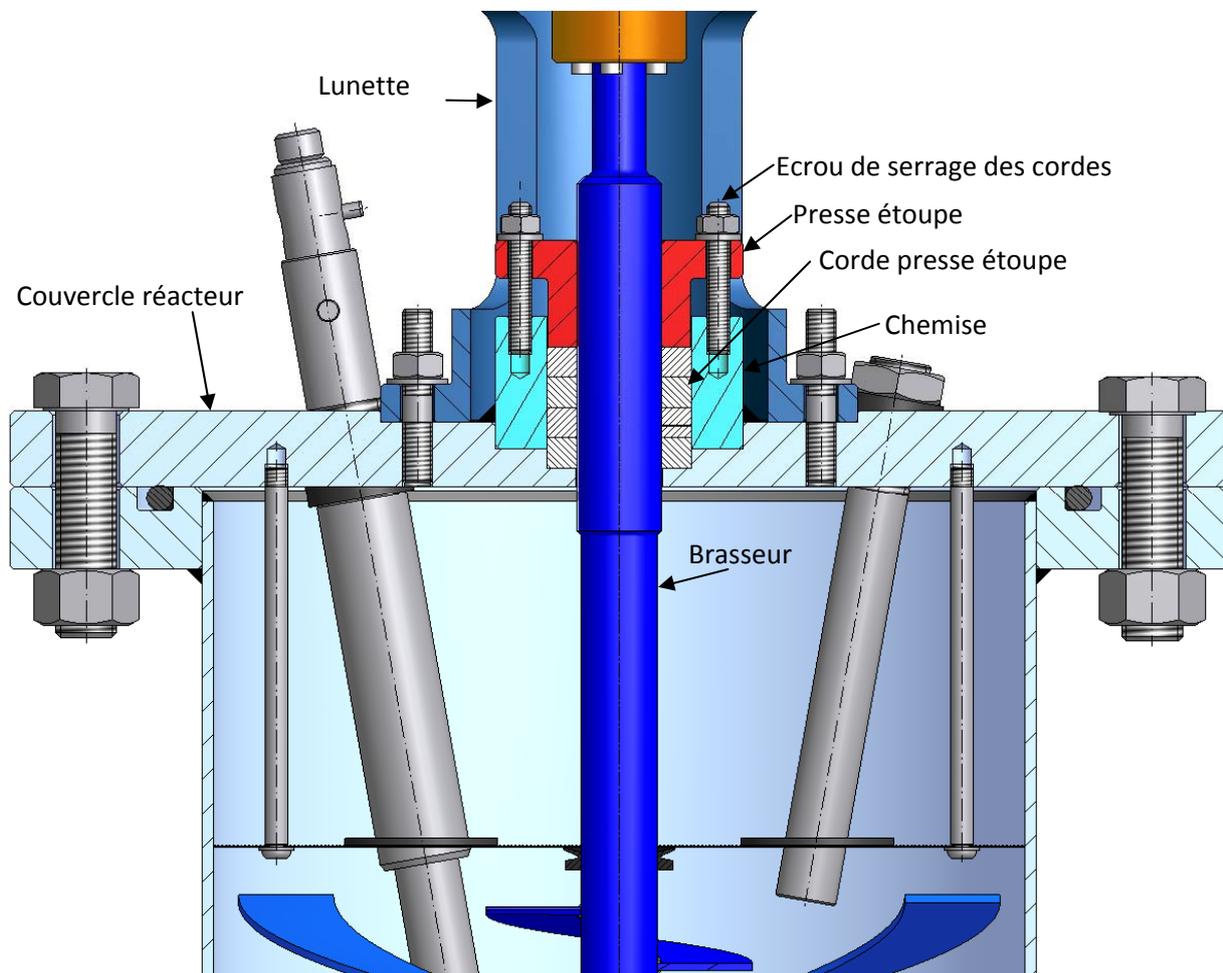


Figure 7.8 : Presse étoupe

#### 7.2.4 PRISE D'ÉCHANTILLON

Deux systèmes de prise d'échantillon placés sur le dessus du réacteur à l'opposé l'un de l'autre, permettent à l'utilisateur de faire des carottages d'environ  $3,1 \text{ cm}^3$  au sein de la masse microbienne. Ceci dans le but d'exécuter des contrôles de PH sur des échantillons. La *figure 7.9* est une coupe du système proposé et la *figure 7.10* mais en scène la méthode d'utilisation.

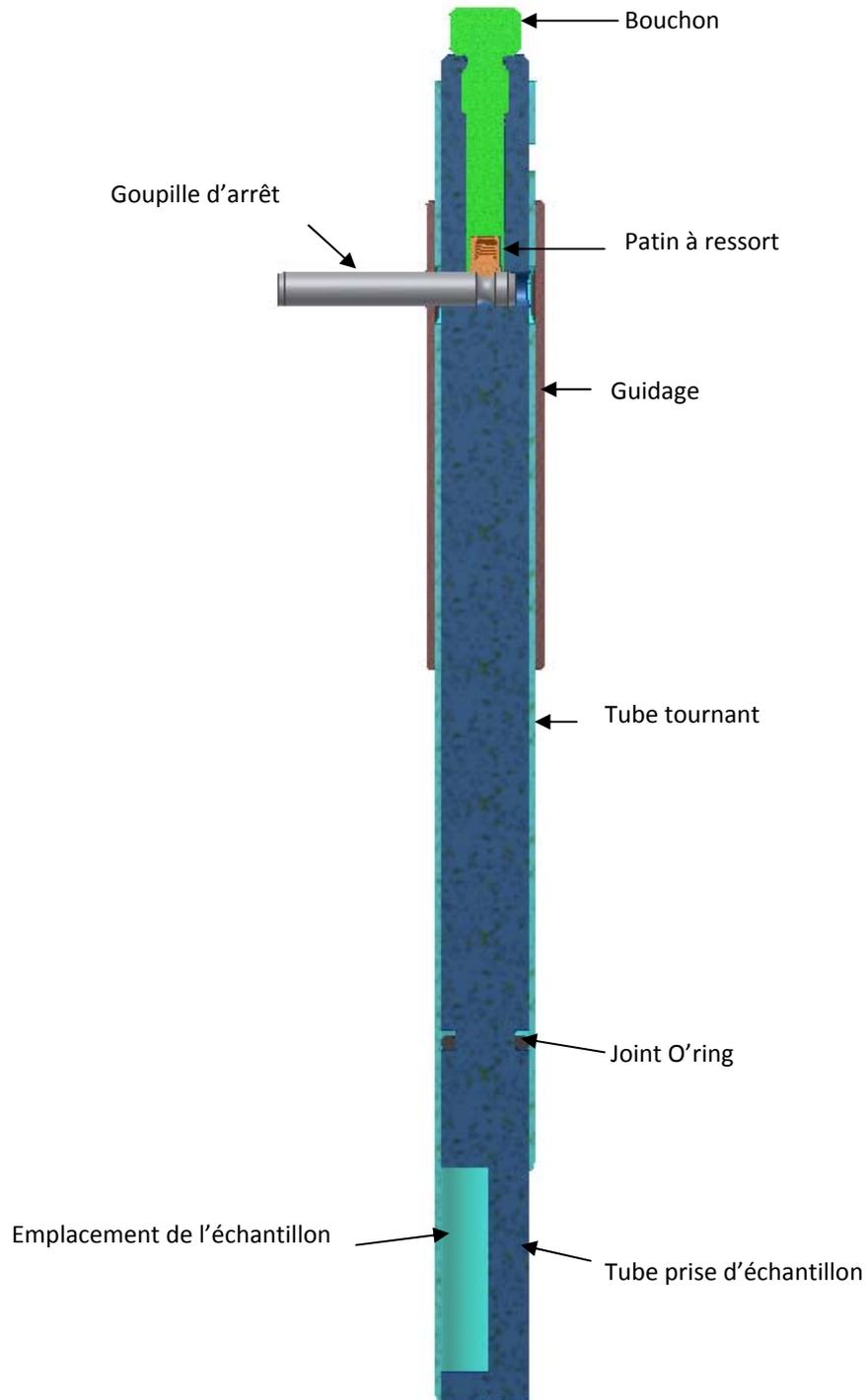


Figure 7.9 : Prise d'échantillon en coupe

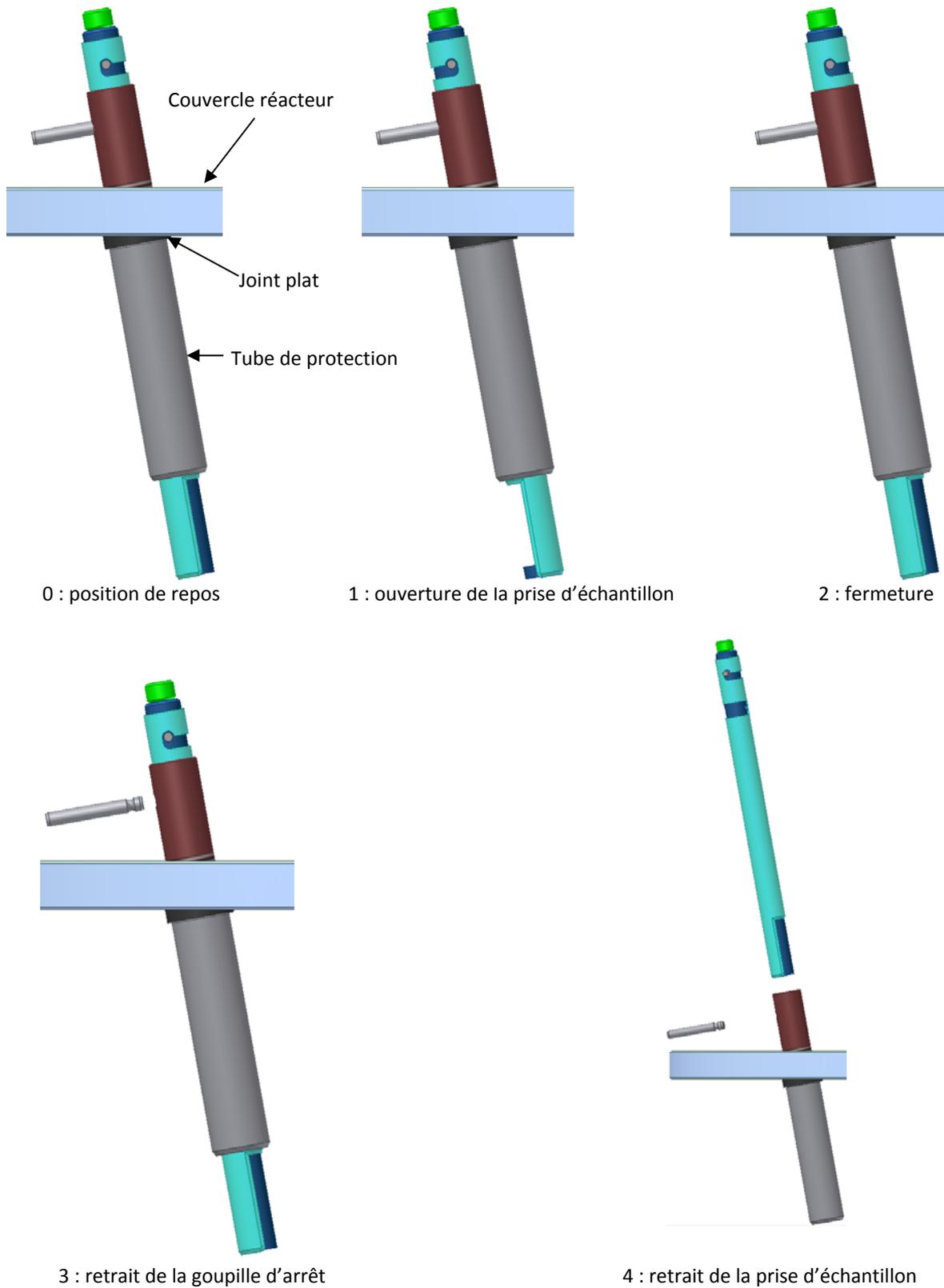


Figure 7.10 : Processus d'utilisation de la prise d'échantillon

### 7.3 BULLEUR

L'humidité au sein de la réaction doit pouvoir être contrôlée. Pour ce faire, deux systèmes d'injections d'eau sont prévus. Le premier est une injection d'eau atomisé directement au dessus du lit de substrat. Le second consiste à utiliser l'air servant de régulateur thermique qui circule au travers du substrat. En effet, en faisant passer le flux d'air au travers d'une hauteur d'eau, celui-ci devient humide. C'est le principe du bulleur que l'on peut observer à la *figure 7.12*.

La quantité d'eau que peut absorber l'air dépend de sa température. Comme en témoigne la *figure 7.11*, plus l'air est chaud, plus il peut contenir d'eau sous forme de vapeur. Mais elle dépend aussi du temps de séjours dans l'eau, ou autrement dit, de la vitesse du flux d'air.

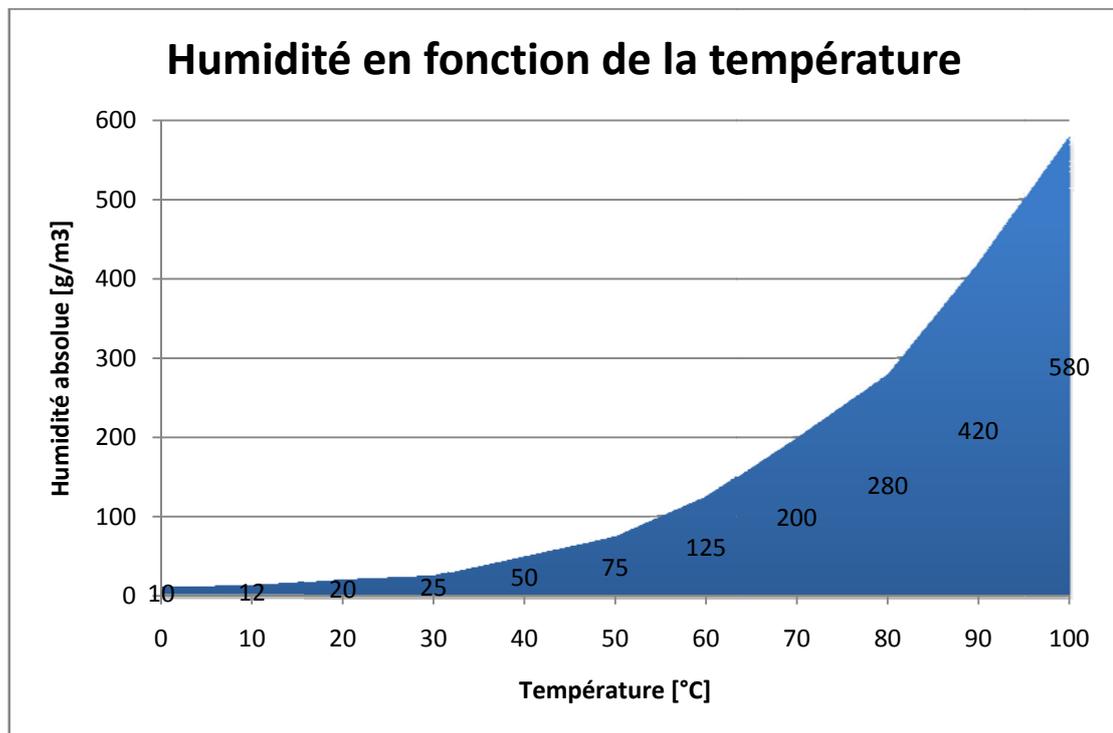


Figure 7.11 : Graphique : humidité en fonction de la température

Le principe de fonctionnement est simple. L'air sec préalablement chauffé par l'échangeur de chaleur entre dans le bulleur. Un tube amène le flux d'air au fond du bulleur et libère le gaz à travers de petits orifices, créant des bulles d'air dans l'eau (comme le sucre d'un aquarium). Le gaz remonte le long du bulleur se chargeant en eau et s'échappe par un orifice de sortie en direction du réacteur.

Ce bulleur construit sur mesure pour l'installation est automatique. C'est à dire que deux capteurs de niveaux détectent la position du liquide et donne l'ordre à une vanne « tout ou rien » de remplir le bulleur suivant la situation. Un robinet est prévu en fond du bulleur afin de le vidanger pour les opérations de nettoyage. Le volume d'eau peut varier entre 1 et 1,7 litre et le flux d'air maximum est de 420 l/min.

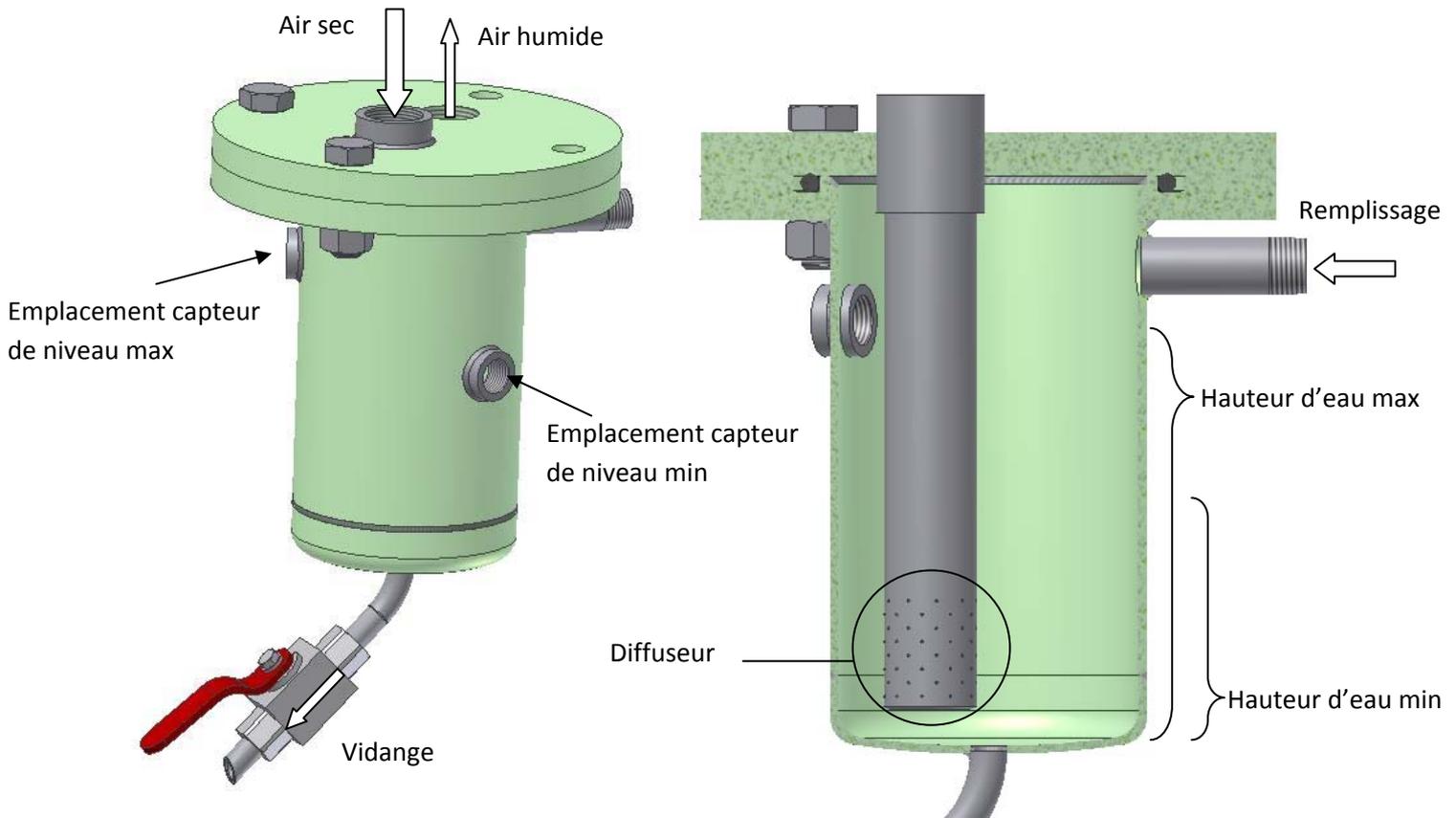


Figure 7.12 : Vues du bulleur

## 7.4 CHÂSSIS

L'installation devant être mobile, le châssis est monté sur quatre roulettes pivotantes dont deux possèdent des freins de blocages. Comme le montre la *figure 7.13*, tous les équipements ont leurs places dédiés. Les supports de tuyauterie sont réalisés à partir de colliers fixés par tige filetées et écrous.

Le châssis principal est réalisé en profilés rectangulaires de 80x40x3.2 mm en acier S355J2H laminé à chaud, et en profilés carrés de 30x30x3 mm du même matériau pour la partie châssis technique. Cet acier n'est pas inoxydable, il est donc fortement conseillé de peindre le châssis une fois soudé. Il est tout de même possible de se faire livrer les profilés sablés et revêtus d'une fine couche de peinture au zinc (antirouille) par l'entreprise *MIAUTON* à Villeneuve, moyennant un surcoût de 4,5.- CHF/m. Ce qui ne dispense pas l'application d'une couche finale de peinture. Cette décision est laissée au mandant et à l'atelier.

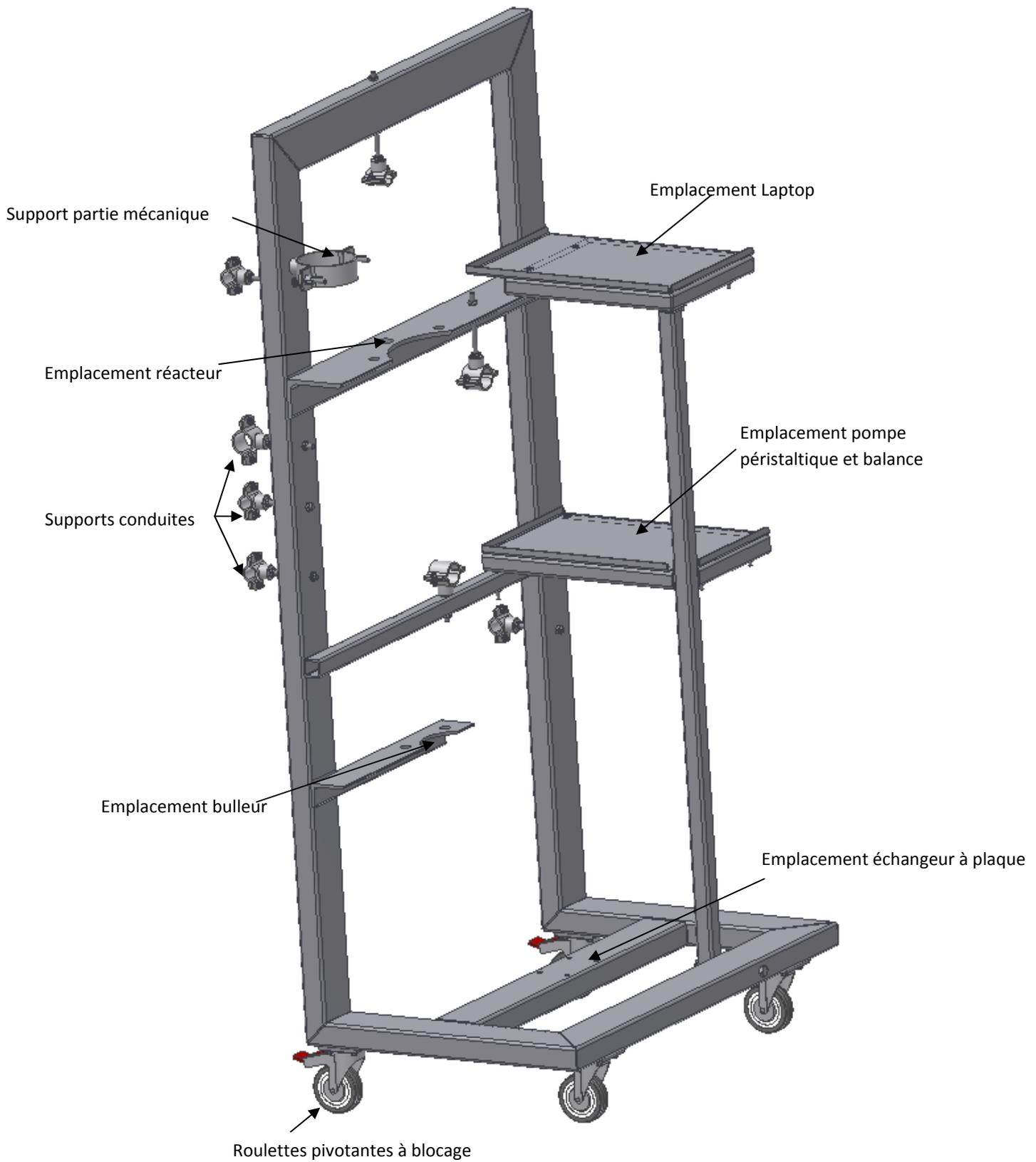


Figure 7.13 : Châssis

### 7.4.1.1 Contrôle de la structure du châssis

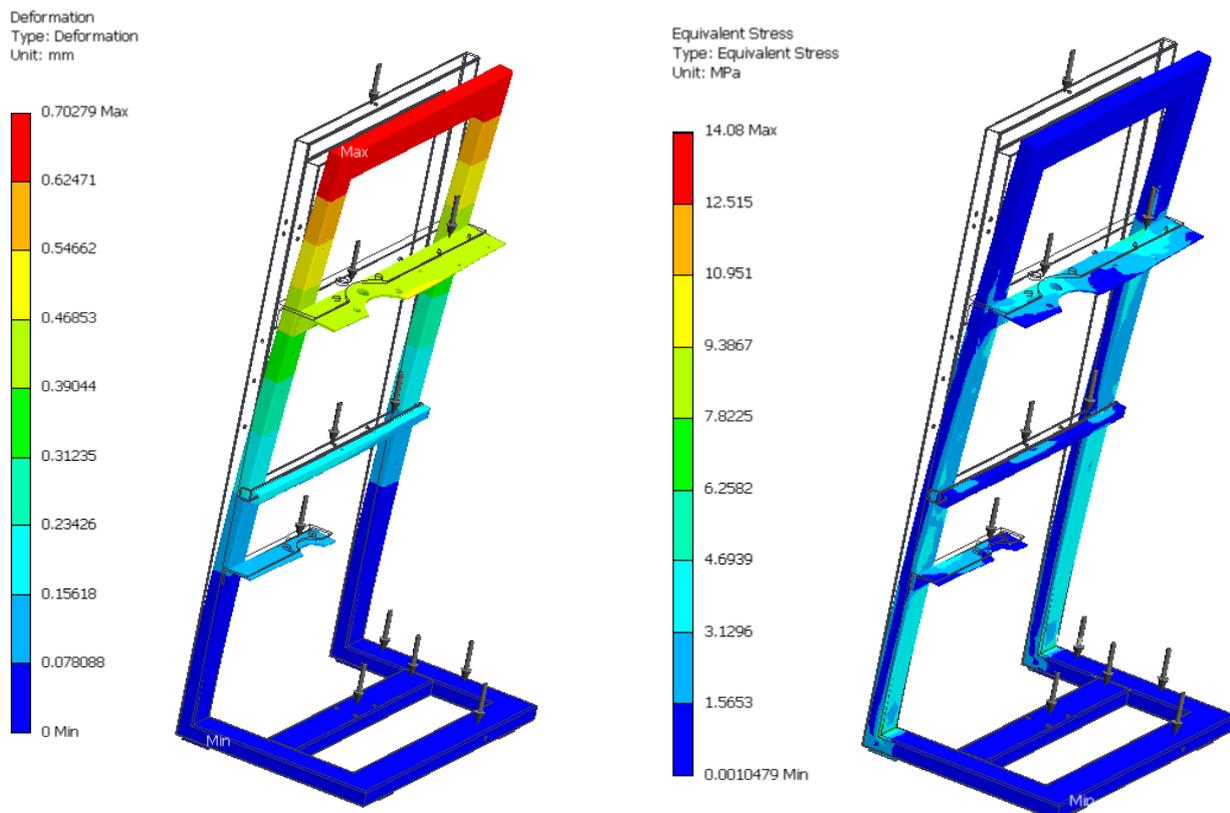
Le tableau ci-dessous (*Tableau 7.14*) indique le poids des éléments de l'installation et de la structure complète :

Eléments	Poids [Kg]
Réacteur	60
Bulleur	10
Châssis	45
Echangeur à plaque	5
Châssis technique et équipements	25
Tuyauterie	90
Autres équipements	75
<b>Poids total</b>	<b>310</b>

*Tableau 7.14* : Poids de l'installation

Chaque roulette peut porter une charge de 80 Kg, soit une charge totale de 320 Kg.

Une étude simplifiée des déformations a été réalisée avec l'aide du module *ANSYS Solution* faisant partie du programme *INVENTOR 2008*. Elle est réalisée à partir des valeurs de poids se trouvant dans le *tableau 7.14*. Les résultats de déformation et les contraintes maximales sont visibles à la *figure 7.15*. Du fait des très bons résultats et du haut coefficient de sécurité calculé (14.7) par le programme, des analyses supplémentaires par calcul manuscrit ne sont pas nécessaire.



*Figure 7.15* : Résultats de l'analyse ANSYS

## 7.5 PERTES DE CHARGE

Un essai en soufflerie a été fait afin de contrôler que la perte de charge à travers le lit de substrat est suffisamment faible pour que la pression d'air comprimé du réseau (6 bars) soit suffisante pour traverser l'installation et le lit de substrat. Ci-dessous la *figure 7.16* montre le test exécuté et le *tableau 7.17* contient les résultats obtenus.

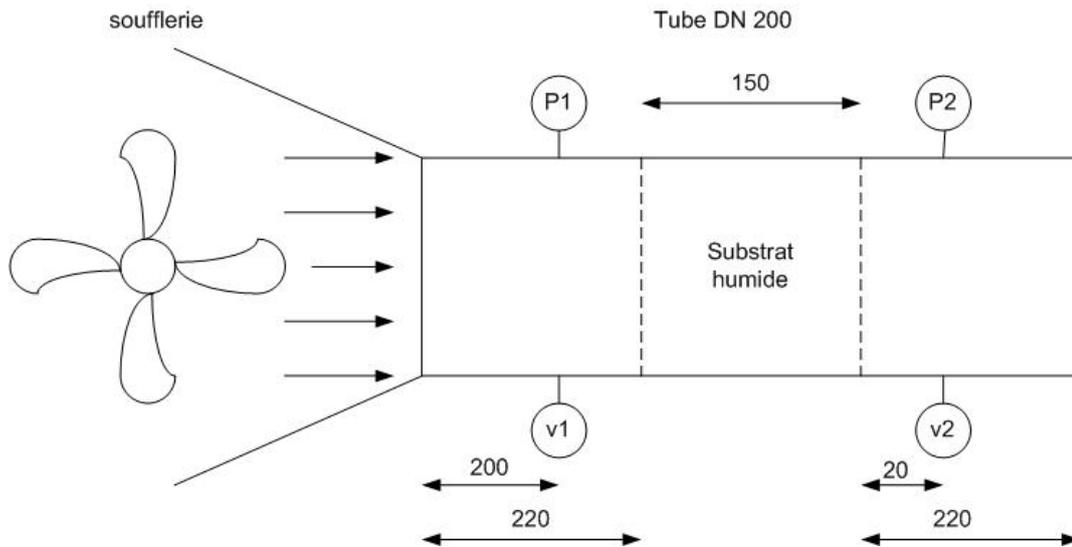


Figure 7.16 : Schéma de l'installation de test pour les pertes de charge dans le substrat

Vitesse		perte [mmH2]	perte [bar]
entrée [m/s]	sortie [m/s]		
1.55	1	57	0.00558979
1.35	0.8	66	0.00647239
1.2	0.8	70	0.00686466
1	0.8	77	0.00755112

Tableau 7.17 : Résultats du test de perte de charge dans le substrat

La perte moyenne est de 6.5 mbars environ. A noter que le matériel de test ne permet pas d'atteindre les vitesses réelles de circulation de l'air dans le substrat, car elles sont trop faible. Dans le cas ou le débit est maximum, la vitesse est 0.025 m/s. On remarque que plus la vitesse d'entrée est faible plus la perte de charge est grande. Par sécurité prenons une perte de charge 0.1 bar.

La perte de charge à travers l'échangeur à plaque est donnée par le fabricant est vaut 0.5 bar.

La perte de charge dans le bulleur est inconnue et difficilement calculable. On prend une valeur de 1 bar comme estimation.

Les pertes dans la tuyauterie les vannes et éléments de mesure vallent approximativement 2 bars

La perte totale s'élève à 3.6 bars. La pression du réseau est donc suffisante pour garantir l'écoulement du flux d'air à travers l'installation.

## 8 AUTOMATION

La régulation des divers systèmes de ce bioréacteur est assurée par un automate programmable *NATIONAL INSTRUMENTS* doté d'un contrôleur intelligent, ceci afin de garantir une parfaite compatibilité avec les autres appareils de fermentations présents dans le laboratoire, autant du point de vue de l'utilisation que du dépannage. Il est doté d'une prise Ethernet qui permet de communiquer avec d'autre appareil de même type ou des ordinateurs se trouvant sur le réseau, ainsi que d'un port série RS232 pour se connecter aux périphériques. Une mémoire SDRAM de 64 Mo lui permet d'enregistrer des données. Sa programmation est simple grâce au logiciel *LabView Real-Time* qui offre une méthode de programmation graphique.

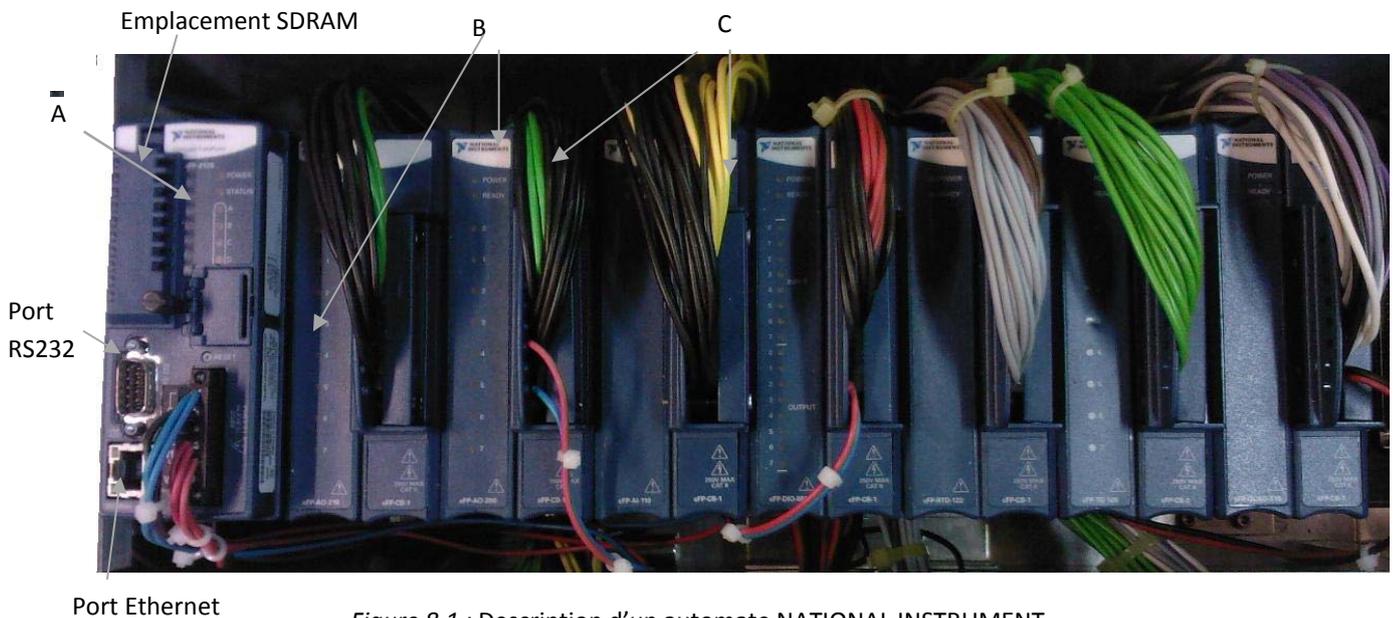


Figure 8.1 : Description d'un automate NATIONAL INSTRUMENT.

A : contrôleur intelligent cFP-2100.

B : diverses cartes d'entrées/sorites de signaux.

C : cartes de raccordement.

### 8.1 COMPOSITION DE L'AUTOMATE

L'automate sélectionné pour ce projet est composé des cartes suivantes :

- |  |             |
|--|-------------|
| • Contrôleur intelligent Field Point   | cFP-2100    |
| • 1x modules de 8 entrées analogiques en tension (0-10V) ou courant (4-20mA) | cFP-AI-110  |
| • 1x module de 8 entrées pour PT100  | cFP-RTD-122 |
| • 1x module de 8 sorites analogiques en tension (0-10V)                      | cFP-AO-210  |
| • 3x carte de raccordement   | cFP-CB-1    |

### 8.2 SCHÉMA DE RACCORDEMENT

Ci-dessous les schémas de raccordement des éléments de mesures de l'installation. *Figure 8.2* : raccordement à la carte cFP-AI-110. *Figure 8.3* : raccordement à la carte cFP-RTD-122. *Figure 8.4* : raccordement cFP-AO-210. Ces schémas se trouvent également dans le dossier technique (*annexe 1*), ainsi que les fichiers techniques des divers capteurs et unités de mesure.

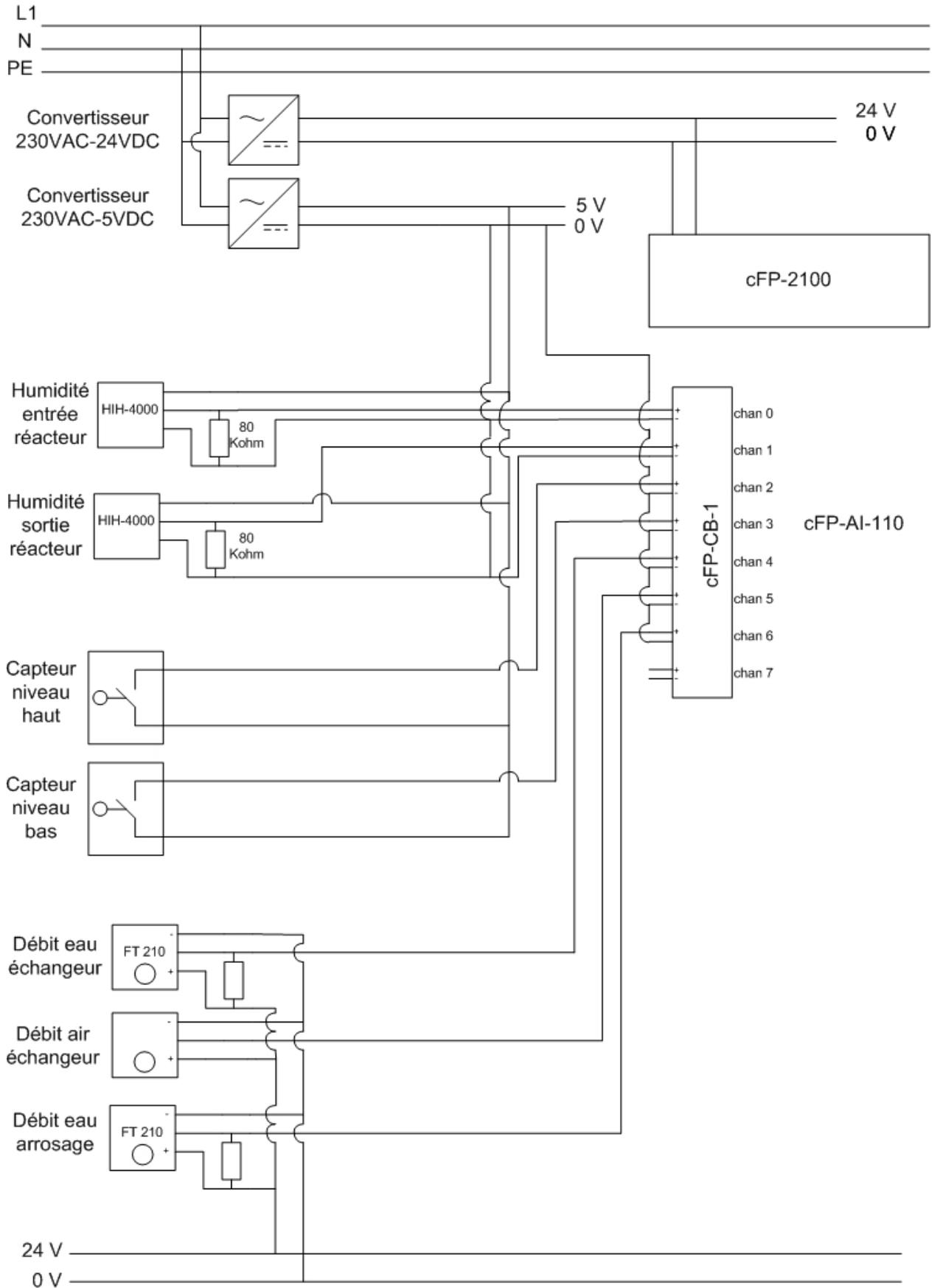


Figure 8.2 : Schéma de raccordement à la carte cFP-AI-110

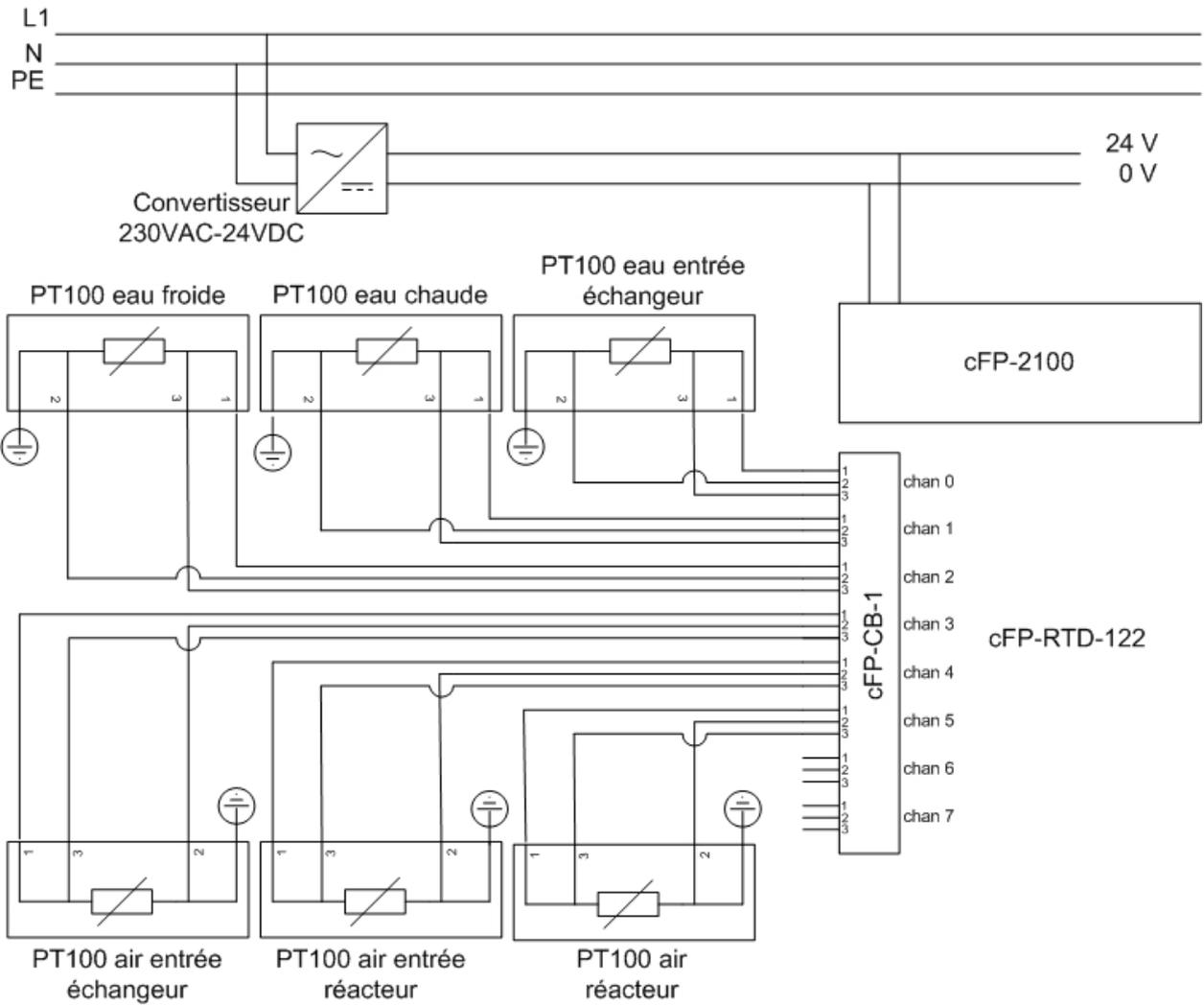


Figure 8.3 : Schéma de raccordement à la carte cFP-RTD-122

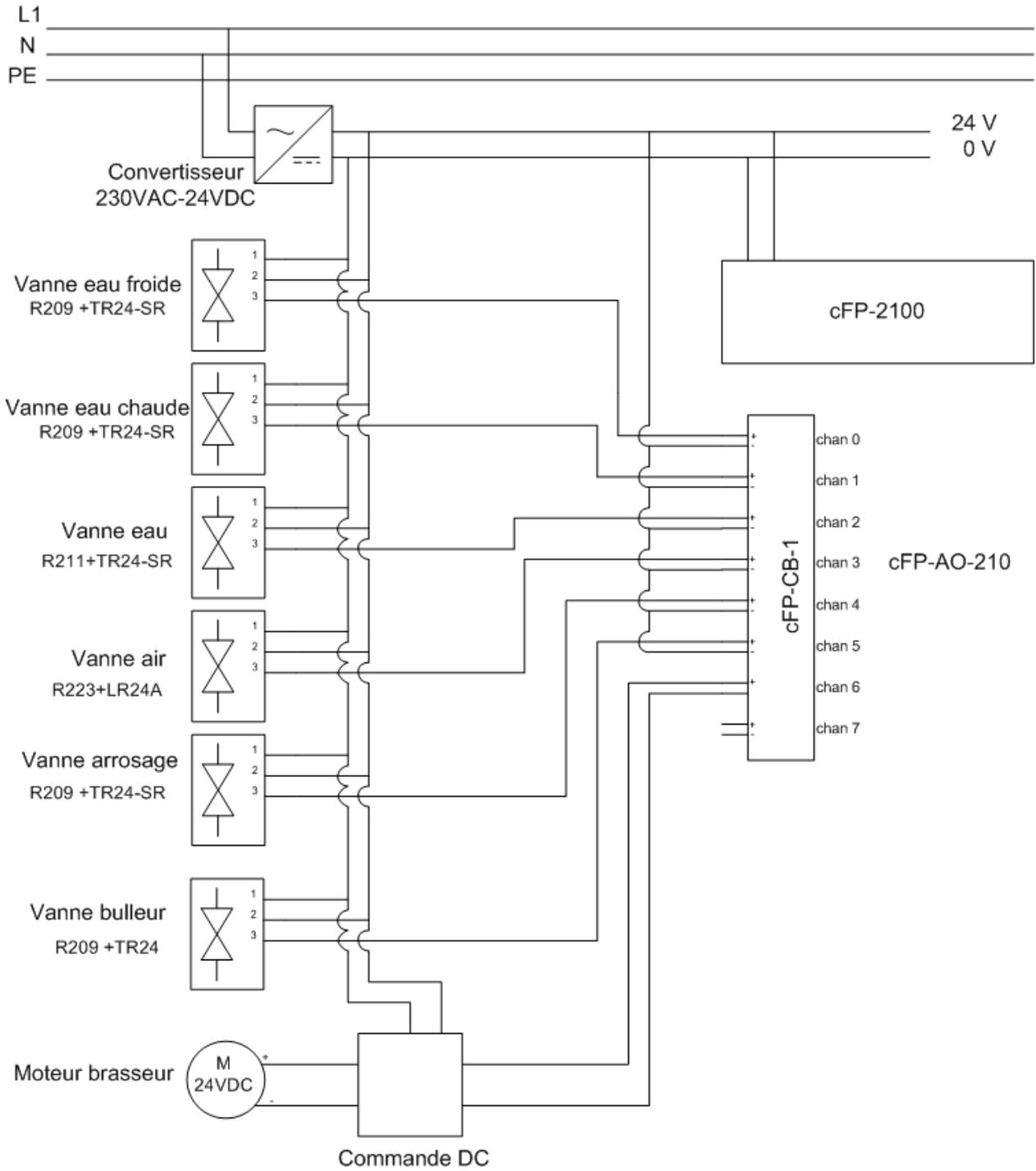


Figure 8.4 : Schéma de raccordement à la carte cFP-AO-210

## 8.3 RÉGULATION

L'aspect régulation des divers systèmes n'a pas pu être abordé dans sa totalité durant la période du travail de diplôme. Cependant une brève description du concept est abordée ici avec les premières équations.

### 8.3.1 REMPLISSAGE DU BULLEUR

La régulation du remplissage du bulleur est simple. Les deux capteurs de niveau agissent sur l'ouverture de la vanne de remplissage selon la logique suivante :

Si le capteur niveau haut et niveau bas sont fermés, alors la vanne s'ouvre

Si le capteur niveau haut est fermé et le capteur niveau bas est ouvert, alors la vanne s'ouvre

Si le capteur niveau haut et niveau bas sont ouverts, alors la vanne se ferme

### 8.3.2 HUMIDIFICATION DE LA MASSE MICROBIENNE

Un régulateur PID agit sur l'ouverture de la vanne d'arrosage en fonction de la consigne entrée par l'utilisateur et de la mesure des deux capteurs d'humidité situé sur l'entrée et la sortie d'air du réacteur.

L'équation suivante tirée de [1] donne la quantité d'eau évaporée du substrat :

$$R_{conv} = G * A_b * (H_{out} - H_{in})$$

Avec :

$R_{conv}$  = Quantité d'eau évaporée [kg/h]

$G$  = Débit spécifique d'air [ $\text{kg}_{\text{air sec}}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ]

$A_b$  = Surface de substrat [ $\text{m}^2$ ]

$H_{out}$  = Humidité en sortie de réacteur [ $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{air}}$ ]

$H_{in}$  = Humidité en entrée de réacteur [ $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{air}}$ ]

Le taux d'eau idéal dans le substrat a été déterminé par expérience. Des échantillons de sciure de bois de différentes masse on été imbibé d'eau jusqu'à saturation. En connaissant la masse de l'eau injectée et la masse d'eau non absorbé, on peut calculer le pourcentage massique d'eau absorbé dans la sciure.

Echantillons			Eau			Mélange	
Numéro	Poids [g]	Volume [l]	injecté [g]	non absorbé [g]	absorbé [g]	Poids total [g]	% masse d'eau [%]
1	50	0.529	150	0	150	200	75.00
2	20	0.212	40	0	40	60	66.67
3	20	0.212	200	113	87	107	81.31
4	10	0.106	100	56	44	54	81.48
5	500	5.291	1500	0	1500	2000	75.00
Moyenne							75.89

Tableau 8.5 : Résultats du test d'absorption d'eau par de la sciure

On obtient une moyenne d'environ 76% massique d'eau dans la sciure pour la concentration idéal (juste avant la saturation).

A partir de cette valeur d'humidité idéale et de l'équation d'eau évaporée, il faut faire des tests sur l'installation afin de trouver la corrélation adéquate qui permettra de régler le PID.

### 8.3.3 TEMPÉRATURE DANS LE RÉACTEUR

Cette régulation se fait en deux temps. Un premier calcul est implémenté en fonction de la consigne de température et des capteurs situés sur l'entrée et la sortie d'air du réacteur. Le résultat crée une nouvelle consigne qui agira sur un PID. C'est ce PID qui réglera le taux d'ouverture des vannes d'eau froide, d'eau chaude, d'entrée d'eau et d'air dans l'échangeur.

Ci-dessous les équations nécessaires à l'établissement des fonctions de transferts :

#### 8.3.3.1 Partie mélangeur eau chaude et froide

$\dot{Q}_{tot}$  = Puissance total [W]

$\rho_e$  = masse volumique de l'eau [kg/m<sup>3</sup>]

$\dot{Q}_f$  = Puissance eau froide [W]

$c_e$  = chaleur massique de l'eau [J/kg\*°K]

$\dot{Q}_c$  = Puissance eau chaude [W]

$\dot{V}_{tot}$  = Débit total [m<sup>3</sup>/s]

$\dot{V}_f$  = Débit eau froide [m<sup>3</sup>/s]

$\dot{V}_c$  = Débit eau chaude [m<sup>3</sup>/s]

$T_{fin}$  = Température final (en entrée de l'échangeur) [°K]

$T_f$  = Température eau froide initial [°K]

$T_c$  = Température eau chaude initial [°K]

Loi des mélanges :

$$\dot{Q}_{tot} = \dot{Q}_f + \dot{Q}_c$$

$$\dot{V}_{tot} * \rho_e * c_e * T_{fin} = \dot{V}_f * \rho_e * c_e * T_f + \dot{V}_c * \rho_e * c_e * T_c \rightarrow \dot{V}_{tot} = \dot{V}_f + \dot{V}_c$$

$$(\dot{V}_c + \dot{V}_f) * T_{fin} = \dot{V}_f * T_f + \dot{V}_c * T_c$$

$$T_{fin} = \frac{\dot{V}_f * T_f + \dot{V}_c * T_c}{\dot{V}_f + \dot{V}_c}$$

### 8.3.3.2 Echangeur de chaleur

$\dot{Q}_e$ =	Puissance de l'eau [W]	$\rho_e$ =	masse volumique de l'eau [kg/m <sup>3</sup> ]
$\dot{Q}_a$ =	Puissance de l'air [W]	$c_e$ =	chaleur massique de l'eau [J/kg*°K]
$\dot{V}_e$ =	Débit d'eau [m <sup>3</sup> /s]	$\rho_a$ =	masse volumique de l'air [kg/m <sup>3</sup> ]
$\dot{V}_a$ =	Débit d'air [m <sup>3</sup> /s]	$c_a$ =	chaleur massique de l'air [J/kg*°K]
$\dot{m}_e$ =	Débit d'eau [kg/s]		
$\dot{m}_c$ =	Puissance d'air [kg/s]		
$T_{a_{fin}}$ =	Température air final (en sortie de l'échangeur) [°K]		
$T_{a_{in}}$ =	Température air initial (en entrée de l'échangeur) [°K]		
$T_{e_{fin}}$ =	Température eau final (en sortie de l'échangeur) [°K]		
$T_{e_{in}}$ =	Température eau initial (en entrée de l'échangeur) [°K]		

$$\dot{Q}_e = \dot{m}_e * c_e * dT$$

$$\dot{Q}_a = \dot{m}_a * c_a * dT$$

$$\dot{Q}_a = \dot{Q}_e$$

$$\dot{m}_a * c_a * dT = \dot{m}_e * c_e * dT$$

$$\dot{V}_a * \rho_a * c_a * (T_{a_{fin}} + T_{a_{in}}) = \dot{V}_e * \rho_e * c_e * (T_{e_{in}} + T_{e_{fin}})$$

$$\dot{V}_a = \frac{\dot{V}_e * \rho_e * c_e * (T_{in_e} + T_{fin_e})}{\rho_a * c_a * (T_{fin_a} + T_{in_a})}$$

*Note: La valeur de température de l'eau en sortie d'échangeur  $T_{e_{fin}}$  est sans importance.*

### 8.3.3.3 Relation entre la température d'entrée et la température de sortie du réacteur de l'air

$\dot{V}_a$ =	Débit d'air [m <sup>3</sup> /s]	$c_a$ =	chaleur massique de l'air [J/kg*°K]
$Flux_{th}$ =	Flux thermique à évacuer [W]		
$T_{in}$ =	Température air entrée réacteur [°K]		
$T_{out}$ =	Température air sortie réacteur [°K]		

$$\dot{V}_a = \frac{Flux_{th}}{c_a * (T_{in} - T_{out})}$$

*Note: La valeur de température de l'air en sortie de réacteur  $T_{out}$  est sans importance.*

### 8.3.3.4 Relation entre les équations

En imbriquant les équations trouvées précédemment les unes dans les autres, on obtient pour la température dans le réacteur (température de consigne) :

$$\frac{Flux_{th}}{c_a * (T_{con} - T_{out})} * \rho_a * c_a * (T_{con} + T_{in}) = (\dot{V}_f + \dot{V}_c) * \rho_e * c_e * \left( \frac{\dot{V}_f * T_f + \dot{V}_c * T_c}{\dot{V}_f + \dot{V}_c} - T_{fin} \right)$$

$$T_{con} = \frac{\left[ (\dot{V}_f + \dot{V}_c) * \rho_e * c_e * \left( \frac{\dot{V}_f * T_f + \dot{V}_c * T_c}{\dot{V}_f + \dot{V}_c} - T_{fin} \right) * T_{out} \right] - (Flux_{th} * \rho_a * T_{in})}{(\dot{V}_f + \dot{V}_c) * \rho_e * c_e * \left( \frac{\dot{V}_f * T_f + \dot{V}_c * T_c}{\dot{V}_f + \dot{V}_c} - T_{fin} \right) - (Flux_{th} * \rho_a * T_{in})}$$

Avec :

$\dot{V}_f$ =	Débit d'eau froide [m <sup>3</sup> /s]	$c_e$ =	chaleur massique de l'eau [J/kg*°K]
$\dot{V}_c$ =	Débit d'eau chaude [m <sup>3</sup> /s]	$\rho_e$ =	masse volumique de l'eau [kg/m <sup>3</sup> ]
$Flux_{th}$ =	Flux thermique à évacuer[W]		
$T_f$ =	Température d'eau froide[°K]		
$T_c$ =	Température d'eau chaude [°K]		
$T_{in}$ =	Température de l'air à l'entrée de l'échangeur [°K]		
$T_{fin}$ =	Température d'eau en sortie de l'échangeur [°K]		
$T_{out}$ =	Température d'air en sortie de réacteur [°K]		
$T_{con}$ =	Température de consigne [°K]		

*Note: La valeur de température de l'eau en sortie de réacteur  $T_{fin}$  est sans importance. La température de consigne  $T_{con}=T_{in}$  dans 8.3.3.3 et  $T_{con} = T_{fin}$  dans 8.3.3.2*

## 8.4 DIMENSIONNEMENT DES CORPS DE VANNES

Le dimensionnement des corps de vannes consiste à choisir les sections de passage adéquate en fonction des débits qui devront circuler à travers. Pour ce faire, on utilise la formule suivante :

$$\dot{V}_{max} = k_v * \sqrt{\frac{\Delta p_{max}}{\rho}}$$

Avec :

$\dot{V}_{max}$ =	Débit maximum [m <sup>3</sup> /h]	$\rho$ =	masse volumique du fluide [kg/dm <sup>3</sup> ]
$k_v$ =	Coefficient caractérisant la section de passage de la vanne [m <sup>3</sup> /h]		
$\Delta p_{max}$ =	Différence de pression maximum admissible (perte de charge) [bar]		

Le site [www.belimo.fr](http://www.belimo.fr) propose un calculateur qui conseille un produit en fonction d'un débit et de la différence de pression. Avec les caractéristiques de débit calculé dans les cas critiques, BELIMO conseille les vannes suivantes :

Vanne d'air (régulation du débit d'air circulant au travers du substrat)	R223
Vanne d'eau chaude	R209
Vanne d'eau froide	R209
Vanne d'eau en entrée d'échangeur	R211
Vanne d'arrosage	R209

## 8.5 INTERFACE

L'interface utilisateur se fait via un Laptop équipé du programme LabView 8.5. Cette interface sert de poste de pilotage de l'installation, ainsi que de moyen de contrôle grâce aux divers retours d'informations sur les grandeurs mesurées. La communication entre le Laptop et l'automate s'exécute par un câble Ethernet. L'interface est composée de 3 panneaux différents dont la description figure dans les chapitres suivant. Il s'agit de *l'interface de contrôle*, du *Real Time Trend* et de *l'Historical Trend*.

### 8.5.1 INTERFACE DE CONTRÔLE

Il s'agit du panneau principal. Sa fonction est de transmettre à l'automate les consignes du processus et de retourner à l'utilisateur divers affichages de contrôle. La *figure 8.6* est une photo de cette interface dont la description des fonctionnalités figure ci-dessous :

De manière générale, il faut noter que les valeurs apparaissant en violet sont des consignes alors que les valeurs vertes sont des indicateurs. L'interface est composée d'un dessin du réacteur et de ses entrées et sorties. On peut lire directement sur les indicateurs se trouvant sur les conduites les valeurs de température, d'humidité et de débit d'eau et d'air à différents endroits de l'installation. On peut également lire la position des vannes : les vannes rouge sont fermées et les vertes sont ouvertes. Des indicateurs situés à côté de chaque vanne indiquent de manière plus précise l'état d'ouverture en %.

On distingue 4 zones composées de boutons et d'éléments de contrôle :

1. Zone Process : permet de modifier les consignes de température et d'humidité à l'intérieure du réacteur, de déterminer la durée du process et de démarrer l'installation via le bouton *RUN*. La barre *Time progress* est un retour d'information sur le temps restant et la zone *Process states* permet de contrôler le bon déroulement du process.
2. Zone Agitator panel : permet d'agir sur la vitesse de rotation du brasseur ainsi que sur son temps de fonctionnement et de pause. Le bouton *Update* est utilisé pour valider les changements de consignes en cours de process. Un voyant lumineux (*Rotation*) indique que le brasseur tourne.
3. Zone Nutriment injection : sert uniquement d'indication quand à l'état de fonctionnement d'une pompe péristaltique grâce au voyant *Pumping*, ainsi que pour la quantité en gramme de liquide restant dans le becher.
4. Zone External controls : regroupe une série de contrôle qui permettent une exploitation manuel d'une partie de l'installation.

- **Motor** : le bouton permet de forcer l'arrêt du brasseur afin de pouvoir procéder à des prises d'échantillons ou des sondages de température manuelle au sein du substrat.
- **Air flow** : le bouton permet le passage en mode manuelle (MAN) qui court-circuite le système de régulation et permet d'imposer un certain débit d'air à une certaine température à l'intérieur du réacteur.
- **Watering** : le bouton permet de mettre la fonction d'arrosage d'eau en manuelle. Son activation court-circuite également la partie du système de régulation qui gère l'humidité dans le réacteur. On peut ainsi choisir un débit d'eau à injecter avec le contrôle se trouvant au-dessous.
- **Bubbler** : c'est un retour d'information sur l'état du bulleur. Il est automatique et ne peut pas être mis en mode manuelle. *Full* indique que le niveau d'eau est maximum. *Filling* indique qu'il est en train d'être rempli et *Empty* indique qu'il est vide.
- **Injection** : le bouton permet de contrôler manuellement l'injection de nutriments à l'intérieur du réacteur en réglant un débit avec l'indicateur se trouvant en dessous.

Les deux boutons en haut à droite de l'interface servent à appeler les 2 autres panneaux, soit le *Real Time Trend* et l'*Historical Trend*.

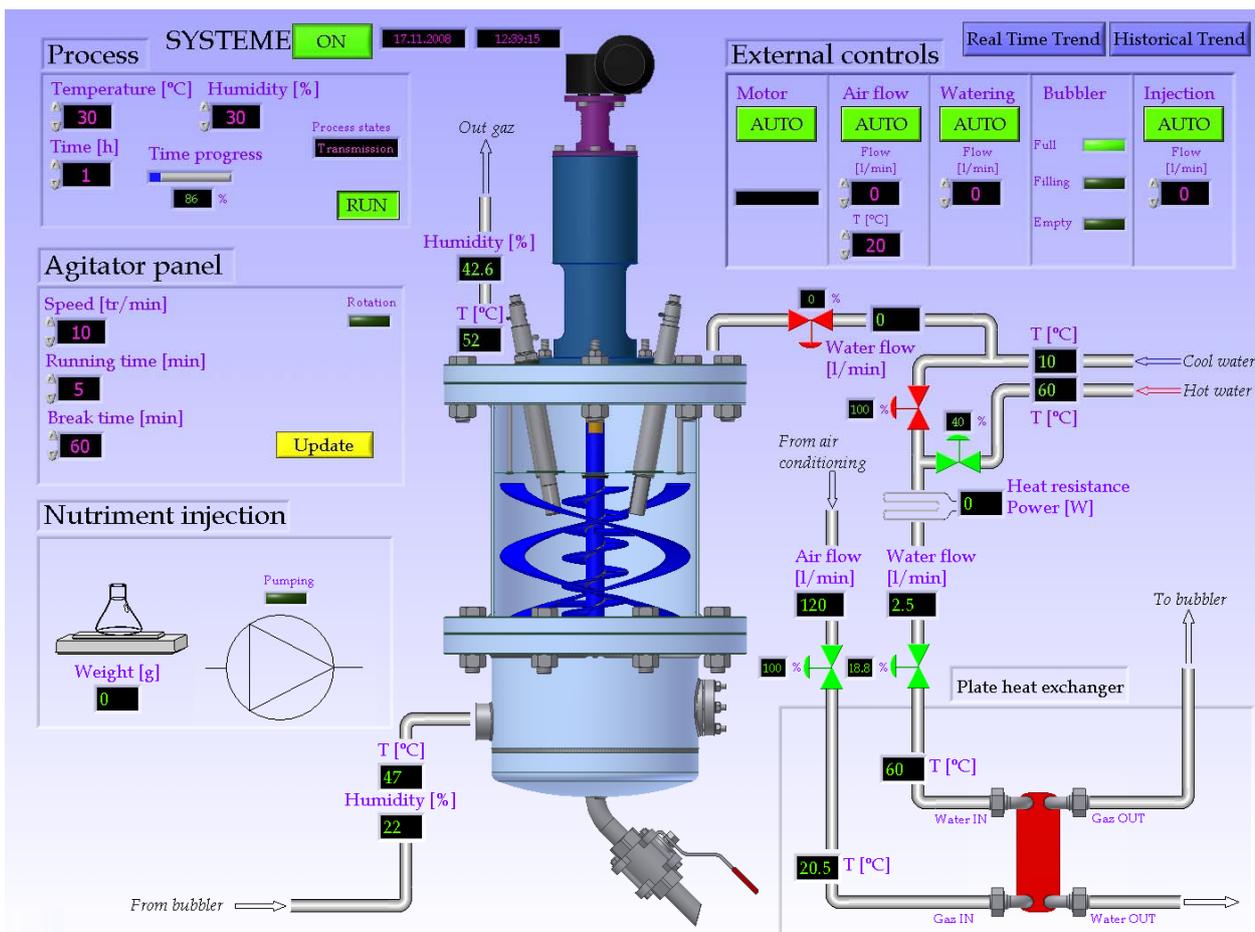


Figure 8.6: Interface de contrôle

### 8.5.2 REAL TIME TREND

Ce panneau se compose d'un graphique sur lequel on peut lire en temps réel sur les 30 dernières minutes de cycle toutes les valeurs de températures, d'humidités, de débits et de puissance. Une liste de variable (*Variable List*) permet de choisir les courbes à afficher sur le graphique. Ainsi l'utilisateur peut choisir d'afficher ou non une ou plusieurs des 17 variables à disposition en double cliquant sur le nom de la variable (*figure 8.7*).

Le panneau nommé *Real Time Value* permet une lecture plus facile des données. En effet, le graphique est accompagné de 2 curseurs déplaçables par l'utilisateur. Le tableau reprend dans les colonnes une et deux les valeurs instantanées à l'emplacement des curseurs. On peut donc retrouver de manière simple quelle était la température dans le réacteur à une heure précise. La troisième colonne du tableau est la valeur actuelle.

Sous le graphique à gauche une légende indique quelles courbes correspondent à quelles variables.

Le bouton *Return to control panel* en haut à droite permet de revenir à l'interface de contrôle.

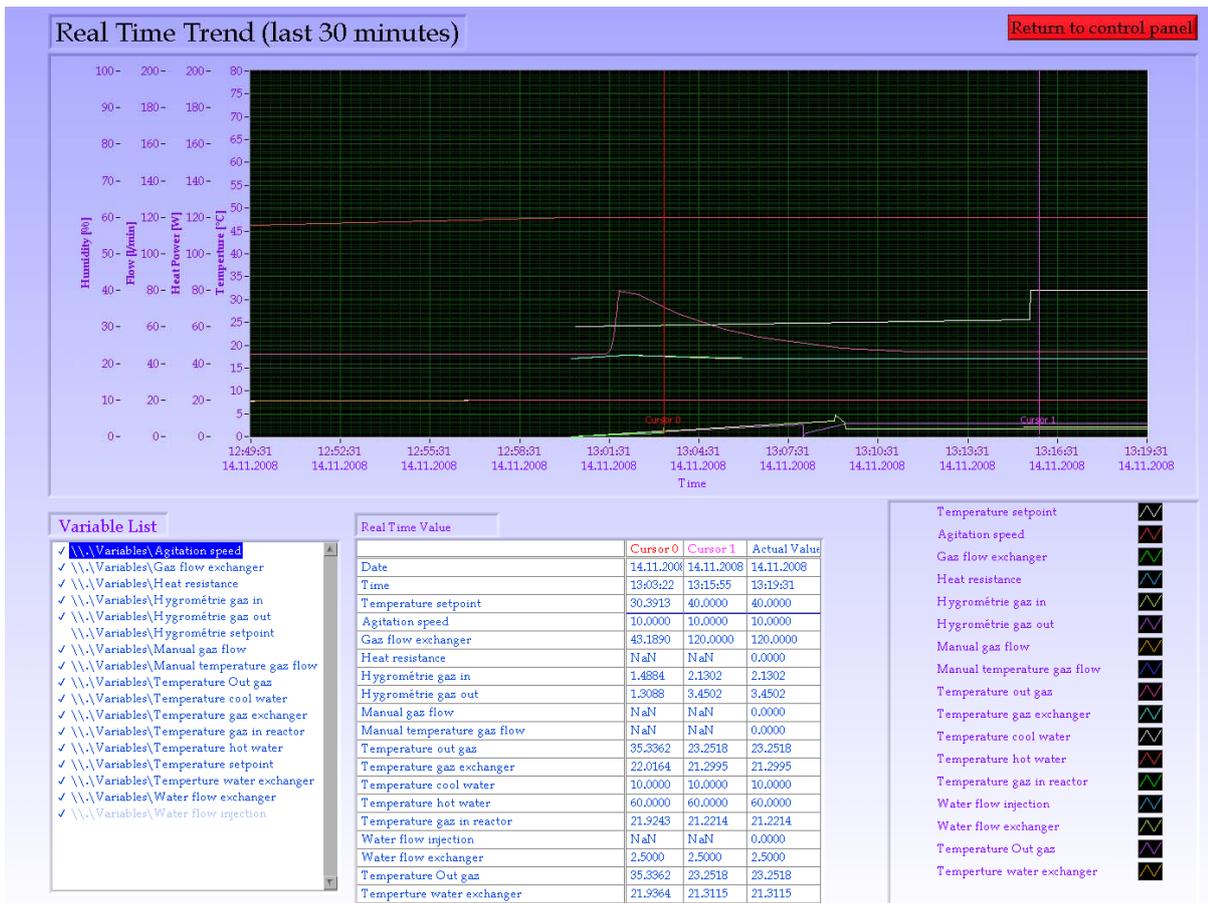


Figure 8.7: Panneau Real Time Trend

### 8.5.3 HISTORICAL TREND

Ce panneau possède les mêmes fonctions que le panneau *Real Time Trend*. La différence réside dans le fait que se graphique n'est pas en temps réel. Le bouton *Display Length* permet à l'utilisateur de choisir l'échelle de temps. Ainsi il peut consulter les courbes des variables d'il y a 1 minutes, 5 minutes, plusieurs heures ou même plusieurs semaines, mois ou années. Une fois le choix de l'échelle de temps et des variables fait, le bouton *Display Historical Data* va mettre à jour le graphique et afficher les courbes demandées (figure 8.8).

Au fond du panneau, des options d'enregistrement sont à disposition. On peut choisir le nom du fichier de destination ainsi que l'intervalle de temps que l'on désire entre chaque point de mesure. Le bouton *Export to Excel File* enregistre ensuite dans un fichier Excel les valeurs demandées dans l'intervalle de mesure choisi.

Le bouton *Return to control panel* en haut à droite permet de revenir à l'interface de contrôle.

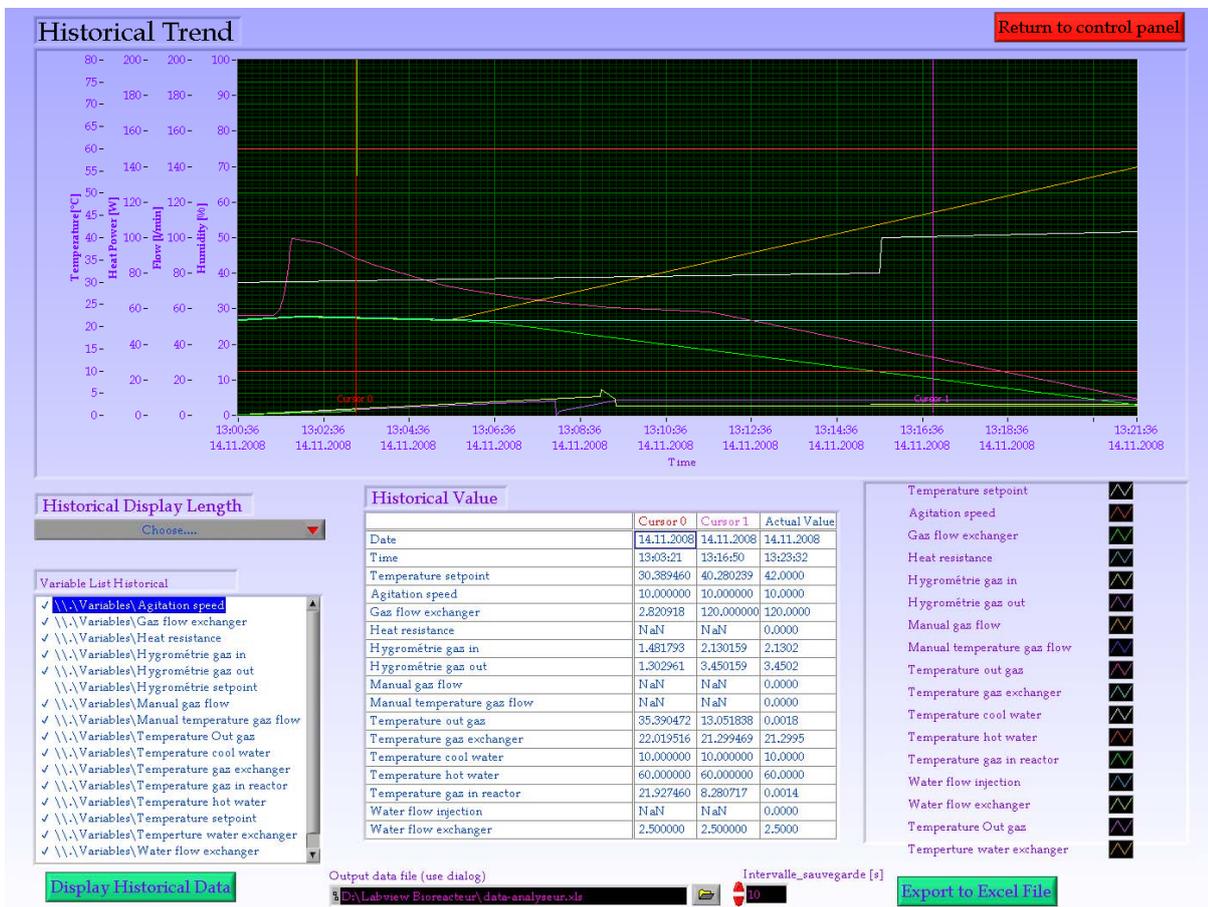


Figure 8.8: Panneau *Historical Trend*

## 9 COMPOSANTS ET FOURNISSEURS

Voici une liste exhaustive de tous les composants nécessaires à la réalisation de l'installation et de leurs fournisseurs.

Eléments	Prix/unité [CHF]	Nbre	Prix [CHF]	Fournisseurs	N° Article
Fond bombé brut DN200 219.1x3 DIN 28011	63.00	1	63.00	Sauter Edelstahl	6135RKP
Fond bombé brut DN100 114.3x3 DIN28011	18.30	1	18.30	Sauter Edelstahl	6135RKP
Bride pleine DN 200 PN6 DIN 2527	320.00	2	640.00	Sauter Edelstahl	6235B6
Bride DN 200 PN6 DIN 2573	170.00	2	340.00	Sauter Edelstahl	6235G6
Bride pleine DN100 PN6 DIN2527	115.00	1	115.00	Sauter Edelstahl	6235B6
Bride DN 100 PN6 DIN 2573	72.00	1	72.00	Sauter Edelstahl	6235G6
Corps DN200 (219x3)	162.33	0.255	42.00	Sauter Edelstahl	
Corps DN200 (219x3)	162.33	0.12	19.50	Sauter Edelstahl	
Corps DN 100 (114.3x2.9)	81.00	0.18	14.60	Sauter Edelstahl	
Tube inox Ø16-2	7.00	0.29	2.00	Sauter Edelstahl	
O'Ring EPDM 234.3x6.99	13.70	2	27.40	Angst & Pfister	11.4020.7043
O'Ring EPDM 17.17 x1.78	4.30	2	8.60	Angst & Pfister	11.4020.1820
O'Ring EPDM 123.2x6.99	13.70	1	13.70	Angst & Pfister	11.4020.7009
O'Ring EPDM 9.92x2.62	4.30	2	8.60	Angst & Pfister	11.4020.2612
V'Ring Ø20 FKM	10.00	1	10.00	Angst & Pfister	11.5216.002
Filtres modulaires standard 5um	54.06	1	54.05	Festo	162614
Mano-Détendeur-filtre 1"	100.00	1	100.00	Festo	162725
Rotex GS14 AL-H 10	20.00	1	20.00	KTR	
Rotex GS14 AL-H 16	20.00	1	20.00	KTR	
Rotex GS14 64Shore D-H-GS	10.00	1	10.00	KTR	
KTR105 14/26mm	55.00	1	55.00	KTR	
Roulement 6007 2RS1	33.15	1	33.15	SKF	
Roulement 6305 2RS1	33.65	1	33.65	SKF	
Rondelle ondulées 61.5/50,5	4.50	1	4.50	Ligne-appro	RO-06150-05050-050
Grille inférieure	100.00	1	100.00	Saulas	
Grille supérieure	140.00	1	140.00	Saulas	
Soupape de sécurité	100.00	1	100.00	Franz gysi ag	916015
Roulettes pivotante avec blocage (75x23x2) 60x60	34.70	2	69.40	Miauton	68.7052.0075
Roulettes pivotante (75x23*2)60x60	27.90	2	55.80	Miauton	68.7050.0075
Manchon 1" DIN 2986	6.50	2	13.00	Sauter Edelstahl	6001L
Demi-manchon 1/2" DIN2986	2.40	2	4.80	Sauter Edelstahl	6025L
Mamelon à souder 1"x200mm DIN2982	15.50	1	15.50	Sauter Edelstahl	6004
Mamelon à souder 1" 80 mm DIN 2982	7.40	2	14.80	Sauter Edelstahl	6004

Mamelon à souder 1" 60 mm DIN 2983	6.00	10	60.00	Sauter Edelstahl	6004
Mamelon à souder 1/2" 60mm DIN 2980	4.10	2	8.20	Sauter Edelstahl	6004
Mamelon à souder 1/2" 50 mm DIN 2982	3.90	1	3.90	Sauter Edelstahl	6004
Mamelon à souder 1/2" 35 mm DIN 2982	2.70	9	24.30	Sauter Edelstahl	6004
Mamelon à souder 1/4" 60 mm DIN 2982	3.40	1	3.40	Sauter Edelstahl	6004
Mamelon à souder 1/4" 40mm DIN2982	3.00	1	3.00	Sauter Edelstahl	6004
Mamelon à souder 1/4" 30 mm DIN2982	2.60	2	5.20	Sauter Edelstahl	6004
Mamelon double 1" 80mm	8.20	1	8.20	Sauter Edelstahl	6003
Mamelon double 1" 60 mm DIN 2982	6.40	2	12.80	Sauter Edelstahl	6003
Mamelon double 1/2" 60mm DIN 2982	3.50	5	17.50	Sauter Edelstahl	6003
Mamelon double 1/4" 40 mm DIN2982	2.90	4	11.60	Sauter Edelstahl	6003
Mamelon à tuyau 1/4"-6mm	9.00	1	9.00	Sauter Edelstahl	6036
Manchon de réduction 1/2"-1/4"	9.20	1	9.20	Sauter Edelstahl	6018A
Mamelon hexagonal de réduction mâle/fem 1"-1/2" DIN2990	14.00	3	42.00	Sauter Edelstahl	6017A
Mamelon hexagonal. De réduction 1/2"-1/4" DIN 2990	7.60	4	30.40	Sauter Edelstahl	6017A
Coudes 3d 45° 1/2" DIN 2605	5.00	1	5.00	Sauter Edelstahl	61353AG
Coudes 3d 45° 1/4" DIN 2605	8.50	1	8.50	Sauter Edelstahl	61353AN
Coude 3d 90° 33.7x2 DIN 2605	6.70	6	40.20	Sauter Edelstahl	61353AG
Coude 3d 90° 21.3x2 DIN 2605	5.00	11	55.00	Sauter Edelstahl	61353AG
Coude 3d 90° 13.5x2.3 DIN2605	8.50	1	8.50	Sauter Edelstahl	61353AG
Coude 90° filt fem/mâle 1" DIN2987	17.00	2	34.00	Sauter Edelstahl	6047
Coude 90° filt fem/mâle 1/2" DIN2987	8.00	1	8.00	Sauter Edelstahl	6047
Coude 90° à filt mâle/fem 1/4" DIN2987	6.30	1	6.30	Sauter Edelstahl	6047
Té 1" DIN 2987	24.00	4	96.00	Sauter Edelstahl	6006
Té 1/2" DIN 2987	9.90	5	49.50	Sauter Edelstahl	6006
Té 1/4" DIN 2987	5.30	1	5.30	Sauter Edelstahl	6006
Té embouti égal 21.3x2 DIN2615	21.00	4	84.00	Sauter Edelstahl	6135TG
Bouchon mâle à tête hexagonale 1"	11.50	1	11.50	Sauter Edelstahl	6016SO
Bouchon mâle à tête hexagonale 1/2"	4.80	1	4.80	Sauter Edelstahl	6016SO
Réduction concentrique 33.7-21.3	12.00	9	108.00	Sauter Edelstahl	6104RKK
Conduite inox 1/2" 21.3x2	9.70	3.2	31.05	Sauter Edelstahl	
Conduite inox 1" 33.7x2	15.88	0.8	12.70	Sauter Edelstahl	
Raccord Laitier DN 25	39.00	4	156.00	Angst et pfister	06.5023.1925
Raccord 3p mâle/ext à souder à joint plat 1"	67.00	4	268.00	Sauter Edelstahl	6030FA

Raccord 3p mâle/ext. à souder à joint plat 1/2"	39.90	9	359.10	Sauter Edelstahl	6030FA
Raccord 3p fem/ ext à souder à joint plat 1/2"	22.70	1	22.70	Sauter Edelstahl	6056FA
Raccord 3p fem/ ext à souder à joint plat 1/4"	17.15	1	17.15	Sauter Edelstahl	6056FA
Raccord 3p à souder à joint plat 1/2"	18.80	8	150.40	Sauter Edelstahl	6028FA
Raccord 3p mâle/fem à joint plat 1/2"	27.00	1	27.00	Sauter Edelstahl	6026FA
Raccord 3p mâle/fem à joint plat 1/4"	21.00	1	21.00	Sauter Edelstahl	6026FA
Disque sans trou Ø33x3 mm	1.70	3	5.10	Sauter Edelstahl	6301RG
Soupape anti retour 1/2"	66.00	1	66.00	Sauter Edelstahl	6059
Clapet anti-retour 1/4"	96.00	1	96.00	Ozone.ch	62-101
Buse DURO 0.8	50.00	1	50.00	Birchmeier	
Porte buse simple avec coude	50.00	1	50.00	Birchmeier	
Colliers avec manchon ISO 32-35 M8	8.90	3	26.70	Sauter Edelstahl	65ROGM
Colliers avec manchon ISO 88-90 M10	24.10	1	24.10	Sauter Edelstahl	65RMGM
Colliers avec manchon ISO 20-23 M8	8.50	5	42.50	Sauter Edelstahl	65ROGM
Robinet à boule 1/4" DIN 2999 ISO7/1	29.00	1	29.00	Sauter Edelstahl	6051
Robinet à boule 1/2" DIN 2999 ISO7/1	33.00	1	33.00	Sauter Edelstahl	6051
Vanne à boisseau 2 voies à visser R211+TR24-SR	267.00	1	267.00		
Vanne à boisseau 2 voies à visser R209+TR24-SR	267.00	3	801.00		
Vanne à boisseau 2 voies à visser R223+LR24A-SR	341.00	1	341.00		
Vanne à boisseau 2 voies à visser R209+TR24	225.00	1	225.00		
Visserie	100.00	1	100.00	SFS	
Profilé Carré 80x40x3.2 S335J2H EN10210	35.10	6.24	219.00	Miauton	
Profilé Carré 30x30x3 S335J2H EN10210	15.00	3.97	59.55	Miauton	
Cornière 100x75x9 S235JRG2 EN10025	32.00	0.8	25.60	Miauton	
Cornière 60x40x5 S235JRG2 EN10025	10.55	0.4	4.20	Miauton	
Plaque acier étirer a froid 400x275x2	20.00	2	40.00	Miauton	
Acier Plat 50x4	4.50	0.12	0.55	Miauton	
Acier Plat 70x4	6.80	0.12	0.85	Miauton	
Acier plat 70x6	9.50	0.28	2.65	Miauton	
Acier Plat 120x4	11.70	0.13	1.50	Miauton	
Sonde T° PT100 enfichable	77.00	6	462.00	Distrelec	241494
Capteur de niveau à flotteur LS-7 type 5	32.40	2	64.80	Distrelec	241602

Débitmètre 1" 15 à 225 l/min	214.20	1	214.20	Distrelec	241608
Débitmètre 1/4" 0.1 à 2.5l/min	120.00	2	240.00	Distrelec	241611(FT 210)
Capteur d'humidité	55	2	110	Distrelec	240583
Manomètre	70.00	1	70.00	Angst et pfister	03.4203.1602
Système de chauffage en passant	100.00	1	100.00	Scientax	
Echangeur à plaques	311.00	1	311.00	Coolson	GPL1-10
Moteur/réducteur 30W	50.00	1	50.00	Angst et pfister	09 1540 1006
Commande DC MR-5-30	130.00	1	130.00	Angst et pfister	09 1560 2402
Contrôleur Field Point	2'199.00	1	2'199.00	National Instruments	cFP-2100
Module d'entrée analogique ten/cour 8x	699.00	1	699.00	National Instruments	cFP-AI-110
Module de température RTD 3 fils	749.00	1	749.00	National Instruments	cFP-RTD-122
Accessoires de connections	249.00	3	747.00	National Instruments	cFP-CB-1
Module sortie ana tension 8x	899.00	1	899.00	National Instruments	cFP-AO-210
Convertisseur 230 VAC-24VDC 1A	70.00	1	70.00	Distrelec	360614
Convertisseur 230 VAC-5 VDC 0.4A	90	1	90	Distrelec	360002

Total	<b>13'792.10</b>
-------	------------------

Les coordonnées des fournisseurs se trouvent dans le dossier technique (*annexe 1*).

## 10 PRIX

Le prix de revient de l'installation est d'environ 30'000 CHF, matériels, usinage et soudage compris. La construction n'ayant pu être réalisée durant la durée du travail de diplôme, il faut ajouter 10 à 15'000 CHF de frais pour le montage, le câblage, la régulation et les tests. Travaux qui seront exécutés par les collaborateurs de l'école. Le *Tableau 10.1* ci-dessous résume la situation.

	Coûts [CHF]
Matériels	13'800.00
Frais fournisseurs (coupe, livraison, ...)	200.00
Usinage	13'000.00
Réserve (environ 10%)	3'000.00
Montage, câblage, régulation, test (travaille hors TD)	10-15'000.00
<b>Coût total</b>	<b>40-45'000.00</b>

*Tableau 10.1: Résumé des coûts de l'installation*

## 11 CONCLUSIONS

Au terme de cette étude qui ce veut aussi complète que possible, des solutions techniques répondants au cahier des charges, établi en collaboration avec le mandant, débouche sur un prototype de bioréacteur pour fermentation sur substrat solide. Un dossier technique contenant les plans de fabrication, de câblage et une partie de l'automatisation permet une réalisation future de l'installation. Le coût de réalisation est estimé à 40-45'000 CHF, phase de test et mise en route comprise.

Ce prototype sort des sentiers battus de part son système de maintien de la température par aération forcée. La totalité des modèles de bioréacteur pour fermentation sur substrat solide vus durant l'étude préliminaire, étant équipé d'un double manteau pour effectuer cette tâche. L'avantage de cette solution est notamment économique : l'aération forcée étant obligatoire pour l'oxygénation des micro-organismes, et la stérilisation pouvant se faire dans un autoclave, les coûts supplémentaires engendré par un double manteau et l'équipement que cela implique, ne sont pas justifiable.

La régulation doit également être terminée. Bien que l'interface utilisateur et les protocoles de communications entres le Laptop et l'automate fonctionnent, il est très difficile de continuer la logique de régulation sans avoir la machine sous la main.

L'étape suivante consistera à construire l'installation, et, comme mentionné précédemment, à terminer simultanément la régulation.

## 12 TABLES DES ANNEXES

Dossier Technique

Annexe 1

## 13 TABLES DES ILLUSTRATIONS

Figure 1.1 :	Photo d'un <i>Aspergillus sojae</i> servant à l'élaboration de la sauce soja	5
Figure 3.1 :	Photo d'une culture de champignons filamenteux dans un bocal étanche	7
Figure 3.2 :	Liaisons entre les champignons et le substrat	7
Figure 4.1 :	Classification des bioréacteurs	10
Figure 4.2 :	Bioréacteur à plateaux (1 <sup>er</sup> groupe)	11
Figure 4.3 :	Bioréacteur à lit dense (2 <sup>ème</sup> groupe)	12
Figure 4.4 :	Bioréacteur à tambour (3 <sup>ème</sup> groupe)	13
Figure 4.5 :	Bioréacteur à agitation forcée et agitation (4 <sup>ème</sup> groupe)	14
Figure 4.6 :	Photo du bioréacteur <i>TERRAFORS</i> de la maison <i>INOFRS HT</i>	15
Figure 4.7 :	Photo du bioréacteur <i>FUNGTRIX</i> de la maison <i>Bioreact GmbH</i>	16
Figure 4.8 :	Photo du bioréacteur <i>AIRMIX</i> de la maison <i>Bioreact GmbH</i>	17
Tableau 6.1 :	Caractéristiques du substrat	20
Tableau 6.2 :	Caractéristiques de l'air	21
Tableau 6.3 :	Caractéristiques de la cuve et de l'acier	21

Tableau 6.4 :	Caractéristiques de la réaction	21
Figure 6.5 :	Schéma de calcul pour la puissance thermique transmise au substrat	24
Figure 7.1 :	Schéma de principe de l'installation	27
Figure 7.2 :	Vues d'ensemble du bioréacteur et de ses équipements montés sur châssis	28
Figure 7.3 :	Vues du bioréacteur	30
Figure 7.4 :	Vue du bioréacteur en transparence	31
Figure 7.5 :	Distributeur d'air	32
Figure 7.6 :	Brasseur à double hélices inverses	33
Figure 7.7 :	Vues de la partie moteur et transmission du couple	37
Figure 7.8 :	Presse étoupe	38
Figure 7.9 :	Prise d'échantillon en coupe	39
Figure 7.10 :	Processus d'utilisation de la prise d'échantillon	40
Figure 7.11 :	Graphique : humidité dans l'air en fonction de la température	41
Figure 7.12 :	Vues du bulleur	42
Figure 7.13 :	Châssis	43
Tableau 7.14 :	Poids de l'installation	44
Figure 7.15 :	Résultats de l'analyse ANSYS sur le châssis	44
Figure 7.16 :	Schéma de l'installation de test pour les pertes de charge dans le substrat	45
Tableau 7.17 :	Résultats du test de perte de charge dans le substrat	45
Figure 8.1 :	Description d'un automate <i>NATIONAL INSTRUMENT</i>	46
Figure 8.2 :	Schéma de raccordement à la carte cFP-AI-110	47
Figure 8.3 :	Schéma de raccordement à la carte cFP-RTD-122	48
Figure 8.4 :	Schéma de raccordement à la carte cFP-AO-210	49
Tableau 8.5 :	Résultats du test d'absorption d'eau par la sciure	50
Figure 8.6 :	Interface de contrôle	55
Figure 8.7 :	Panneau <i>Real Time Trend</i>	56
Figure 8.8 :	Panneau <i>Historical Trend</i>	57
Tableau 10.1 :	Résumé des coûts de l'installation	61

## 14 REFERENCES

- [1] Solid-State Fermentation Bioreactors (fundamentals of design and operation)  
David A. Mitchell, N. Krieger, M Berovic  
Springer, Berlin 2006
- [2] VDI-Wärmeatlas  
Springer, Berlin 2002, 9<sup>ème</sup> édition
- [3] VSM Extrait de normes  
Société suisse des constructeurs de machines, Zürich 1997, 7<sup>ème</sup> édition
- [4] Projet de semestre : Bioréacteur pour la Production d'enzymes  
Bürgler Ludovic  
HES SO Sion 2008
- [5] Catalogue général SKF  
Publication 6000FR Mai 2006, Allemagne

## 15 REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui mon soutenu de près ou de loin durant ce travail de diplôme.

En particulier :

M. Grand Pascal, ingénieur et collaborateur scientifique à *la HES SO//Valais*, pour son aide et ses précieux conseils en mécanique, sa bonne humeur et sa disponibilité.

M. Heritier Jean-Claude, professeur à *la HES SO//Valais*, pour son aide, ses conseils et sa disponibilité

M. Vaccari Aldo, ingénieur et collaborateur scientifique à *la HES SO//Valais*, pour son aide dans le domaine de l'automatisation et sa patience.

Dr. Crelier Simon, professeur à *la HES SO//Valais*, pour son engouement envers ce projet.

M. Ruffieux Christian, responsable des ventes pour la suisse romande de la maison *BELIMO*, pour sa disponibilité et qui aurait été prêt à offrir les vannes de régulation nécessaires à mon projet.

M. Maurice Charles ingénieur en mécanique et M. Darbellay Jacques ingénieur en génie chimique chez *HUNTSMAN* à Monthey, pour le temps investi à répondre à mes diverses interrogations dans le domaine de la conception de réacteur.

Ainsi qu'à tous mes proches qui mon soutenu d'une manière ou d'une autre durant ces quatre années d'étude...

Bürgler Ludovic