REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES
--T L E M C E N--

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
المدرسة العليا في العلوم التطبيقية -تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : Électrotechnique
Spécialité : Énergie et Environnement

Présenté par : Salil Eddine HABHOUB

Thème

Conception et réalisation d'un séchoir solaire hybride.

Soutenu publiquement, le 18 /06/2026 ,
devant le jury composé de :

/ /	MCB ESSAT	Dr. BELAROUCI Salim	Président
/ /	MCA ESSAT	Dr Kerboua Abdelfettah	Directeur de mémoire
/ /	Professeur (ENPO)	Pr Boukli Hacene Fouad	Co- Directeur de mémoire
/ /	MCA ESSAT	Dr. MEBROUKI Mohammed	Examinateur 1
/ /	Directeur de recherche (CDER)	Bouchakour Salim	Examinateur 2
/ /	MCA ESSAT	Dr. SEBAGH Hafida	Représentant CDE

Année universitaire : 2025 /2026

Prototype Expérimental Développé



Vue générale du prototype réalisé dans le cadre de ce projet.

DÉDICACE

Je dédie ce mémoire à mes très chers parents, dont l'amour, le soutien indéfectible, les sacrifices et les encouragements ont été la source de ma réussite et de ma persévérance tout au long de mon parcours.
Je le dédie également à mes frères et sœurs, à toute ma famille, à mes amis et à tous ceux qui m'ont accompagné, soutenu et encouragé dans les moments de doute comme dans les moments de réussite.
J'adresse aussi une pensée reconnaissante à mes enseignants qui ont contribué à ma formation et à l'acquisition des connaissances nécessaires à l'aboutissement de ce travail.
À toutes les personnes qui ont cru en moi et qui ont participé, de près ou de loin, à cette belle aventure académique, je dédie ce modeste travail avec respect, gratitude et profonde reconnaissance.

Salil Eddine HABHOUB

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Mes remerciements les plus sincères s'adressent à mon directeur de mémoire, M. Abd-Fettah Kerboua, pour son encadrement de qualité, sa disponibilité, ses précieux conseils et sa patience tout au long de ce projet. Ses orientations scientifiques, son expertise et sa rigueur méthodologique ont été déterminantes dans la réussite de ce travail.

J'adresse également mes vifs remerciements à mon co-encadrant, Pr Boukli Hacene Fouad, pour son accompagnement, ses recommandations pertinentes, son soutien scientifique ainsi que l'intérêt constant qu'il a porté à ce projet. Ses remarques constructives et ses conseils avisés ont grandement contribué à l'amélioration de ce mémoire.

Je remercie également les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'évaluer ce travail et de participer à ma soutenance.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à l'ensemble des enseignants ainsi qu'au personnel administratif de l'École Supérieure en Sciences Appliquées de Tlemcen pour la qualité de la formation qu'ils m'ont dispensée durant ces années d'études.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à ma famille et à mes proches pour leur soutien moral, leur confiance, leur patience et leurs encouragements permanents. Leur présence à mes côtés a constitué une source de motivation essentielle tout au long de ce parcours.

À tous ceux qui ont contribué, directement ou indirectement, à l'aboutissement de ce travail, je témoigne ma profonde gratitude.

RÉSUMÉ

Conception et réalisation d'un séchoir solaire hybride

Dans un contexte marqué par la transition énergétique et la recherche de solutions durables, ce mémoire présente la conception, la réalisation et la modélisation d'un séchoir solaire hybride intégrant un système de stockage d'énergie par hydrogène vert. L'objectif principal est de pallier l'intermittence de l'énergie solaire afin d'assurer un séchage continu, efficace et respectueux de l'environnement.

Le travail débute par une étude bibliographique consacrée aux technologies de séchage solaire et aux critères de conception des séchoirs. Une attention particulière est accordée aux systèmes hybrides associant l'énergie solaire à une source thermique d'appoint.

La seconde partie est dédiée à la production d'hydrogène vert par électrolyse alcaline de l'eau. Un électrolyseur à faible coût alimenté par énergie photovoltaïque a été conçu et réalisé à partir d'électrodes en acier inoxydable. Le système comprend également une étape de purification du gaz ainsi qu'un dispositif de stockage à basse pression.

Le séchoir solaire hybride a ensuite été dimensionné sur les plans énergétique, thermique, aéraulique et géométrique. Le système développé comprend un capteur solaire thermique, une chambre de séchage isolée, un brûleur hybride H_2/GPL ainsi qu'une architecture de commande assurant la régulation des conditions de séchage.

Enfin, une modélisation sous MATLAB/Simulink/Stateflow a été développée afin de simuler le fonctionnement global du système et de valider la stratégie de commande proposée. Les résultats obtenus démontrent la faisabilité technique du couplage solaire–hydrogène et confirment l'intérêt de cette solution pour améliorer l'autonomie énergétique tout en réduisant l'impact environnemental des procédés de séchage.

Mots-clés : Séchage solaire, hydrogène vert, électrolyse alcaline, énergie renouvelable, stockage d'énergie, séchoir hybride, MATLAB/Simulink, Stateflow.

ABSTRACT

Design and Implementation of a Hybrid Solar Dryer

In the context of energy transition and sustainable development, this thesis presents the design, implementation and modeling of a hybrid solar dryer integrating a green hydrogen energy storage system. The main objective is to overcome the intermittent nature of solar energy and ensure continuous, efficient and environmentally friendly drying operations.

The study begins with a comprehensive review of solar drying technologies and dryer design criteria, with particular emphasis on hybrid systems combining solar energy with an auxiliary heat source.

The second part focuses on green hydrogen production through alkaline water electrolysis. A low-cost electrolyzer powered by photovoltaic energy was designed and manufactured using stainless-steel electrodes. The system also incorporates a gas purification stage and a low-pressure hydrogen storage unit.

Subsequently, the hybrid solar dryer was dimensioned from thermal, energy, aerodynamic and geometric perspectives. The proposed system consists of a solar thermal collector, an insulated drying chamber, a hybrid H_2/LPG burner and a control architecture ensuring optimal drying conditions.

Finally, a MATLAB/Simulink/Stateflow model was developed to simulate the overall system operation and validate the proposed control strategy. The obtained results demonstrate the technical feasibility of solar-hydrogen coupling and highlight the potential of this solution for improving energy autonomy while reducing the environmental impact of drying processes.

Keywords: Solar drying, green hydrogen, alkaline electrolysis, renewable energy, energy storage, hybrid dryer, MATLAB/Simulink, Stateflow.

Table des matières

Remerciements **2**

Résumé **3**

Abstract **5**

Liste des figures **12**

Liste des tableaux **14**

Liste des abréviations **15**

Introduction Générale **16**

1 État de l'Art sur le Séchage Solaire **19**
1.1 Définition et principes du séchage 19
1.2 Différents types de séchoirs solaires 20
1.2.1 Séchoirs solaires directs 21
1.2.2 Séchoirs solaires indirects 21
1.2.3 Séchoirs passifs et actifs 22
1.2.4 Séchoirs solaires mixtes 23
1.2.5 Séchoirs solaires hybrides 23
1.3 Critères de choix d'un séchoir 25
1.4 Aperçu de travaux réalisés 25

2 L'Hydrogène Vert et l'Électrolyseur **29**
2.1 Introduction 29
2.2 Contexte académique et pertinence du sujet 30
2.3 Hydrogène vert : définition et intérêt énergétique 31
2.3.1 Classification de l'hydrogène selon son mode de production 32
2.3.2 Propriétés physico-chimiques de l'hydrogène 33

2.3.3 Intérêt énergétique pour le séchage solaire 34
2.4 Production de l'hydrogène par électrolyse alcaline 35
2.4.1 Principe fondamental de l'électrolyse de l'eau 35
2.4.2 Réactions électrochimiques dans l'électrolyseur alcalin (NaOH) 36
2.4.3 Lois de Faraday appliquées à l'électrolyse 37
2.4.4 Rendement énergétique d'électrolyse 38
2.5 Choix technologique : l'électrolyseur alcalin (AEC) 40
2.5.1 Technologies d'électrolyse disponibles 41
2.5.2 Analyse comparative et justification du choix 42
2.6 Description détaillée de l'électrolyseur réalisé 43
2.6.1 Architecture générale du prototype 43
2.6.2 Système d'électrodes 44
2.6.3 Séparation des gaz et circulation ionique 46
2.6.4 Configuration électrique du réacteur 47
2.6.5 Réseau de collecte des gaz 47
2.7 Dimensionnement électrique de l'électrolyseur 50
2.7.1 Détermination du courant maximal 50
2.7.2 Tension de fonctionnement des cellules 50
2.7.3 Surface active des électrodes 51
2.7.4 Puissance consommée par l'électrolyseur 51
2.7.5 Estimation de la production théorique d'hydrogène . . 52
2.8 Électrolyte alcalin : préparation et propriétés 54
2.8.1 Choix du NaOH comme électrolyte 54
2.8.2 Préparation de la solution électrolytique 55
2.8.3 Influence de la distance inter-électrodes 56
2.9 Système de purification catalytique de l'hydrogène 57
2.9.1 Nécessité de la purification 57
2.9.2 Description du filtre catalytique en tube de cuivre . . . 58
2.9.3 Principe de fonctionnement 59
2.9.4 Estimation des paramètres du filtre 59
2.10 Système de stockage de l'hydrogène 60
2.10.1 Problématique du stockage 60
2.10.2 Solution adoptée : stockage par chambre à air de camion 60
2.10.3 Estimation de la capacité de stockage 61
2.10.4 Caractéristiques du système de stockage 62
2.10.5 Sécurité du stockage 62
2.11 Synthèse critique du prototype réalisé 63
2.11.1 Points forts 63
2.11.2 Limites techniques 63
2.11.3 Perspectives d'amélioration 64

2.12 Conclusion du chapitre 64
Nomenclature du Chapitre 2 66

3 Conception et Dimensionnement du Séchoir Solaire Hybride 68
3.1 Introduction 68
3.2 Cahier des Charges Fonctionnel 71
3.2.1 Analyse des besoins 71
3.2.2 Exigences fonctionnelles 73
3.2.3 Synthèse du cahier des charges 74
3.3 Dimensionnement énergétique 74
3.3.1 Caractérisation du produit : la tomate 75
3.3.2 Évaluation des besoins énergétiques 75
3.3.3 Dimensionnement du capteur solaire thermique 76
3.3.4 Dimensionnement du brûleur hybride H_2/GPL 77
3.4 Dimensionnement aéraulique 78
3.4.1 Débit massique d'air 78
3.4.2 Débit volumique et choix du ventilateur 79
3.5 Dimensionnement de la chambre de séchage 80
3.5.1 Surface active de séchage 81
3.5.2 Volume utile de la chambre 81
3.5.3 Dimensionnement des ouvertures d'air 82
3.5.4 Spécifications géométriques de la chambre 83
3.5.5 Optimisation thermodynamique de la chambre 83
3.6 Synthèse du dimensionnement 83
3.7 Conclusion du chapitre 85

4 Matériels et Méthodes : Réalisation et Instrumentation 90
4.1 Architecture globale et schéma synoptique 90
4.2 Réalisation de la chambre de séchage 92
4.2.1 Structure et présentation 92
4.2.2 Interface aéraulique 95
4.3 Réalisation du système thermique hybride 96
4.3.1 Capteur solaire thermique à air 98
4.3.2 Brûleur bi-énergie H_2/GPL 99
4.3.3 Circuit d'alimentation en gaz 101
4.3.4 Stockage d'hydrogène 102
4.4 Instrumentation et système de commande 103
4.4.1 Architecture générale du système de commande 104
4.4.2 Logique de commande manuelle 105
4.4.3 Mode de commande automatique basé sur Arduino Mega 2560 108

5 Modélisation de la Commande et Simulation sous MATLAB/Simulink 116
5.1 Introduction 116
5.2 Présentation de l'environnement MATLAB/Simulink/Stateflow 117
5.2.1 MATLAB/Simulink : simulation orientée système . . . 117
5.2.2 Stateflow : modélisation des machines à états finis . . . 118
5.3 Architecture globale du modèle Simulink 118
5.3.1 Structure fonctionnelle à trois couches 118
5.3.2 Initialisation des variables temporelles 121
5.4 Dictionnaire des variables du bloc Stateflow 121
5.5 Machine à États Finis Stateflow 124
5.5.1 Vue d'ensemble du diagramme d'états 124
5.6 Stratégie de contrôle du brûleur : logique à trois paliers 125
5.6.1 Motivation et justification de la stratégie 126
5.6.2 Définition des seuils de régulation 127
5.6.3 Table de vérité de la régulation par paliers 127
5.6.4 Code Stateflow de l'état MODE_H2 128
5.6.5 Initialisation et état ATTENTE_DEMARRAGE . . . 130
5.6.6 État MODE_BUTANE 132
5.7 Validation par simulation 133
5.7.1 Protocole de simulation 134
5.7.2 Analyse du scénario S2 : validation de la régulation à trois paliers 135
5.7.3 Analyse des scénarios S3 et S4 136
5.8 Discussion et limites du modèle 137
5.8.1 Apports de la modélisation Stateflow 137
5.8.2 Limites et perspectives 138
5.9 Conclusion 138

Conclusion Générale 140

Table des figures

1.1 Principe général du séchage : transferts de chaleur et de matière couplés [22] 20
1.2 Principe d'un séchoir solaire direct. Source : [23] 21
1.3 Principe d'un séchoir solaire indirect. Source : [24] 22
1.4 Principe d'un séchoir solaire mixte. Source : [25] 24
1.5 Séchage sous serre : (a) convection naturelle et (b) convection forcée. Source : [20] 26
1.6 Séchoir à serre améliorée avec réflecteur sur le mur nord : vue extérieure et intérieure. Source : [26] 26
1.7 Séchoir solaire à grande échelle équipé d'un brûleur GPL. Source : [27] 26
1.8 Séchoir solaire de type serre mixte. Source : [29] 27

2.1 Chaîne énergétique complète de production, de purification, de stockage et de valorisation de l'hydrogène vert dans le système de séchage solaire hybride. 30
2.2 Classification des principales filières de production de l'hydrogène selon leur source d'énergie et leurs émissions de CO_2. . . 32
2.3 Molécule d'hydrogène (H_2) et principales caractéristiques physiques utilisées dans les applications énergétiques. 33
2.4 Principe d'intégration de l'hydrogène vert dans un système de séchage solaire hybride : production, stockage et valorisation thermique. 35
2.5 Principe général de l'électrolyse alcaline de l'eau montrant la production d'hydrogène à la cathode et d'oxygène à l'anode. . 36
2.6 Abaque caractéristiques tension/densité de courant de l'électrolyseur alcalin. 40
2.7 Vue générale de l'électrolyseur montrant la cuve principale, les compartiments électrochimiques et les principaux éléments de construction avant assemblage. 44
2.8 Disposition interne des électrodes en acier inoxydable et des séparateurs en plexiglas. 46

2.9 Réseau externe de collecte des gaz comprenant les raccords en laiton, les conduites d'hydrogène et d'oxygène ainsi que les dispositifs d'isolement et de raccordement. 49
2.10 Principe du dimensionnement électrique de l'électrolyseur montrant la relation entre tension, courant, densité de courant et production d'hydrogène. 52
2.11 Préparation et fonctionnement de l'électrolyte alcalin dans l'électrolyseur : dissolution du NaOH, transport des ions OH^- et conduction ionique entre les compartiments. 57
2.12 Filtre catalytique en tube de cuivre comprenant le lit catalytique interne, la résistance chauffante externe et les raccordements d'entrée et de sortie du gaz. 59
2.13 Schéma du système de stockage d'hydrogène par chambre à air de camion comprimée entre deux plateaux rigides. 61

3.1 Architecture fonctionnelle et démarche de conception du séchoir solaire hybride intégrant l'hydrogène vert. 71

4.1 Architecture globale et schéma synoptique du prototype de séchoir solaire hybride (SSH). 91
4.2 Chambre de séchage réalisée : (a) vue générale de la chambre intégrée au prototype complet ; (b) détail des principaux composants : cheminée d'évacuation, ossature V-Slot, parois transparentes, plaque perforée d'admission d'air et supports des claies. 93
4.3 vue de la chambre de séchage dans la prototype complet. . . . 94
4.4 Interface aéraulique du prototype : (a) admission d'air ambiant avec filtre ; (b) ventilateurs d'injection ; (c) gaines flexibles de transfert ; (d) plénum de distribution d'air chaud ; (e) cheminée motorisée d'extraction de l'air humide. 96
4.5 Système thermique hybride réalisé intégrant le capteur solaire thermique à air et le brûleur bi-énergie H_2/GPL. 97
4.6 Capteur solaire thermique à air : absorbeur ondulé peint en noir mat, vitrage en verre trempé de 6 mm et structure porteuse en aluminium. 99
4.7 Composants internes de la chambre de combustion : (a) ossature métallique ; (b) ventilateur de purge ; (c) électrode d'allumage ; (d) brûleur 5 kW ; (e) tubes de distribution en cuivre ; (f) injecteurs ; (g) plaque métallique de support ; (h) vitrage ; (i) isolation thermique ; (j) admission d'air comburant. 101

4.8 Circuit d'alimentation en gaz : (a) collecteur principal de distribution ; (b) vannes manuelles d'isolement ; (c) électrovannes de commande du brûleur. 102
4.9 Système de stockage de l'hydrogène comprenant le réservoir, le manomètre de contrôle et le transmetteur de pression connecté au système de supervision. 103
4.10 Architecture hiérarchique du système de commande à double mode (manuel et automatique). 105
4.11 Schéma électrique du mode de commande manuelle avec maintien de la ventilation de purge. 106
4.12 Implantation des composants de sécurité, de ventilation et d'alimentation à l'intérieur du système thermique hybride. . . 108
4.13 Architecture matérielle du système de commande automatique basé sur une carte Arduino Mega 2560 et un module relais huit canaux. 109
4.14 Positionnement des capteurs dans le prototype : sonde DS18B20 (T_{cap}), capteur DHT22 (T_{sec} et H_{sec}), détecteurs de gaz et capteur de flamme. 112
4.15 Face avant de l'armoire de commande du prototype SSH : zone de sécurité, commande de ventilation, sélection énergétique et commande du brûleur. 114

5.1 Architecture globale du modèle Simulink : (a) vue générale du système de commande ; (b) couche d'acquisition basée sur les blocs Dashboard simulant les capteurs et les commandes opérateur ; (c) couche de traitement Stateflow et visualisation des sorties représentant les actionneurs du séchoir hybride. . . 119
5.2 Architecture générale de la machine à états finis Stateflow. . . 124
5.3 Évolution de la température $T_{sec}(t)$ et chronogramme des électrovannes V_{Fl1}, V_{Fl2} et V_{Fl3} lors du scénario S2. 136
5.4 Indicateurs visuels obtenus lors des scénarios S3 (basculement GPL) et S4 (déclenchement de la sécurité ATEX). 137

Liste des tableaux

1.1 Exemples de séchoirs directs et indirects en convection naturelle et forcée. Source : [6] 23

2.1 Propriétés physico-chimiques de l'hydrogène moléculaire. . . . 34
2.2 Récapitulatif des grandeurs thermodynamiques clés. 39
2.3 Tension de cellule en fonction de la densité de courant. 39
2.4 Comparaison des principales technologies d'électrolyse de l'eau 42
2.5 Performances théoriques de l'électrolyseur réalisé 53
2.6 Récapitulatif des caractéristiques du système de stockage . . . 62
2.7 Nomenclature des symboles utilisés dans le chapitre 66
2.8 Abréviations utilisées dans le chapitre 67

3.1 Cahier des charges fonctionnel du séchoir solaire hybride . . . 74
3.2 Synthèse du dimensionnement énergétique et aéraulique du séchoir solaire hybride 80
3.3 Spécifications géométriques de la chambre de séchage 83
3.4 Synthèse complète du dimensionnement du séchoir solaire hybride 85
3.5 Nomenclature du Chapitre 3 87
3.6 Nomenclature du Chapitre 3 88
3.7 Abréviations utilisées dans le Chapitre 3 89

4.1 Principaux organes du pupitre de commande manuelle 104
4.2 Architecture hiérarchique du système de commande 105
4.3 États des principaux actionneurs selon les conditions de fonctionnement 107
4.4 Affectation des principales entrées et sorties de l'Arduino Mega 2560 111
4.5 Capteurs de mesure et de sécurité utilisés par le système automatique 111
4.6 Messages affichés sur l'écran LCD selon l'état de fonctionnement du système 113

5.1 Dictionnaire des variables du diagramme Stateflow 123
5.2 Table de vérité de la régulation séquentielle du brûleur ($T_1 < T_2 < T_{cible}$) 127
5.3 Scénarios de simulation et résultats attendus 134
5.4 Bilan comparatif des résultats attendus et obtenus 138

Liste des abréviations

ATEX	Atmosphères Explosibles
FSM	Finite State Machine
GPL	Gaz de Pétrole Liquéfié
HMI / IHM	Interface Homme-Machine
LCD	Liquid Crystal Display
MBD	Model-Based Design
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PV	Photovoltaïque
PWM	Pulse Width Modulation
SDN	Software Defined Networking
H_2	Hydrogène
NaOH	Hydroxyde de sodium

Introduction Générale

Face à l'accroissement continu de la demande énergétique mondiale, à l'épuisement progressif des ressources fossiles et aux conséquences du changement climatique, le développement de solutions énergétiques durables constitue aujourd'hui une priorité majeure. Dans ce contexte, les énergies renouvelables occupent une place stratégique dans la transition énergétique mondiale grâce à leur caractère propre, abondant et durable [1, 2].

Parmi les différentes sources d'énergie renouvelable, l'énergie solaire représente l'une des ressources les plus prometteuses. L'Algérie dispose d'un potentiel solaire exceptionnel grâce à sa situation géographique favorable et à son important niveau d'ensoleillement tout au long de l'année. Selon le Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER), le pays bénéficie d'un gisement solaire parmi les plus élevés au monde, offrant des perspectives considérables pour le développement des technologies solaires thermiques et photovoltaïques [3].

Dans le secteur agroalimentaire, le séchage constitue l'une des techniques les plus anciennes et les plus utilisées pour la conservation des produits agricoles. Cette opération consiste à réduire la teneur en eau des produits afin de limiter leur dégradation microbiologique et de prolonger leur durée de conservation. Selon l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO), les pertes post-récolte représentent encore une part importante de la production agricole mondiale, notamment dans les pays en développement, ce qui souligne l'importance des technologies de conservation efficaces [4, 5].

Le séchage solaire apparaît comme une solution particulièrement attractive en raison de son faible coût d'exploitation et de son impact environnemental réduit. Cependant, malgré ses nombreux avantages, cette technologie demeure fortement dépendante des conditions météorologiques et de la disponibilité du rayonnement solaire. L'intermittence de l'énergie solaire constitue ainsi l'une des principales limitations des systèmes de séchage conventionnels, entraînant des fluctuations de température susceptibles d'affecter la qualité finale des produits séchés [6, 7].

Afin de pallier cette contrainte, plusieurs travaux récents se sont orientés vers le développement de séchoirs solaires hybrides intégrant des sources d'énergie auxiliaires. Ces systèmes permettent d'assurer la continuité du processus de séchage en maintenant les conditions thermiques requises même en période de faible ensoleillement. Les études les plus récentes montrent que l'association de l'énergie solaire avec des systèmes de stockage énergétique améliore significativement les performances énergétiques et la productivité des installations de séchage [8, 9, 10].

Parmi les différentes solutions de stockage disponibles, l'hydrogène vert suscite un intérêt croissant à l'échelle internationale. Produit par électrolyse de l'eau à partir d'électricité issue de sources renouvelables, il constitue un vecteur énergétique propre capable de stocker l'énergie sous forme chimique et de la restituer ultérieurement selon les besoins. Cette technologie est aujourd'hui considérée comme un élément clé de la transition énergétique mondiale et fait l'objet de nombreuses stratégies nationales de développement, notamment en Algérie [11, 12, 13, 14].

La production d'hydrogène vert repose principalement sur le procédé d'électrolyse de l'eau, qui permet de dissocier les molécules d'eau en hydrogène et en oxygène grâce à un apport d'énergie électrique. Les avancées récentes dans les technologies d'électrolyse, notamment l'électrolyse alcaline et l'électrolyse à membrane échangeuse de protons, ont permis d'améliorer considérablement les performances et la viabilité économique de cette filière énergétique [15, 16, 17, 18].

Dans cette perspective, le présent travail porte sur la conception et la réalisation d'un séchoir solaire hybride intégrant un système de production et de stockage d'hydrogène vert destiné à assurer la continuité énergétique du procédé de séchage. L'objectif principal est de développer une solution autonome, durable et adaptée aux conditions climatiques algériennes, capable de réduire la dépendance aux combustibles fossiles tout en améliorant les performances du séchage solaire.

Le système proposé repose sur l'association d'un capteur solaire thermique à air, d'une chambre de séchage isolée, d'un électrolyseur alcalin alimenté par énergie photovoltaïque, d'un système de stockage d'hydrogène à basse pression ainsi que d'un brûleur hybride utilisant l'hydrogène comme source d'énergie complémentaire. Une stratégie de commande et de supervision a également été développée afin d'assurer une gestion optimale des différentes sources énergétiques.

Au-delà de son intérêt scientifique et technologique, ce projet s'inscrit dans une démarche de valorisation des ressources énergétiques renouvelables et de promotion des technologies propres. Il contribue à la réduction des émissions de gaz à effet de serre tout en proposant une solution innovante

pour la conservation des produits agricoles.

Le présent mémoire est structuré en cinq chapitres complémentaires.

Le premier chapitre présente un état de l'art consacré aux technologies de séchage solaire, aux différents types de séchoirs existants ainsi qu'aux travaux de recherche les plus significatifs réalisés dans ce domaine.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude de l'hydrogène vert et des technologies d'électrolyse de l'eau. Les propriétés de l'hydrogène, les principes fondamentaux de l'électrolyse ainsi que la conception de l'électrolyseur réalisé y sont détaillés.

Le troisième chapitre traite de la conception et du dimensionnement du séchoir solaire hybride. Les calculs énergétiques, thermiques, aérauliques et géométriques nécessaires à la conception du système y sont développés.

Le quatrième chapitre présente les matériels utilisés ainsi que les différentes étapes de réalisation du prototype expérimental. L'instrumentation, les capteurs et le système de commande mis en œuvre sont également décrits.

Le cinquième chapitre est consacré à la modélisation et à la simulation du système sous MATLAB/Simulink/Stateflow. Les résultats obtenus permettent d'évaluer les performances de la stratégie de commande proposée et de valider le fonctionnement global du système.

Enfin, une conclusion générale synthétise les principaux résultats obtenus et présente les perspectives d'amélioration et de développement futur du système étudié.

Chapitre 1

État de l'Art sur le Séchage Solaire

1.1 Définition et principes du séchage

Le séchage est une opération consistant à retirer une partie du solvant contenu dans un corps par vaporisation. Le produit final, dit « sec », est généralement obtenu sous forme solide après élimination d'une fraction importante de l'humidité initiale. Toutefois, le produit conserve généralement une certaine quantité d'eau résiduelle correspondant à son humidité d'équilibre avec le milieu ambiant. Dans la majorité des applications industrielles et agricoles, le solvant concerné est l'eau [19].

Le séchage constitue une opération unitaire fondamentale dans de nombreux secteurs tels que l'agroalimentaire, la pharmacie, la chimie et l'industrie des matériaux. Son principal objectif est de réduire la teneur en eau des produits afin d'améliorer leur conservation, de limiter le développement des micro-organismes et de préserver leurs propriétés physiques, chimiques et nutritionnelles [4, 5].

Du point de vue énergétique, le séchage est considéré comme une opération de séparation thermique. En effet, il est nécessaire de fournir au produit l'énergie de vaporisation du solvant afin de permettre son passage de l'état liquide à l'état vapeur. Cette énergie est généralement apportée sous forme de chaleur par un fluide caloporteur, le plus souvent de l'air chaud. Le mécanisme de séchage met ainsi en jeu simultanément des phénomènes de transfert de chaleur et de transfert de matière fortement couplés [20].

Le transfert de chaleur permet d'augmenter la température du produit et de fournir l'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau. Parallèlement, le transfert de matière assure la migration de l'humidité depuis l'intérieur du

produit vers sa surface, puis son évacuation vers le milieu extérieur sous forme de vapeur d'eau. La vitesse du séchage dépend de plusieurs paramètres tels que la température de l'air, son humidité relative, sa vitesse d'écoulement ainsi que les caractéristiques physiques du produit à sécher [21].

La Figure 1.1 présente le principe général du séchage, basé sur les transferts couplés de chaleur et de matière entre l'air de séchage et le produit humide.

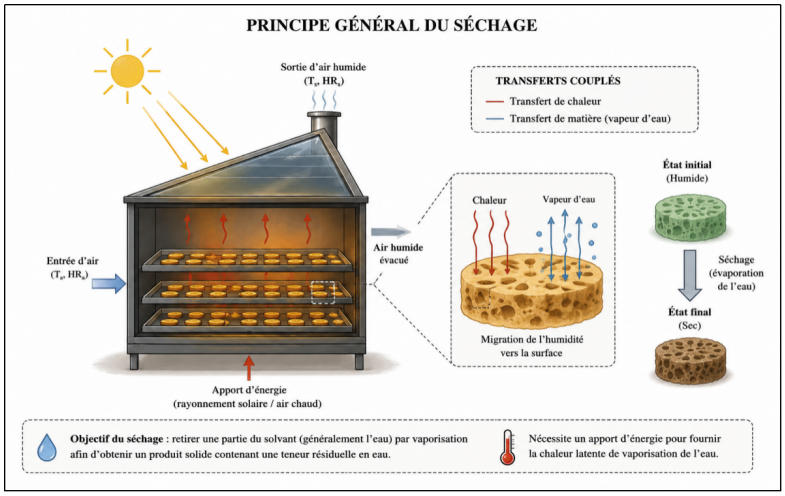


FIGURE 1.1 – Principe général du séchage : transferts de chaleur et de matière couplés [22]

Dans le cas du séchage solaire, l'énergie thermique nécessaire au processus est fournie par le rayonnement solaire. Cette source d'énergie renouvelable permet de réduire la consommation énergétique conventionnelle tout en assurant une conservation efficace des produits agricoles. Grâce à son abondance et à son caractère non polluant, l'énergie solaire constitue aujourd'hui une solution particulièrement adaptée aux régions bénéficiant d'un fort ensoleillement, notamment l'Algérie [1, 2, 3].

1.2 Différents types de séchoirs solaires

Les séchoirs solaires peuvent être classés selon la manière dont ils exploitent le rayonnement solaire. On distingue principalement les séchoirs directs, indirects et mixtes. Selon le mode de circulation de l'air, chacun de ces systèmes peut fonctionner en convection naturelle (séchoir passif) ou en convection forcée (séchoir actif) [6].

1.2.1 Séchoirs solaires directs

Principe :

Dans un séchoir solaire direct, le rayonnement traverse une couverture transparente en verre ou en plastique avant d'être absorbé par les parois internes ainsi que par le produit à sécher. La chaleur ainsi générée provoque l'évaporation de l'humidité contenue dans le matériau, tandis que l'air humide est évacué par convection naturelle ou forcée [23].

Avantages :

— Structure simple et économique, pouvant être réalisée à partir de matériaux disponibles localement.
— Faibles coûts d'exploitation grâce à l'utilisation directe de l'énergie solaire.
— Solution adaptée aux petites capacités de production et aux usages domestiques.

Inconvénients :

— Risque de surchauffe susceptible d'altérer la qualité du produit.
— Difficulté de contrôle des conditions de fonctionnement, notamment la température et l'humidité.
— Séchage parfois non uniforme et sensibilité aux conditions extérieures telles que la pluie, la poussière ou les insectes.

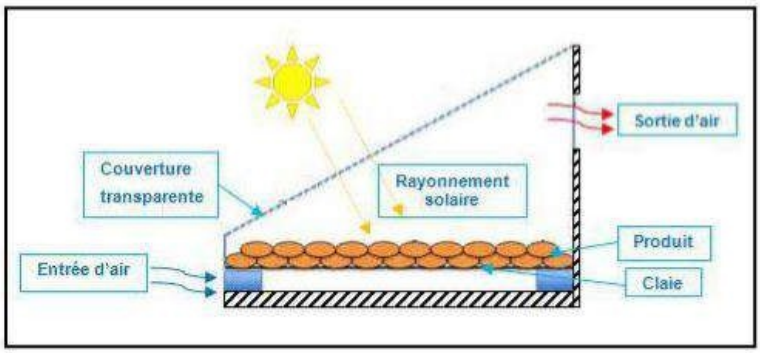


FIGURE 1.2 – Principe d'un séchoir solaire direct. Source : [23]

1.2.2 Séchoirs solaires indirects

Principe :

Dans cette configuration, le rayonnement solaire est capté par un collecteur thermique chargé de chauffer l'air de séchage. Celui-ci est ensuite acheminé vers la chambre où il cède son énergie thermique au produit. L'humidité extraite est finalement rejetée à l'extérieur avec l'air de sortie [24].

Avantages :

— Meilleure préservation des caractéristiques du produit grâce à l'absence d'exposition directe au rayonnement solaire.
— Régulation plus efficace de la température au moyen du collecteur.
— Répartition plus homogène de la chaleur et meilleure protection contre les intempéries.

Inconvénients :

— Conception plus élaborée entraînant un coût d'investissement supérieur.
— Nécessité d'un système de ventilation performant afin d'assurer une bonne efficacité du procédé.

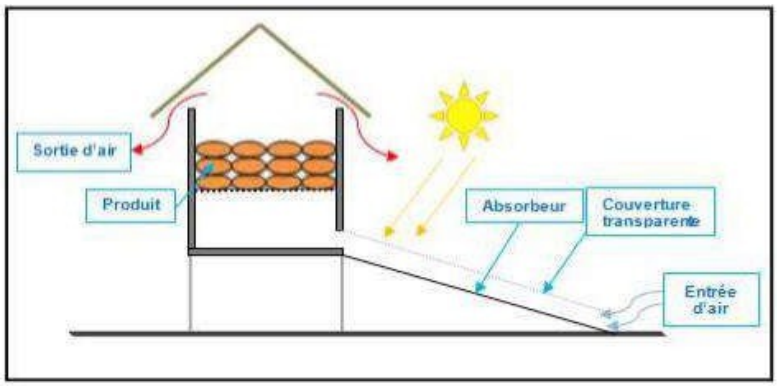


FIGURE 1.3 – Principe d'un séchoir solaire indirect. Source : [24]

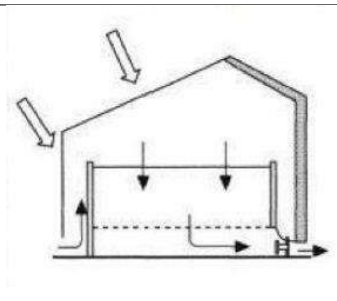
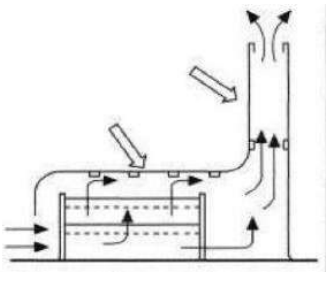
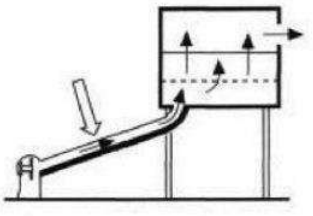
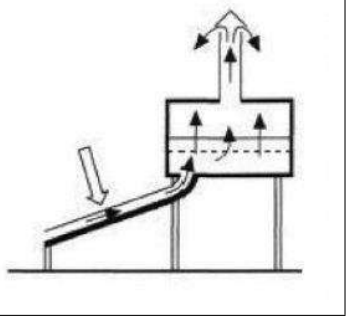
1.2.3 Séchoirs passifs et actifs

Les séchoirs passifs utilisent la convection naturelle pour assurer la circulation de l'air à travers la chambre de séchage. L'air est préchauffé dans un capteur solaire puis mis en mouvement grâce à l'effet cheminée. Cette configuration présente l'avantage d'être simple à mettre en œuvre et peu coûteuse [6].

À l'inverse, les séchoirs actifs sont équipés d'un ventilateur assurant une convection forcée. Cette solution permet un meilleur contrôle du débit d'air et des conditions de fonctionnement, ce qui améliore généralement les performances globales du procédé [6].

Des études comparatives réalisées sur le séchage de la banane ont montré que les deux approches peuvent fournir des résultats satisfaisants. Le choix entre une configuration passive ou active dépend principalement des exigences de production, des caractéristiques du produit traité et des conditions climatiques locales.

TABLE 1.1 – Exemples de séchoirs directs et indirects en convection naturelle et forcée. Source : [6]

	Séchoir actif	**Séchoir passif**
Séchoir direct		
Séchoir indirect		

1.2.4 Séchoirs solaires mixtes

Les séchoirs solaires mixtes combinent les principes des séchoirs directs et indirects. Dans ce type de système, le produit est exposé simultanément au rayonnement solaire direct et à l'air chaud provenant d'un collecteur solaire [25]. Cette double action permet d'accélérer le processus de séchage et d'améliorer l'uniformité thermique à l'intérieur de la chambre.

Grâce à cette combinaison, les séchoirs mixtes offrent une plus grande flexibilité d'utilisation pour différents types de produits et diverses conditions climatiques. Toutefois, leur conception est plus complexe et nécessite une optimisation adéquate de la circulation de l'air afin d'éviter les hétérogénéités de température.

1.2.5 Séchoirs solaires hybrides

Les séchoirs hybrides associent l'énergie solaire à une ou plusieurs sources d'énergie d'appoint (électricité, bois, gaz, fioul, hydrogène, etc.) afin d'optimiser le processus de séchage et de garantir sa continuité quelles que soient les conditions météorologiques [8, 7].

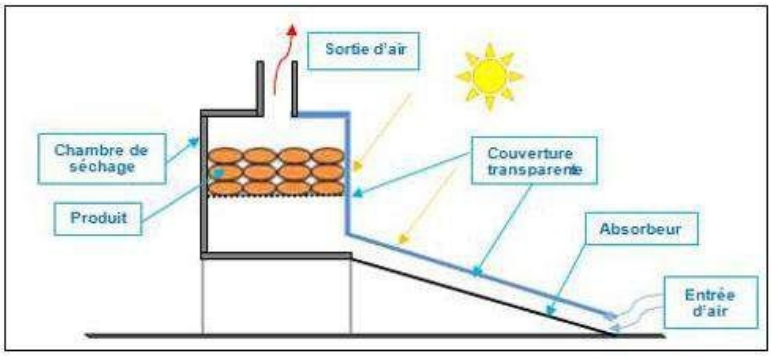


FIGURE 1.4 – Principe d'un séchoir solaire mixte. Source : [25]

Leur fonctionnement repose généralement sur deux étapes complémentaires :

— **Préchauffage solaire :** l'énergie solaire est utilisée en priorité pour chauffer l'air entrant, réduisant ainsi la consommation énergétique des systèmes auxiliaires.
— **Appoint énergétique :** lorsque le rayonnement solaire devient insuffisant, la source d'énergie complémentaire prend le relais afin de maintenir les conditions de séchage requises.

Avantages :

— Fonctionnement continu indépendamment des variations d'ensoleillement.
— Contrôle précis de la température et du débit d'air.
— Adaptabilité à différents produits et conditions climatiques.
— Réduction des pertes post-récolte grâce à une meilleure maîtrise du procédé.

Inconvénients :

— Investissement initial relativement élevé.
— Complexité accrue des systèmes de commande et de gestion énergétique.
— Risque de dépendance aux combustibles fossiles lorsque la source d'appoint n'est pas renouvelable.

Les séchoirs hybrides constituent aujourd'hui une solution particulièrement prometteuse pour les régions à ensoleillement variable. En combinant la disponibilité de l'énergie solaire avec la fiabilité d'une source auxiliaire, ils permettent d'améliorer les performances du séchage tout en garantissant une meilleure continuité de fonctionnement.

1.3 Critères de choix d'un séchoir

Selon Nonhebel [19], le choix d'un séchoir résulte d'un compromis entre le coût, la qualité du produit obtenu, la sécurité d'utilisation et les contraintes d'installation. Les principaux critères d'évaluation peuvent être regroupés en trois catégories :

Caractéristiques physiques : type, taille et forme du séchoir, capacité de traitement, surface utile, nombre de claies ainsi que modalités de chargement et de déchargement.

Performances thermiques : temps de séchage, taux d'élimination de l'humidité, température et humidité relative de l'air de séchage, débit d'air et rendement global du système.

Qualité du produit séché : couleur, texture, saveur, arôme, valeur nutritive ainsi que capacité de réhydratation.

1.4 Aperçu de travaux réalisés

Face aux limites du séchage solaire traditionnel en plein air, notamment l'exposition aux rayons ultraviolets, à la poussière, aux insectes et aux intempéries, le séchage sous serre solaire constitue une alternative particulièrement intéressante. Plusieurs travaux ont démontré son efficacité pour le traitement de divers produits agricoles.

Tiwari et al. (2004).

Les coefficients de transfert de masse convectif (CMTC) pour le séchage du jaggery sous serre varient de 0,55 à 1,43 W/m^2°C en convection naturelle et de 0,33 à 1,80 W/m^2°C en convection forcée [20].

Sacilik et al. (2006).

Le séchage de tomates biologiques dans une serre tunnel a permis de réduire la teneur en eau de 93,35

Sethi et al. (2009).

L'ajout d'un réflecteur incliné sur le mur nord a permis d'augmenter la température intérieure de 1 à 6,7 °C en convection naturelle et de 1 à 4 °C en convection forcée [26].

Janjai et al. (2011).

Un séchoir serre à grande échelle, doté d'un sol en béton noir et d'une capacité de traitement de 1000 kg, a permis de sécher le piment, la banane et le café en respectivement 3, 5 et 2 jours, contre 5, 7 et 4 jours en séchage traditionnel au soleil. La période de retour sur investissement a été estimée à environ 2,5 ans [27].

Autres études notables

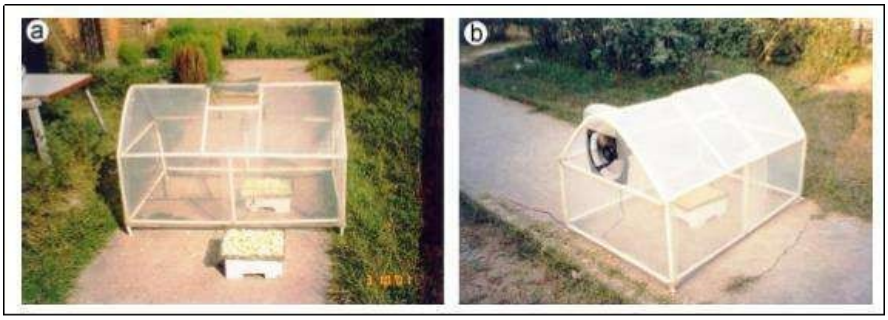


FIGURE 1.5 – Séchage sous serre : (a) convection naturelle et (b) convection forcée. Source : [20]

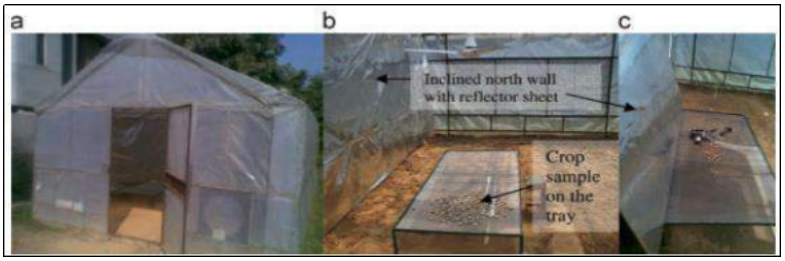


FIGURE 1.6 – Séchoir à serre améliorée avec réflecteur sur le mur nord : vue extérieure et intérieure. Source : [26]



FIGURE 1.7 – Séchoir solaire à grande échelle équipé d'un brûleur GPL. Source : [27]

— Elicin et al. (2005) ont réduit la teneur en eau des pommes de 82
— Fadhel et al. (2005) ont montré que la serre solaire tunnel constitue l'une des solutions les plus adaptées au séchage des raisins Sultanine [28].
— Rathore et al. (2010) ont obtenu un séchage de raisins sans pépins de 85
— Almuhanna (2012) a rapporté une efficacité thermique journalière moyenne de 57,2



FIGURE 1.8 – Séchoir solaire de type serre mixte. Source : [29]

Ces travaux mettent en évidence l'intérêt des technologies de séchage solaire sous serre pour améliorer la qualité des produits, réduire la durée du procédé et limiter les pertes post-récolte. Ils démontrent également que l'intégration de solutions complémentaires, telles que les réflecteurs ou les systèmes hybrides, permet d'accroître davantage les performances des installations.

Conclusion

Dans ce chapitre, les principes fondamentaux du séchage ainsi que les différents types de séchoirs solaires ont été présentés. L'étude bibliographique a montré que le séchage constitue une opération essentielle pour la conservation des produits agricoles, permettant de réduire leur teneur en eau tout en préservant leurs qualités nutritionnelles et organoleptiques.

Les différentes configurations de séchoirs solaires, notamment les systèmes directs, indirects, mixtes, passifs, actifs et hybrides, ont été analysées en mettant en évidence leurs principes de fonctionnement, leurs avantages et leurs limites. Cette analyse a montré que les séchoirs hybrides représentent aujourd'hui l'une des solutions les plus performantes grâce à leur capacité à

assurer la continuité du processus de séchage indépendamment des variations climatiques.

Par ailleurs, l'examen de plusieurs travaux réalisés dans ce domaine a confirmé l'intérêt croissant porté aux technologies de séchage solaire. Les résultats obtenus par différents chercheurs démontrent l'amélioration significative de la qualité des produits séchés, la réduction des temps de traitement ainsi que l'augmentation de l'efficacité énergétique des installations.

Toutefois, la principale limitation des systèmes solaires demeure leur dépendance aux conditions d'ensoleillement. Cette contrainte justifie l'intégration de solutions de stockage ou de sources d'énergie complémentaires capables d'assurer un fonctionnement continu du système. Dans cette perspective, l'hydrogène vert apparaît comme une alternative particulièrement prometteuse grâce à sa capacité de stockage énergétique et à son caractère propre et renouvelable.

Le chapitre suivant sera consacré à l'étude de l'hydrogène vert ainsi qu'aux principes de l'électrolyse de l'eau, technologie retenue pour la production de l'hydrogène utilisé dans le système hybride proposé.

Chapitre 2

L'Hydrogène Vert et l'Électrolyseur

2.1 Introduction

Dans la perspective du développement durable et de la transition énergétique, l'hydrogène vert s'impose comme l'un des vecteurs énergétiques les plus prometteurs pour remplacer progressivement les combustibles fossiles [11, 12, 13, 14]. Sa production à partir d'énergies renouvelables, notamment de l'énergie solaire, permet de disposer d'une source d'énergie propre, stockable et à forte densité énergétique. Parmi les différentes technologies de production, l'électrolyse de l'eau constitue une méthode efficace et respectueuse de l'environnement puisqu'elle ne génère que de l'hydrogène (H_2) et de l'oxygène (O_2) à partir de l'eau [15, 16, 17].

Dans ce cadre, le présent chapitre porte sur la réalisation d'un électrolyseur alcalin à faible coût destiné à la production d'hydrogène vert pour un système de séchage solaire hybride. L'énergie électrique nécessaire est fournie par des panneaux photovoltaïques, assurant un fonctionnement entièrement renouvelable [3]. Le dispositif repose sur la dissociation électrochimique des molécules d'eau dans une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH).

L'électrolyseur conçu se compose de plusieurs chambres séparées contenant chacune une anode et une cathode, favorisant la production et la récupération distincte des gaz. L'hydrogène obtenu traverse une étape intermédiaire de purification assurée par un filtre catalytique intégré dans un tube de cuivre chauffé par une résistance électrique externe avant d'être acheminé vers un système de stockage à basse pression utilisant une chambre à air de camion instrumentée d'un capteur de pression.

Ce stockage intermédiaire, conçu pour sa simplicité et son accessibilité,

permet de réguler le débit d'hydrogène vers la chambre de combustion où il sert de source de chaleur complémentaire pour le séchage. La combustion du dihydrogène ne produit que de la vapeur d'eau, garantissant ainsi un procédé exempt d'émissions polluantes.

La Figure 2.1 présente la chaîne énergétique complète mise en œuvre dans le système étudié, depuis la production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau jusqu'à sa valorisation thermique dans la chambre de combustion du séchoir hybride.

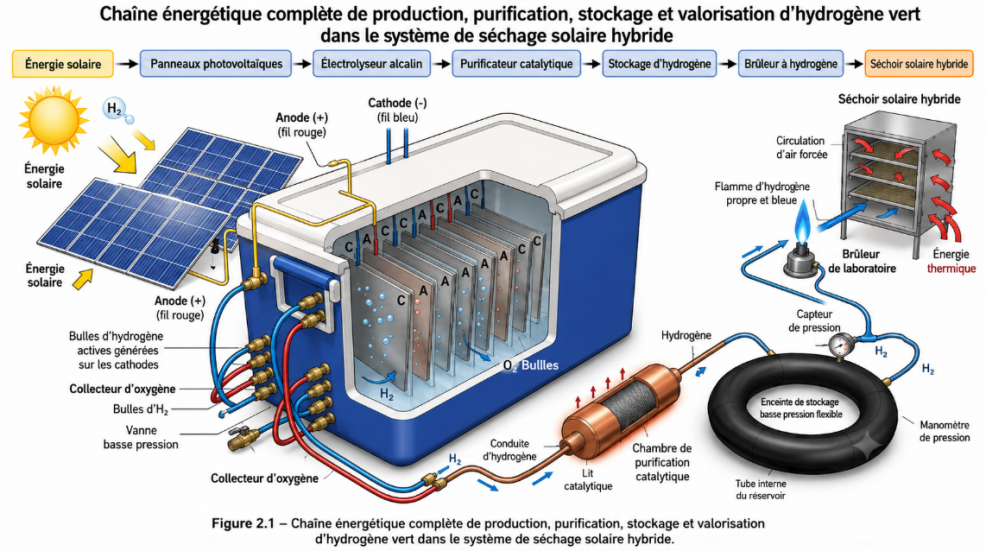


FIGURE 2.1 – Chaîne énergétique complète de production, de purification, de stockage et de valorisation de l'hydrogène vert dans le système de séchage solaire hybride.

Ce chapitre présente les principes fondamentaux de l'électrolyse, la conception expérimentale de l'électrolyseur, le système de purification catalytique, le dispositif de stockage à basse pression ainsi que les paramètres influençant le rendement énergétique du système, dans une démarche de valorisation de l'énergie solaire locale pour un séchage autonome et durable.

2.2 Contexte académique et pertinence du sujet

La problématique de la décarbonation des procédés agro-industriels constitue aujourd'hui un enjeu majeur de la recherche appliquée en génie énergétique [1, 2]. Le séchage des produits agricoles, opération unitaire fortement

consommatrice d'énergie thermique, représente un domaine d'application privilégié pour l'intégration des énergies renouvelables.

Traditionnellement alimenté par des combustibles fossiles ou par l'énergie solaire directe, le procédé de séchage se heurte à deux contraintes fondamentales : l'intermittence de la ressource solaire et l'impact environnemental des sources d'appoint conventionnelles.

L'utilisation de l'hydrogène vert comme vecteur énergétique intermédiaire permet de résoudre simultanément ces deux problématiques [13, 14]. En effet, l'hydrogène produit par électrolyse de l'eau à partir d'électricité photovoltaïque offre la possibilité de stocker l'énergie solaire excédentaire sous forme chimique puis de la restituer sous forme thermique lors des périodes de déficit d'ensoleillement [15, 16, 17]. Ce concept, désigné sous le terme de couplage *Power-to-Heat* via l'hydrogène, constitue une approche innovante dans le contexte des systèmes de séchage hybrides.

Le présent travail mobilise plusieurs domaines fondamentaux tels que la thermodynamique, l'électrochimie, les transferts thermiques et la conception des systèmes énergétiques. Il offre ainsi un cadre d'étude complet pour l'analyse et la décarbonation des procédés agro-industriels.

L'architecture de l'électrolyseur alcalin à séparation mécanique a été retenue en raison de sa simplicité de réalisation, de son faible coût et de son accessibilité. Cette configuration permet également d'étudier l'influence de plusieurs paramètres essentiels tels que la densité de courant, la température de fonctionnement, la concentration de l'électrolyte et la surface active des électrodes sur les performances du système [18].

Enfin, ce chapitre s'inscrit dans une démarche de prototypage expérimental à faible coût visant à démontrer la faisabilité technique d'un système intégré de production, de purification, de stockage et d'utilisation de l'hydrogène vert pour le séchage solaire. L'approche adoptée privilégie l'utilisation de matériaux et de composants accessibles localement afin de favoriser la reproductibilité du système et son adaptation aux contraintes des pays en développement.

2.3 Hydrogène vert : définition et intérêt énergétique

L'hydrogène est l'élément chimique le plus abondant de l'univers. Sur Terre, il est principalement présent sous forme combinée dans l'eau et les composés organiques. En raison de sa capacité à stocker et à transporter l'énergie, il est aujourd'hui considéré comme un vecteur énergétique straté-

gique dans le développement des systèmes énergétiques modernes [11, 12].

Contrairement aux ressources énergétiques primaires telles que le charbon, le pétrole ou le rayonnement solaire, l'hydrogène n'est pas directement disponible sous forme exploitable. Il doit être produit à partir d'autres sources d'énergie avant d'être utilisé. Lorsque cette production est réalisée à partir d'électricité issue de sources renouvelables, notamment solaire ou éolienne, l'hydrogène obtenu est qualifié d'*hydrogène vert* [13, 14].

L'intérêt de l'hydrogène vert réside dans sa capacité à convertir l'énergie électrique renouvelable en énergie chimique facilement stockable. Cette caractéristique permet de compenser les fluctuations de production des énergies renouvelables et d'améliorer l'autonomie énergétique des installations.

2.3.1 Classification de l'hydrogène selon son mode de production

Plusieurs filières de production permettent d'obtenir de l'hydrogène. Afin de distinguer leur impact environnemental, une classification par couleur est couramment utilisée.

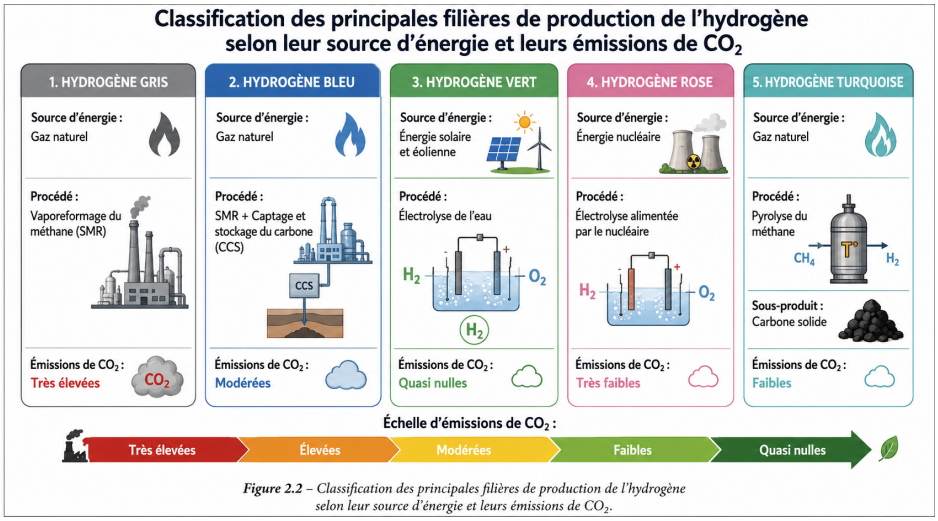


Figure 2.2 – Classification des principales filières de production de l'hydrogène selon leur source d'énergie et leurs émissions de CO_2.

FIGURE 2.2 – Classification des principales filières de production de l'hydrogène selon leur source d'énergie et leurs émissions de CO_2.

Les principales catégories sont :

— **Hydrogène gris** : obtenu principalement par reformage du gaz naturel. Cette technologie est aujourd'hui dominante mais fortement émettrice de dioxyde de carbone.

— **Hydrogène bleu** : produit à partir de combustibles fossiles avec captage et stockage partiel du carbone émis.
— **Hydrogène vert** : obtenu par électrolyse de l'eau alimentée par des énergies renouvelables. Il constitue la filière la plus respectueuse de l'environnement.
— **Hydrogène rose** : produit à partir d'électricité d'origine nucléaire.
— **Hydrogène turquoise** : obtenu par pyrolyse du méthane avec production de carbone solide.

Parmi ces technologies, l'hydrogène vert représente aujourd'hui la solution la plus cohérente avec les objectifs internationaux de décarbonation et de développement durable [13, 14].

2.3.2 Propriétés physico-chimiques de l'hydrogène

L'hydrogène moléculaire (H_2) est un gaz incolore, inodore et non toxique. Sa faible masse moléculaire lui confère une densité particulièrement réduite, ce qui influence directement ses méthodes de stockage et de transport.

Du point de vue énergétique, l'hydrogène possède l'un des pouvoirs calorifiques massiques les plus élevés parmi les combustibles conventionnels. Cette propriété lui permet de stocker une quantité importante d'énergie pour une masse relativement faible.

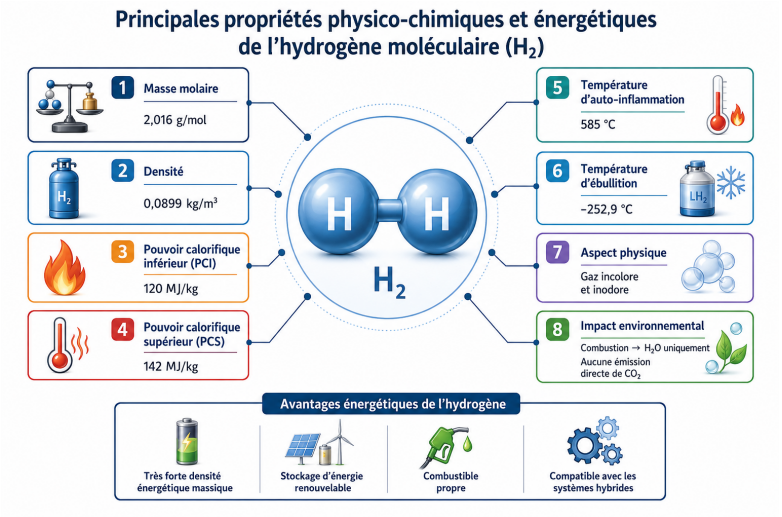


FIGURE 2.3 – Molécule d'hydrogène (H_2) et principales caractéristiques physiques utilisées dans les applications énergétiques.

Les propriétés physico-chimiques les plus importantes sont regroupées dans le Tableau 2.1.

TABLE 2.1 – Propriétés physico-chimiques de l'hydrogène moléculaire.

Propriété	**Valeur**
Formule chimique	H_2
Masse molaire	2,016 g/mol
Densité à 25°C et 1 atm	0,0899 kg/m^3
PCI	120 MJ/kg
PCS	142 MJ/kg
Température d'auto-inflammation	585°C
Température d'ébullition	-252,9°C
Couleur	Incolore
Odeur	Inodore
Toxicité	Non toxique

Ces caractéristiques expliquent l'intérêt croissant porté à l'hydrogène dans les domaines du stockage énergétique, du transport et des procédés thermiques industriels.

2.3.3 Intérêt énergétique pour le séchage solaire

Le fonctionnement d'un séchoir solaire dépend directement du rayonnement disponible. Les variations météorologiques ainsi que l'absence d'ensoleillement durant la nuit peuvent entraîner une diminution de la température de séchage et une augmentation de la durée du procédé.

L'intégration d'un système hydrogène permet de valoriser l'énergie photovoltaïque excédentaire produite durant les périodes favorables. Cette énergie est convertie en hydrogène par électrolyse puis stockée pour une utilisation ultérieure.

Dans le système développé dans ce travail, l'hydrogène est utilisé comme source énergétique complémentaire afin d'assurer le maintien des conditions thermiques lorsque l'apport solaire devient insuffisant. Cette stratégie permet d'améliorer la continuité du séchage tout en réduisant le recours aux combustibles conventionnels.

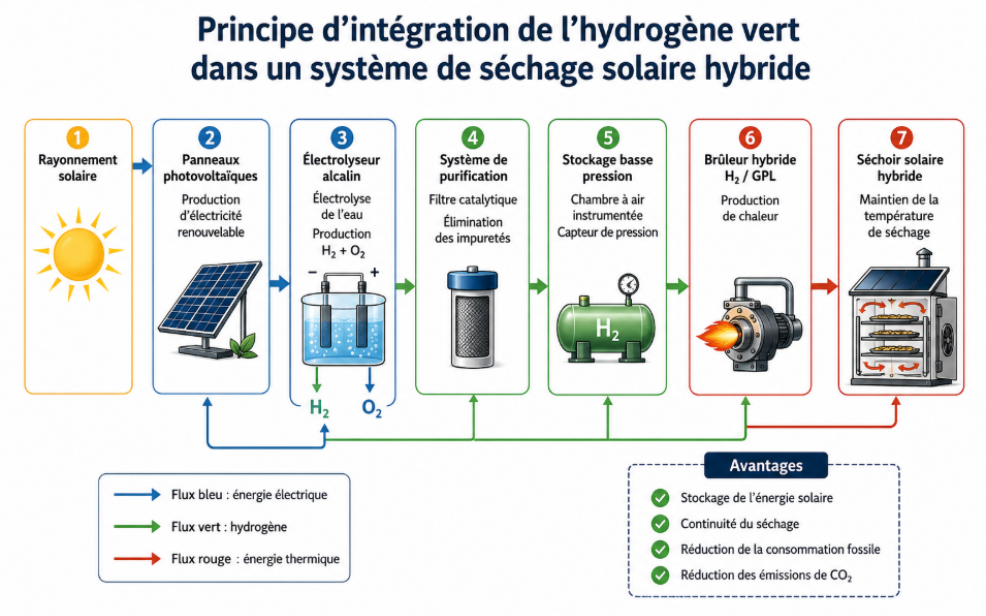


FIGURE 2.4 – Principe d'intégration de l'hydrogène vert dans un système de séchage solaire hybride : production, stockage et valorisation thermique.

Ainsi, l'association de l'énergie solaire et de l'hydrogène vert constitue une solution particulièrement adaptée aux systèmes de séchage nécessitant une autonomie énergétique élevée et une continuité de fonctionnement quelles que soient les conditions climatiques.

2.4 Production de l'hydrogène par électrolyse alcaline

2.4.1 Principe fondamental de l'électrolyse de l'eau

L'électrolyse de l'eau est un procédé électrochimique qui consiste à décomposer la molécule d'eau en ses constituants élémentaires — l'hydrogène et l'oxygène — sous l'action d'un courant électrique continu. Ce processus se déroule dans un électrolyseur constitué de deux électrodes (anode et cathode) immergées dans une solution électrolytique conductrice.

Le principe thermodynamique sous-jacent repose sur la réaction inverse de la combustion de l'hydrogène. Alors que la combustion est une réaction exothermique spontanée, l'électrolyse est une réaction endothermique non spontanée qui nécessite un apport d'énergie électrique pour franchir la barrière thermodynamique.

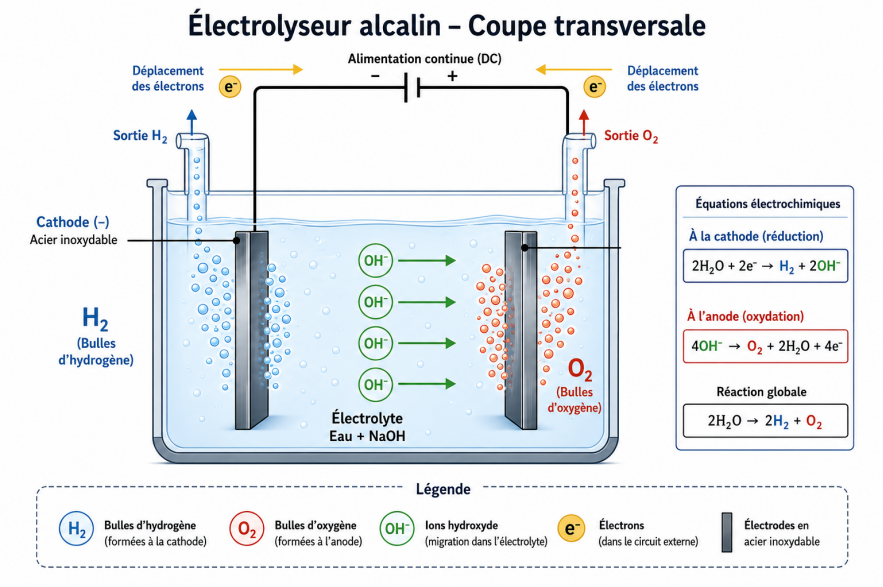


FIGURE 2.5 – Principe général de l'électrolyse alcaline de l'eau montrant la production d'hydrogène à la cathode et d'oxygène à l'anode.

2.4.2 Réactions électrochimiques dans l'électrolyseur alcalin (NaOH)

Dans un électrolyseur alcalin, l'électrolyte utilisé est une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium (NaOH). Dans le présent prototype, le NaOH est retenu en raison de sa disponibilité et de son coût modéré.

L'hydroxyde de sodium se dissocie totalement dans l'eau selon :

$$NaOH \rightarrow Na^{+} + OH^{-} \tag{2.1}$$

Les ions hydroxyle OH^{-} ainsi libérés assurent la conduction ionique entre les électrodes.

Les réactions aux électrodes sont les suivantes :

Cathode (réduction) :

$$2H_2O + 2e^{-} \rightarrow H_2 \uparrow + 2OH^{-} \tag{2.2}$$

À la cathode, les molécules d'eau sont réduites par les électrons fournis par le circuit externe. Cette réaction produit du dihydrogène gazeux qui se dégage sous forme de bulles ainsi que des ions hydroxyle qui migrent vers l'anode sous l'effet du champ électrique.

Anode (oxydation) :

$$4OH^- \rightarrow O_2 \uparrow + 2H_2O + 4e^- \tag{2.3}$$

À l'anode, les ions hydroxyle sont oxydés, libérant du dioxygène gazeux et restituant des molécules d'eau au milieu réactionnel. Les électrons libérés retournent au circuit externe.

Bilan global :

$$2H_2O \xrightarrow{\text{énergie électrique}} 2H_2 + O_2 \tag{2.4}$$

Remarque importante :

Le NaOH n'est pas consommé nettement par la réaction globale. Les ions OH^- utilisés à l'anode sont régénérés à la cathode. Le NaOH joue exclusivement le rôle de support ionique assurant la conduction électrolytique sans transformation chimique permanente. Seule l'eau est effectivement consommée et doit être régulièrement réapprovisionnée.

2.4.3 Lois de Faraday appliquées à l'électrolyse

La quantité d'hydrogène produite par électrolyse est régie par les lois de Faraday, qui établissent une relation directe entre la quantité d'électricité traversant le système et la masse de substance transformée aux électrodes.

Première loi de Faraday :

La masse de substance déposée ou dégagée à une électrode est proportionnelle à la quantité d'électricité qui traverse l'électrolyte.

Deuxième loi de Faraday :

Pour une même quantité d'électricité, les masses des différentes substances transformées sont proportionnelles à leurs équivalents chimiques.

La quantité de matière d'hydrogène produite est donnée par :

$$n(H_2) = \frac{I \times t}{n_e \times F} \tag{2.5}$$

où :

— $n(H_2)$: quantité de matière d'hydrogène (mol) ;
— I : intensité du courant (A) ;
— t : durée d'électrolyse (s) ;
— $n_e = 2$: nombre d'électrons échangés ;
— $F = 96485\ C/mol$: constante de Faraday.

Le volume d'hydrogène produit dans les conditions normales est :

$$V(H_2) = n(H_2) \times V_m = \frac{I \times t}{2F} \times 22.4 \tag{2.6}$$

avec :

$$V_m = 22.4\ L/mol$$

Le débit molaire d'hydrogène tenant compte du rendement faradique est :

$$\dot{n}(H_2) = \frac{\eta_F \times I}{2F} \tag{2.7}$$

La masse produite est :

$$m(H_2) = \frac{I \times t \times M(H_2)}{2F} \tag{2.8}$$

où :

$$M(H_2) = 2.016\ g/mol$$

2.4.4 Rendement énergétique d'électrolyse

a) Tension thermodynamique réversible

La tension minimale théorique nécessaire pour décomposer l'eau est déterminée par l'énergie libre de Gibbs :

$$E_{th} = \frac{\Delta G}{zF} = \frac{237200}{2 \times 96485} = 1.229\ V \tag{2.9}$$

avec :
— $\Delta G = 237.2\ kJ/mol$;
— $z = 2$;
— $F = 96485\ C/mol$.
Cette tension correspond au potentiel réversible de l'électrolyse.

b) Tension thermoneutre

$$U_{th} = \frac{\Delta H}{zF} = \frac{286000}{2 \times 96485} \approx 1.48\ V \tag{2.10}$$

TABLE 2.2 – Récapitulatif des grandeurs thermodynamiques clés.

Grandeur	**Valeur**
Enthalpie de réaction ΔH	286 kJ/mol
Énergie libre de Gibbs ΔG	237,2 kJ/mol
Énergie électrique requise	$\approx$ 235 kJ/mol
Entropie ($T\Delta S$)	$\approx$ 49 kJ/mol
Tension réversible E_{th}	1,229 V
Tension thermoneutre U_{th}	1,48 V

c) Tension réelle de cellule et surtensions

La tension réelle d'une cellule électrolytique est donnée par :

$$U_{cellule} = E_{th} + \eta_a + |\eta_c| + J\,R_\Omega \tag{2.11}$$

où :
— η_a : surtension anodique ;
— η_c : surtension cathodique ;
— J : densité de courant ($\mathrm{A/cm^2}$) ;
— R_Ω : résistance surfacique spécifique ($\Omega.cm^2$).

TABLE 2.3 – Tension de cellule en fonction de la densité de courant.

Densité de courant J ($\mathbf{mA/cm^2}$)	**Tension de cellule U (V)**
200	1.8
300	2.0
400	2.1
600	2.4

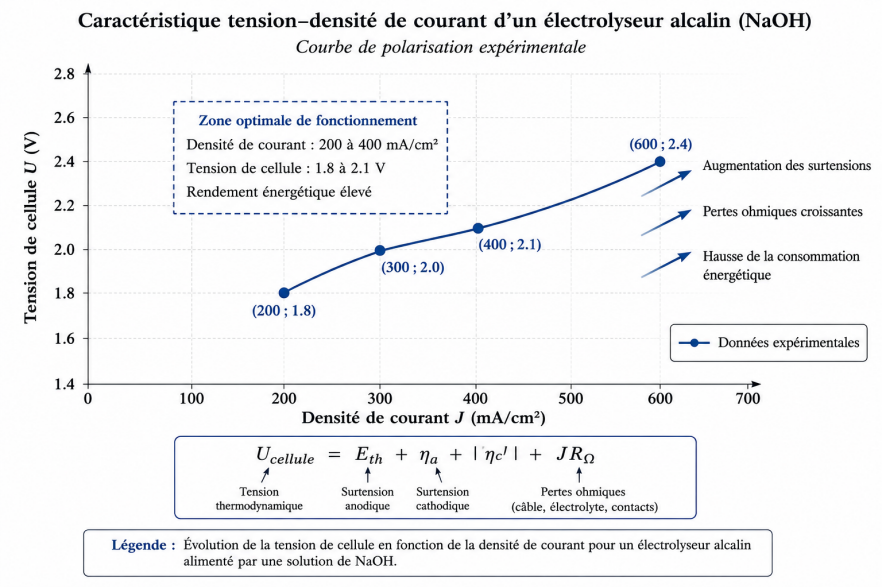


FIGURE 2.6 – Abaque caractéristiques tension/densité de courant de l'électrolyseur alcalin.

d) Rendement énergétique global

Le rendement énergétique global de l'électrolyseur est donné par :

$$\eta_{elec} = \left(\frac{U_{th}}{U_{cellule}}\right) \times \eta_F = \left(\frac{1.48}{2.0}\right) \times 0.947 = 0.701 = 70.1\% \qquad (2.12)$$

Ce rendement est cohérent avec les valeurs généralement rapportées dans la littérature pour les électrolyseurs alcalins de laboratoire, comprises entre 60 et 80 %.

2.5 Choix technologique : l'électrolyseur alcalin (AEC)

La production d'hydrogène par électrolyse de l'eau peut être réalisée à l'aide de plusieurs technologies. Les plus développées actuellement sont l'électrolyse alcaline (AEC), l'électrolyse à membrane échangeuse de protons (PEMEC) et l'électrolyse à oxyde solide (SOEC). Chacune de ces technologies présente des caractéristiques propres en termes de rendement énergétique, de densité de courant, de coût d'investissement, de durée de vie et de complexité de mise en œuvre.

Dans le cadre de ce projet, une analyse comparative a été menée afin de sélectionner la technologie la plus adaptée à la production d'hydrogène vert destiné au système hybride de stockage énergétique du séchoir solaire développé.

2.5.1 Technologies d'électrolyse disponibles

Électrolyseur alcalin (AEC – Alkaline Electrolysis Cell)

L'électrolyseur alcalin est la technologie d'électrolyse la plus ancienne et la plus mature industriellement. Son principe repose sur l'utilisation d'un électrolyte liquide fortement alcalin, généralement une solution d'hydroxyde de potassium (KOH) ou d'hydroxyde de sodium (NaOH) dont la concentration varie généralement entre 25 et 40 % en masse.

Le fonctionnement s'effectue à des températures modérées comprises entre 50 et 90 °C. Les densités de courant typiques se situent entre 200 et 400 mA/cm^2, tandis que les rendements énergétiques sont généralement compris entre 60 et 80 %.

Cette technologie se distingue par sa robustesse, sa fiabilité, sa longue durée de vie ainsi que son faible coût de fabrication. Les électrodes sont généralement réalisées à partir de matériaux courants tels que l'acier inoxydable ou le nickel, ce qui contribue à réduire les coûts d'investissement et de maintenance [15, 16].

Électrolyseur à membrane échangeuse de protons (PEM)

L'électrolyseur à membrane échangeuse de protons (PEM) utilise une membrane polymère solide, généralement de type Nafion®, qui assure simultanément la conduction protonique et la séparation des gaz produits.

Cette technologie permet d'atteindre des densités de courant élevées, généralement comprises entre 1000 et 2000 mA/cm^2, conduisant à des systèmes plus compacts et mieux adaptés aux variations rapides de puissance. Elle présente également l'avantage de produire un hydrogène de très haute pureté.

Cependant, son coût reste relativement élevé en raison de l'utilisation de catalyseurs à base de métaux nobles tels que le platine (Pt) et l'iridium (Ir), nécessaires pour garantir de bonnes performances électrochimiques [17].

Électrolyseur à oxyde solide (SOEC)

L'électrolyseur à oxyde solide (Solid Oxide Electrolysis Cell – SOEC) utilise un électrolyte céramique conducteur d'ions oxygène, généralement constitué de zircone stabilisée à l'yttrium (YSZ).

Cette technologie fonctionne à très haute température, généralement entre 600 et 1000 °C. L'apport de chaleur permet de réduire la consommation électrique nécessaire à l'électrolyse et d'améliorer les rendements thermodynamiques, pouvant atteindre plus de 90 %.

Malgré ses performances prometteuses, la technologie SOEC demeure encore principalement au stade de la recherche et du développement. Les contraintes liées aux matériaux, aux cycles thermiques et à la durabilité limitent actuellement son déploiement industriel à grande échelle [30].

2.5.2 Analyse comparative et justification du choix

Afin d'identifier la technologie la plus adaptée aux objectifs du projet, une comparaison des principales caractéristiques des électrolyseurs AEC, PEM et SOEC a été réalisée. Les résultats sont présentés dans le Tableau 2.4.

TABLE 2.4 – Comparaison des principales technologies d'électrolyse de l'eau

Critère	**AEC**	**PEM**	**SOEC**
Maturité technologique	Commerciale	Commerciale récente	R&D / Pilote
Température	50–90 °C	50–80 °C	600–1000 °C
Électrolyte	KOH / NaOH liquide	Membrane Nafion®	Céramique (YSZ)
Densité de courant	200–400 mA/cm^2	1000–2000 mA/cm^2	300–1000 mA/cm^2
Rendement	60–80 %	65–85 %	80–95 %
Pureté H_2	99.5–99.9 %	99.99 %	99.9 %
Catalyseurs	Ni, acier inox	Pt, Ir	Ni-YSZ, pérovskites
Durée de vie	60 000–100 000 h	20 000–60 000 h	$<$20 000 h
Coût d'investissement	Faible	Élevé	Très élevé
Complexité de fabrication	Faible	Moyenne	Élevée

L'analyse comparative met en évidence que l'électrolyseur alcalin constitue la solution la plus adaptée au présent projet. Son faible coût de fabrication, la disponibilité des matériaux nécessaires à sa réalisation, sa robustesse ainsi que sa grande maturité technologique représentent des avantages déterminants dans le cadre d'une application expérimentale alimentée par énergie solaire photovoltaïque.

Le choix de cette technologie est également motivé par la simplicité de sa mise en œuvre dans un laboratoire universitaire. Contrairement aux électrolyseurs PEM, elle ne nécessite pas l'utilisation de métaux nobles coûteux ni de membranes spécifiques. De plus, son fonctionnement à basse température et à faible pression améliore la sécurité globale du système.

Enfin, l'objectif principal de ce projet est la production d'hydrogène destiné au stockage d'énergie et à l'alimentation d'un brûleur hybride pour le séchoir solaire. Une pureté extrêmement élevée de l'hydrogène n'est donc pas indispensable. Les performances offertes par la technologie alcaline répondent ainsi pleinement aux exigences techniques et économiques du prototype développé.

Par conséquent, l'électrolyseur alcalin (AEC) apparaît comme le meilleur compromis entre coût, simplicité de fabrication, fiabilité et performances, justifiant son adoption pour la réalisation du système expérimental présenté dans ce mémoire.

2.6 Description détaillée de l'électrolyseur réalisé

L'électrolyseur développé dans le cadre de ce projet a été conçu pour assurer la production d'hydrogène vert à partir de l'énergie électrique fournie par le système photovoltaïque. La conception retenue privilégie la simplicité de fabrication, la disponibilité des matériaux, la sécurité de fonctionnement ainsi que la facilité de maintenance. L'ensemble du dispositif est constitué d'une cuve principale compartimentée, d'un système d'électrodes en acier inoxydable, d'un réseau de collecte des gaz et d'un circuit de raccordement électrique adapté aux conditions de fonctionnement du prototype.

2.6.1 Architecture générale du prototype

Le réacteur est constitué d'une cuve rectangulaire réalisée à partir d'un matériau plastique isolant de type glacière. Ce choix a été motivé par sa bonne résistance chimique vis-à-vis de la solution alcaline utilisée comme électrolyte, son excellente étanchéité et ses propriétés d'isolation thermique.

L'intérieur de la cuve est subdivisé en huit compartiments électrochimiques successifs. Cette compartimentation est réalisée à l'aide de plaques séparatrices en plexiglas assurant la séparation physique entre les différentes chambres de réaction.

Contrairement à une cloison totalement étanche, les séparateurs ne sont pas en contact avec le fond de la cuve. Un espace libre est volontairement

conservé entre la base des cloisons et le fond du réacteur afin de permettre la circulation de l'électrolyte et le déplacement des ions hydroxyles OH^- entre les différents compartiments. Cette configuration garantit que l'ensemble des électrodes demeure immergé dans une solution électrolytique commune tout en limitant le mélange direct des gaz produits.

Chaque compartiment est équipé dans sa partie supérieure d'un orifice destiné à la collecte du gaz généré au niveau de l'électrode correspondante. Un robinet individuel est également installé sur chaque chambre afin de faciliter l'introduction de la solution électrolytique et les opérations de remplissage, de vidange ou de maintenance.

Cette architecture modulaire permet une production répartie des gaz tout en facilitant l'exploitation et le contrôle du système.



FIGURE 2.7 – Vue générale de l'électrolyseur montrant la cuve principale, les compartiments électrochimiques et les principaux éléments de construction avant assemblage.

2.6.2 Système d'électrodes

Le système électrochimique est constitué de huit plaques en acier inoxydable disposées verticalement à l'intérieur des différents compartiments.

L'acier inoxydable a été retenu pour sa bonne conductivité électrique, sa résistance à la corrosion dans les milieux alcalins et sa disponibilité sur le

marché local. Les électrodes sont montées suivant une configuration alternée :

[Cathode - Anode - Cathode - Anode - Cathode - Anode - Cathode - Anode]

Cette disposition permet de créer plusieurs cellules électrochimiques fonctionnant simultanément au sein du même réacteur.

Chaque électrode est équipée de deux bornes de connexion traversant le couvercle de la cuve. Ces connexions assurent à la fois la fixation mécanique des plaques et le raccordement électrique vers l'extérieur de l'électrolyseur.

L'ensemble des cathodes est relié au pôle négatif de l'alimentation tandis que l'ensemble des anodes est relié au pôle positif. Cette architecture permet une répartition homogène du courant électrique sur l'ensemble des surfaces actives et favorise une production uniforme d'hydrogène et d'oxygène.



FIGURE 2.8 – Disposition interne des électrodes en acier inoxydable et des séparateurs en plexiglas.

2.6.3 Séparation des gaz et circulation ionique

La séparation des gaz est assurée par les cloisons en plexiglas disposées entre les différentes chambres électrochimiques. Ces séparateurs limitent le contact direct entre les zones de production d'hydrogène et d'oxygène.

Le fonctionnement repose sur la circulation des ions hydroxyles OH^- à travers l'espace libre situé sous les séparateurs. Les ions peuvent ainsi se déplacer d'une chambre à l'autre tout en maintenant la continuité électrique du bain électrolytique.

Cette solution permet d'obtenir une architecture simple et économique tout en conservant un fonctionnement électrochimique satisfaisant.

Remarque technique : contrairement aux électrolyseurs industriels équipés de membranes échangeuses d'ions ou de diaphragmes spécialisés, le système développé ne réalise pas une séparation parfaite des gaz. Une contamination croisée partielle entre l'hydrogène et l'oxygène peut donc apparaître. Pour cette raison, une étape de purification et de sécurisation du gaz est prévue en aval de l'électrolyseur avant son stockage ou son utilisation.

2.6.4 Configuration électrique du réacteur

L'alimentation électrique du système est assurée par une source continue de 12 V provenant du système photovoltaïque et de son dispositif de stockage.

Les caractéristiques électrochimiques de l'électrolyse de l'eau montrent qu'une tension optimale de fonctionnement d'environ 3 V est nécessaire pour chaque cellule afin de compenser les surtensions électrochimiques et les pertes ohmiques.

Le réacteur a donc été conçu de manière à former quatre cellules électrochimiques alimentées en parallèle. Chaque cellule fonctionne sous une tension voisine de 3 V, tandis que la source principale fournit une tension globale de 12 V.

Cette configuration présente plusieurs avantages :

— meilleure répartition du courant électrique ;
— réduction des pertes énergétiques ;
— amélioration de la stabilité du fonctionnement ;
— augmentation de la production globale d'hydrogène ;
— compatibilité avec l'alimentation photovoltaïque disponible.

2.6.5 Réseau de collecte des gaz

Le système de collecte assure la récupération et l'acheminement des gaz produits vers les unités de traitement et de stockage.

Chaque compartiment possède un orifice de sortie situé dans sa partie supérieure afin de capter les bulles de gaz générées lors de l'électrolyse. Les gaz sont ensuite transportés à travers un réseau de raccords traversants en laiton et de tuyaux souples assurant leur transfert vers les collecteurs principaux.

Afin de distinguer clairement les deux circuits, une identification visuelle a été adoptée :

— tuyaux rouges pour le circuit d'hydrogène ;

— tuyaux bleus pour le circuit d'oxygène.

Une vanne à boisseau sphérique en laiton est installée sur la ligne d'hydrogène afin de permettre l'isolement du système de stockage lors des opérations de maintenance ou de sécurité. Les différents conduits convergent ensuite vers des collecteurs communs (*manifolds*) assurant la centralisation et la distribution des flux gazeux.

Cette architecture garantit une collecte efficace des gaz produits tout en limitant les risques de fuite et de mélange accidentel.



FIGURE 2.9 – Réseau externe de collecte des gaz comprenant les raccords en laiton, les conduites d'hydrogène et d'oxygène ainsi que les dispositifs d'isolement et de raccordement.

2.7 Dimensionnement électrique de l'électrolyseur

Le dimensionnement électrique constitue une étape essentielle dans la conception d'un électrolyseur, car il permet de déterminer les conditions de fonctionnement assurant une production efficace d'hydrogène tout en limitant les pertes énergétiques et les contraintes imposées aux composants électrochimiques.

L'électrolyseur réalisé dans le cadre de ce projet est alimenté par une source de courant continu issue du système photovoltaïque. L'alimentation utilisée fournit une tension nominale de 12 V pour une puissance maximale de 300 W.

2.7.1 Détermination du courant maximal

La puissance électrique disponible étant connue, le courant maximal théorique peut être déterminé à partir de la relation :

$$P = U \times I \tag{2.13}$$

d'où :

$$I = \frac{P}{U} \tag{2.14}$$

En remplaçant par les valeurs du système :

$$I = \frac{300}{12} \tag{2.15}$$

$$I = 25\ A \tag{2.16}$$

Ainsi, le courant maximal théorique pouvant être fourni à l'électrolyseur est de 25 A.

2.7.2 Tension de fonctionnement des cellules

La tension thermodynamique minimale nécessaire à la décomposition de l'eau est égale à 1,23 V. Cependant, les surtensions électrochimiques ainsi que les pertes ohmiques conduisent à une tension réelle de fonctionnement comprise entre 1,8 et 2,4 V pour les électrolyseurs alcalins [15, 18].

Dans cette étude, une tension de fonctionnement voisine de 3 V par cellule a été retenue afin de garantir une production stable d'hydrogène et de compenser les différentes pertes du système.

2.7.3 Surface active des électrodes

La production d'hydrogène dépend directement de la densité de courant appliquée aux électrodes. Cette grandeur est définie par :

$$J = \frac{I}{S} \tag{2.17}$$

où :
— J est la densité de courant (A/cm^2) ;
— I est le courant électrique (A) ;
— S est la surface active de l'électrode (cm^2).

Pour les électrolyseurs alcalins, la littérature recommande généralement une plage de fonctionnement comprise entre 200 et 400 mA/cm^2 afin d'obtenir un compromis satisfaisant entre rendement énergétique et durée de vie des électrodes [18].

Le fonctionnement du prototype a donc été dimensionné de manière à maintenir la densité de courant dans cette plage optimale.

2.7.4 Puissance consommée par l'électrolyseur

La puissance électrique absorbée par l'électrolyseur est donnée par :

$$P_{elec} = U_{cellule} \times I \tag{2.18}$$

Cette puissance est ensuite convertie en énergie chimique stockée sous forme d'hydrogène conformément aux lois de Faraday présentées précédemment.

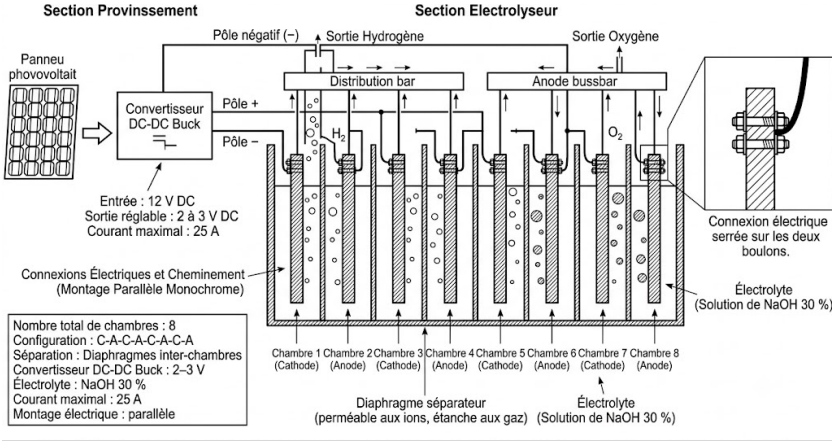


FIGURE 2.10 – Principe du dimensionnement électrique de l'électrolyseur montrant la relation entre tension, courant, densité de courant et production d'hydrogène.

L'analyse du dimensionnement électrique montre que l'alimentation retenue est compatible avec les besoins énergétiques du prototype et permet d'assurer une production stable d'hydrogène dans les conditions de fonctionnement prévues.

2.7.5 Estimation de la production théorique d'hydrogène

Afin d'évaluer les performances potentielles du prototype, une estimation de la production théorique d'hydrogène a été réalisée à partir des lois de Faraday.

Le débit molaire d'hydrogène est donné par :

$$\dot{n}_{H_2} = \frac{\eta_F I}{2F} \tag{2.19}$$

où :

— $\eta_F = 0.947$ est le rendement faradique ;
— $I = 25$ A est le courant maximal ;
— $F = 96485$ C/mol est la constante de Faraday.

Le débit molaire obtenu est :

$$\dot{n}_{H_2} = \frac{0.947 \times 25}{2 \times 96485} \tag{2.20}$$

$$\dot{n}_{H_2} = 1.227 \times 10^{-4}\ mol.s^{-1} \tag{2.21}$$

Le débit volumique est alors :

$$\dot{V}_{H_2} = \dot{n}_{H_2} \times 22.4 \times 3600 \tag{2.22}$$

$$\dot{V}_{H_2} = 9.9\ L.h^{-1} \tag{2.23}$$

La masse d'hydrogène produite par heure est :

$$\dot{m}_{H_2} = \dot{n}_{H_2} \times M_{H_2} \times 3600 \tag{2.24}$$

avec :

$$M_{H_2} = 2.016\ g/mol$$

d'où :

$$\dot{m}_{H_2} = 0.89\ g.h^{-1} \tag{2.25}$$

Ainsi, dans les conditions nominales de fonctionnement, l'électrolyseur est capable de produire approximativement :

— 0.89 g d'hydrogène par heure ;
— 9.9 L d'hydrogène par heure ;
— 237 L d'hydrogène par jour pour un fonctionnement continu de 24 heures.

Ces valeurs constituent des estimations théoriques. La production réelle peut être légèrement inférieure en raison des pertes électriques, des surtensions électrochimiques et des conditions réelles d'exploitation du prototype.

TABLE 2.5 – Performances théoriques de l'électrolyseur réalisé

Paramètre	Valeur
Tension d'alimentation	12 V
Puissance maximale	300 W
Courant maximal	25 A
Rendement faradique	94.7 %
Production massique de H_2	0.89 g/h
Production volumique de H_2	9.9 L/h
Production journalière (24 h)	237 L/j

2.8 Électrolyte alcalin : préparation et propriétés

L'électrolyte constitue un élément essentiel du fonctionnement d'un électrolyseur alcalin. Son rôle principal est d'assurer la conduction ionique entre les électrodes, de réduire la résistance interne de la cellule et de favoriser les réactions électrochimiques responsables de la production d'hydrogène et d'oxygène. Dans le cadre de ce projet, l'hydroxyde de sodium (NaOH) a été retenu comme électrolyte en raison de sa disponibilité locale, de son faible coût et de sa compatibilité avec les matériaux utilisés dans le prototype [16, 18].

2.8.1 Choix du NaOH comme électrolyte

L'hydroxyde de sodium est une base forte qui se dissocie totalement dans l'eau selon la réaction :

$$NaOH \rightarrow Na^{+} + OH^{-} \tag{2.26}$$

Les ions hydroxyles OH^{-} assurent le transport des charges électriques à travers l'électrolyte et participent directement aux réactions électrochimiques de l'électrolyse alcaline.

Le NaOH a été retenu pour :

— sa disponibilité sur le marché local ;
— son faible coût ;
— sa bonne stabilité chimique ;
— sa compatibilité avec les électrodes en acier inoxydable ;
— sa conductivité ionique satisfaisante.

La conductivité électrique d'une solution de NaOH dépend principalement de sa concentration et de sa température. Pour une concentration de 30 % massique et une température d'environ 60 °C, la conductivité peut atteindre :

$$\sigma \approx 0.35\ S\,cm^{-1} \tag{2.27}$$

Les études consacrées aux électrolyseurs alcalins montrent que la conductivité du NaOH atteint un maximum pour des concentrations comprises entre 30 % et 35 % massique [18]. Pour cette raison, une concentration de 30 % massique a été retenue pour le fonctionnement du prototype.

2.8.2 Préparation de la solution électrolytique

La solution électrolytique est préparée à partir de granulés de NaOH de pureté 99 % et d'eau distillée.

Les quantités utilisées sont :

— Masse de NaOH : 1.5 kg ;
— Volume d'eau distillée : 3.5 L ;
— Masse totale de solution : 5.0 kg.

La concentration massique est donnée par :

$$C_m = \frac{m_{NaOH}}{m_{solution}} \times 100 \tag{2.28}$$

soit :

$$C_m = \frac{1.5}{5.0} \times 100 = 30\ \% \tag{2.29}$$

La préparation de la solution s'effectue selon les étapes suivantes :

1. introduire le volume d'eau distillée nécessaire dans le récipient de préparation ;
2. ajouter progressivement le NaOH sous agitation ;
3. poursuivre l'agitation jusqu'à dissolution complète ;
4. laisser refroidir la solution ;
5. introduire l'électrolyte dans les différents compartiments de l'électrolyseur.

La dissolution du NaOH est fortement exothermique. L'enthalpie de dissolution est approximativement :

$$\Delta H_{diss} \approx -44.5\ kJ\,mol^{-1} \tag{2.30}$$

Après refroidissement, la densité de la solution obtenue est voisine de :

$$\rho \approx 1.33\ g\,cm^{-3} \tag{2.31}$$

Consignes de sécurité

L'hydroxyde de sodium est un produit fortement corrosif dont le pH est voisin de 14. Sa manipulation nécessite :

— le port de gants en nitrile ;
— le port de lunettes de sécurité ;
— le port d'un tablier ou d'une blouse de laboratoire ;
— un travail dans un local correctement ventilé.

Attention : il ne faut jamais verser l'eau sur le NaOH solide. Le NaOH doit toujours être ajouté progressivement dans l'eau afin d'éviter les projections dues à la réaction exothermique.

2.8.3 Influence de la distance inter-électrodes

La distance séparant deux électrodes consécutives influence directement la résistance électrique interne de la cellule et les pertes énergétiques associées.

La résistance électrique de l'électrolyte est donnée par :

$$R_{elec} = \frac{d}{\sigma A} \tag{2.32}$$

où :

— d représente la distance inter-électrodes ;

— σ la conductivité électrique de l'électrolyte ;

— A la surface active des électrodes.

Les pertes par effet Joule sont données par :

$$P_{Joule} = \frac{dI^2}{\sigma A} \tag{2.33}$$

Une augmentation de la distance inter-électrodes entraîne une augmentation de la résistance électrique et donc des pertes énergétiques. À l'inverse, une distance trop faible peut favoriser les courts-circuits et gêner la circulation des bulles gazeuses.

Dans le prototype réalisé, une distance moyenne de :

$$d \approx 10\ mm \tag{2.34}$$

a été retenue. Cette valeur représente un compromis satisfaisant entre performance électrochimique, sécurité électrique et simplicité de fabrication.

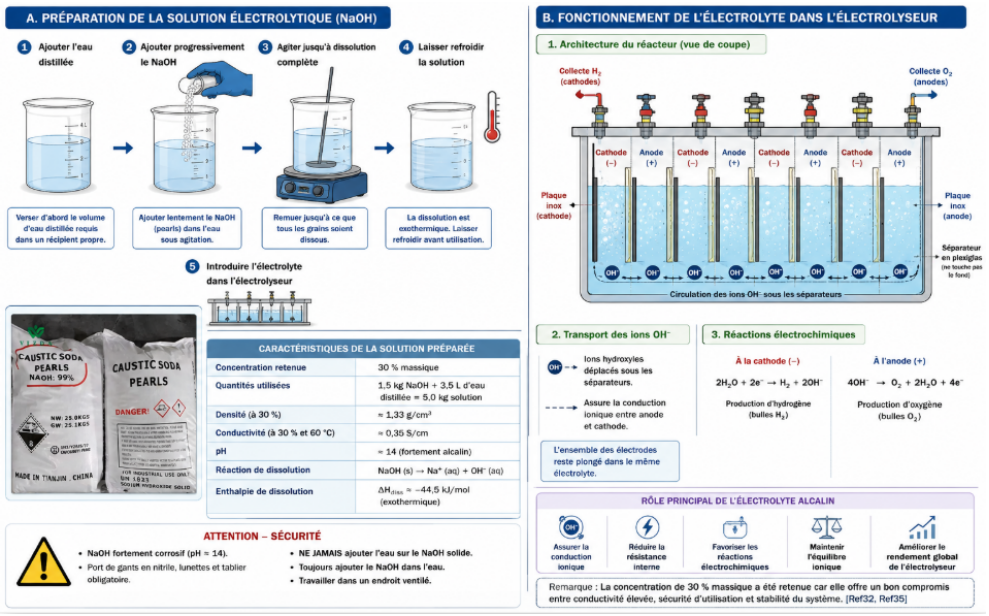


FIGURE 2.11 – Préparation et fonctionnement de l'électrolyte alcalin dans l'électrolyseur : dissolution du NaOH, transport des ions OH^- et conduction ionique entre les compartiments.

2.9 Système de purification catalytique de l'hydrogène

2.9.1 Nécessité de la purification

L'électrolyseur développé dans cette étude utilise des séparateurs physiques en plexiglas qui ne comportent pas de membrane échangeuse d'ions. Cette configuration simplifie la conception du système mais ne garantit pas une séparation parfaite entre l'hydrogène et l'oxygène produits.

Une contamination croisée partielle entre les deux gaz peut ainsi apparaître au cours du fonctionnement. La présence d'oxygène dans le flux d'hydrogène constitue un risque de sécurité important puisque les mélanges contenant de l'hydrogène présentent un domaine d'explosivité compris entre 4 % et 75 % dans l'air [31, 32].

Afin d'améliorer la pureté de l'hydrogène produit et de réduire les risques associés au stockage du gaz, un filtre catalytique a été intégré en aval de l'électrolyseur.

2.9.2 Description du filtre catalytique en tube de cuivre

Tube de cuivre

Le corps principal du filtre est constitué d'un tube de cuivre de diamètre compris entre 20 et 25 mm et de longueur comprise entre 200 et 250 mm.

Le cuivre a été choisi pour son excellente conductivité thermique :

$$\lambda_{Cu} \approx 385\ W\,m^{-1}\,K^{-1} \tag{2.35}$$

La surface du tube est noircie par oxydation afin de former une couche d'oxyde de cuivre (CuO) améliorant les échanges thermiques.

Catalyseur de remplissage

L'intérieur du tube est rempli d'un mélange d'oxydes métalliques jouant le rôle de catalyseur :

— oxyde de cuivre (CuO) ;
— dioxyde de manganèse (MnO_2) ;
— oxyde de fer (Fe_2O_3).

Le catalyseur favorise la réaction de recombinaison de l'oxygène résiduel avec l'hydrogène :

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O \tag{2.36}$$

L'oxygène contaminant est ainsi transformé en vapeur d'eau pouvant être éliminée ultérieurement par condensation.

Résistance chauffante externe

Une résistance électrique est enroulée autour du tube afin d'élever la température du catalyseur et d'accélérer la cinétique de réaction.

La température de fonctionnement visée est comprise entre :

$$150\ ^\circ C \leq T \leq 300\ ^\circ C \tag{2.37}$$



FIGURE 2.12 – Filtre catalytique en tube de cuivre comprenant le lit catalytique interne, la résistance chauffante externe et les raccordements d'entrée et de sortie du gaz.

2.9.3 Principe de fonctionnement

Le gaz provenant de l'électrolyseur traverse le tube catalytique chauffé. L'oxygène résiduel réagit avec l'hydrogène au contact du catalyseur pour former de la vapeur d'eau.

Le gaz sortant est ainsi enrichi en hydrogène et appauvri en oxygène, ce qui améliore simultanément la sécurité du système et la pureté du gaz produit.

2.9.4 Estimation des paramètres du filtre

Le volume interne du tube est estimé par :

$$V_{tube} = \left(\frac{\pi d_i^2}{4}\right) L = \left(\frac{\pi \times 1.8^2}{4}\right) \times 20 \approx 50.9\ cm^3 \tag{2.38}$$

Le temps de séjour du gaz dans le filtre est donné par :

$$\tau = \frac{V_{tube} \times \varepsilon}{\dot{V}(H_2)} = \frac{50.9 \times 0.4}{165} \approx 7.4\ s \tag{2.39}$$

où :
— $\varepsilon = 0.4$ représente la porosité du lit catalytique ;
— $\dot{V}(H_2)$ représente le débit volumique d'hydrogène.

La puissance de chauffage nécessaire pour maintenir la température de fonctionnement du catalyseur est estimée entre :

$$30\ W \leq P_{chauff} \leq 50\ W \tag{2.40}$$

L'intégration de ce filtre catalytique permet d'améliorer simultanément la sécurité du système et la pureté de l'hydrogène produit. Cette solution est particulièrement adaptée aux électrolyseurs à séparation physique, où une contamination croisée partielle entre l'hydrogène et l'oxygène peut apparaître au cours du fonctionnement [15, 31, 32].

2.10 Système de stockage de l'hydrogène

2.10.1 Problématique du stockage

Le stockage de l'hydrogène représente l'un des principaux défis associés à son utilisation comme vecteur énergétique. En raison de sa très faible densité volumique à pression atmosphérique, l'hydrogène nécessite généralement des techniques spécifiques permettant d'augmenter sa densité énergétique et d'assurer sa disponibilité au moment de son utilisation.

Les technologies conventionnelles de stockage comprennent principalement :

— le stockage sous haute pression (200 à 700 bar) ;
— le stockage cryogénique sous forme liquide à -253 °C ;
— le stockage solide par hydrures métalliques ;
— le stockage dans des matériaux adsorbants.

Bien que performantes, ces solutions nécessitent des équipements complexes, coûteux et difficilement compatibles avec un prototype expérimental de laboratoire. Afin de conserver une approche simple, économique et sécurisée, une solution alternative à basse pression a été développée dans le cadre de ce projet.

2.10.2 Solution adoptée : stockage par chambre à air de camion

Le système retenu repose sur l'utilisation d'une chambre à air de camion servant de réservoir souple pour l'hydrogène produit par l'électrolyseur.

La chambre à air est placée entre deux plateaux rigides en bois dont le poids exerce une légère compression sur le volume gazeux. Cette disposition permet :

— de maintenir une faible surpression comprise entre 0.2 et 0.5 bar ;

— de réguler naturellement la pression du stockage ;
— d'assurer une alimentation relativement stable du brûleur hybride ;
— de réduire les risques associés aux réservoirs métalliques haute pression ;
— de limiter considérablement le coût du système.

Le dispositif comprend :
— une chambre à air de camion ;
— une vanne d'entrée reliée à l'électrolyseur ;
— une vanne de sortie alimentant le brûleur H_2/GPL ;
— un capteur de pression permettant la surveillance du stockage ;
— deux plateaux rigides assurant la compression mécanique du réservoir.

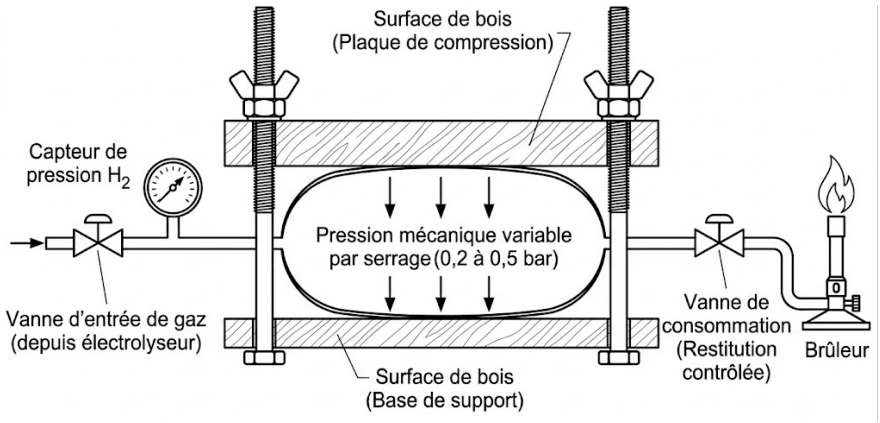


FIGURE 2.13 – Schéma du système de stockage d'hydrogène par chambre à air de camion comprimée entre deux plateaux rigides.

2.10.3 Estimation de la capacité de stockage

Le volume utile de stockage est estimé à :

$$V \approx 80\ L \tag{2.41}$$

En considérant une pression absolue moyenne :

$$P \approx 1.3\ bar \tag{2.42}$$

et une température ambiante :

$$T \approx 298\ K \tag{2.43}$$

la quantité de matière stockée est obtenue à partir de l'équation des gaz parfaits :

$$n(H_2) = \frac{PV}{RT} = \frac{1.3 \times 10^5 \times 80 \times 10^{-3}}{8.314 \times 298} = 4.20\ mol \tag{2.44}$$

La masse correspondante d'hydrogène est :

$$m(H_2) = n(H_2) \times M(H_2) = 4.20 \times 2.016 = 8.47\ g \tag{2.45}$$

L'énergie thermique théorique stockée est donnée par :

$$E_{th} = m(H_2) \times PCI = 8.47 \times 10^{-3} \times 120 \times 10^3 = 1016\ kJ \approx 0.282\ kWh \tag{2.46}$$

Pour un débit réel de production d'hydrogène de :

$$\dot{V}(H_2) = 9.90\ L.h^{-1} \tag{2.47}$$

le temps nécessaire au remplissage complet du réservoir est :

$$t_{remplissage} = \frac{80}{9.90} = 8.1\ h \tag{2.48}$$

2.10.4 Caractéristiques du système de stockage

TABLE 2.6 – Récapitulatif des caractéristiques du système de stockage

Paramètre	**Valeur estimée**
Type de réservoir	Chambre à air de camion
Volume utile	$\approx 80\ L$
Pression de stockage	$\approx 1.3\ bar$ absolu
Surpression moyenne	$\approx 0.3\ bar$
Quantité stockée	$4.20\ mol$
Masse stockée	$8.47\ g$
Énergie thermique stockée	$1016\ kJ$
Énergie équivalente	$0.282\ kWh$
Temps de remplissage	$\approx 8.1\ h$

2.10.5 Sécurité du stockage

Cette solution de stockage présente plusieurs avantages :
— absence de risque d'explosion mécanique lié à une haute pression ;
— fuite progressive en cas de perforation ;
— surveillance continue de la pression ;

— simplicité de maintenance ;
— faible coût de réalisation.

Toutefois, certaines précautions doivent être respectées :
— assurer une ventilation permanente du local ;
— éloigner les sources d'ignition ;
— contrôler régulièrement l'étanchéité des raccords ;
— surveiller l'état du caoutchouc ;
— maintenir la température ambiante inférieure à 60 °C.

2.11 Synthèse critique du prototype réalisé

2.11.1 Points forts

Le prototype développé au cours de cette étude présente plusieurs avantages techniques démontrant la faisabilité de l'intégration de l'hydrogène vert dans un système de séchage solaire hybride.

L'utilisation d'une cuve de type glacière comme réacteur électrochimique constitue une solution simple, économique et adaptée à un environnement alcalin. Cette configuration offre une bonne étanchéité ainsi qu'une isolation thermique satisfaisante.

La séparation physique des circuits hydrogène et oxygène, associée à une identification visuelle par code couleur, améliore la sécurité et facilite les opérations d'exploitation.

L'intégration du filtre catalytique en tube de cuivre chauffé permet de réduire la contamination résiduelle en oxygène et d'améliorer la qualité de l'hydrogène destiné au brûleur hybride.

Le système de stockage basse pression basé sur une chambre à air de camion représente une solution originale, économique et facilement réalisable dans le cadre d'un prototype expérimental.

L'association du brûleur hybride H_2/GPL assure la continuité du séchage même lorsque la production ou le stockage d'hydrogène devient insuffisant.

Enfin, la conception modulaire du système facilite l'intégration future d'une commande automatique basée sur un microcontrôleur Arduino Mega 2560.

2.11.2 Limites techniques

Malgré les résultats encourageants obtenus, plusieurs limitations ont été identifiées.

L'absence de membrane échangeuse d'ions dans l'électrolyseur favorise une contamination croisée partielle entre l'hydrogène et l'oxygène.

La capacité de stockage demeure limitée à environ 80 litres, ce qui réduit l'autonomie énergétique du système.

La chambre à air utilisée comme réservoir présente une certaine perméabilité naturelle à l'hydrogène pouvant entraîner des pertes lors d'un stockage prolongé.

La durabilité des matériaux vis-à-vis de la corrosion alcaline, du vieillissement des joints et des cycles répétés de fonctionnement n'a pas encore été évaluée expérimentalement.

Enfin, l'absence d'une instrumentation avancée (débitmètres, analyseurs de gaz, système d'acquisition de données) limite la précision de la caractérisation expérimentale.

2.11.3 Perspectives d'amélioration

Plusieurs améliorations peuvent être envisagées pour accroître les performances du système.

L'intégration d'un diaphragme ou d'une membrane séparatrice permettrait d'améliorer significativement la pureté de l'hydrogène produit.

L'utilisation de réservoirs métalliques basse ou moyenne pression (5 à 10 bar) permettrait d'augmenter la capacité énergétique disponible.

L'ajout de débitmètres massiques, d'analyseurs de gaz et de capteurs numériques améliorerait la précision des mesures expérimentales.

Une augmentation de la puissance électrique de l'électrolyseur par l'utilisation d'alimentations 24 V ou 48 V pourrait accroître le débit de production d'hydrogène.

L'optimisation du filtre catalytique par l'utilisation de catalyseurs plus performants constitue également une voie de recherche intéressante.

Enfin, l'intégration d'une commande intelligente basée sur Arduino Mega 2560 et MATLAB/Stateflow permettrait d'automatiser la gestion énergétique et la supervision du séchoir hybride.

2.12 Conclusion du chapitre

Ce chapitre a présenté l'étude, le dimensionnement et la réalisation de la chaîne hydrogène intégrée au séchoir solaire hybride. L'analyse bibliographique a permis de justifier le choix de l'électrolyse alcaline comme technologie de production d'hydrogène vert en raison de sa maturité industrielle, de sa simplicité de mise en œuvre et de son coût relativement faible.

Le prototype réalisé comprend un électrolyseur alcalin fonctionnant avec une solution de NaOH à 30 % massique, un système de purification catalytique destiné à améliorer la qualité du gaz produit ainsi qu'un dispositif de stockage basse pression utilisant une chambre à air de camion.

Le dimensionnement électrochimique a permis d'estimer une production réelle d'environ 9.90 $L.h^{-1}$ d'hydrogène avec un rendement faradique de 94.7 %.

Le système de stockage développé permet d'emmagasiner environ 8.47 g d'hydrogène, correspondant à une énergie thermique théorique de l'ordre de 1016 kJ, soit environ 0.282 kWh.

L'ensemble constitué par l'électrolyseur, le stockage, le filtre catalytique et le brûleur hybride H_2/GPL permet de transformer l'énergie solaire intermittente en une source thermique pilotable capable d'assurer la continuité du séchage durant les périodes de faible ensoleillement ou pendant la nuit.

Les résultats obtenus démontrent ainsi la faisabilité technique de l'intégration de l'hydrogène vert comme solution de stockage énergétique au sein d'un séchoir solaire hybride. Malgré certaines limitations liées au caractère expérimental du prototype, cette réalisation constitue une base solide pour le développement futur de systèmes de séchage autonomes, durables et adaptés aux régions à fort potentiel solaire.

Nomenclature du Chapitre 2

TABLE 2.7 – Nomenclature des symboles utilisés dans le chapitre

Symbole	**Désignation**	**Unité**
A	Surface active des électrodes	m^2
C_m	Concentration massique de l'électrolyte	%
d	Distance inter-électrodes	m
E_{th}	Tension théorique de décomposition de l'eau	V
$E_{th,stock}$	Énergie thermique stockée	kJ
F	Constante de Faraday (96485)	$C.mol^{-1}$
I	Intensité du courant électrique	A
J	Densité de courant	$A.m^{-2}$
$m(H_2)$	Masse d'hydrogène produite ou stockée	g
$M(H_2)$	Masse molaire de l'hydrogène	$g.mol^{-1}$
$n(H_2)$	Quantité de matière d'hydrogène	mol
P	Pression absolue	Pa
P_{chauff}	Puissance de chauffage du filtre catalytique	W
P_{Joule}	Pertes par effet Joule	W
PCI	Pouvoir calorifique inférieur de l'hydrogène	$kJ.kg^{-1}$
Q	Charge électrique transférée	C
R	Constante universelle des gaz parfaits	$J.mol^{-1}.K^{-1}$
R_{elec}	Résistance électrique de l'électrolyte	Ω
T	Température absolue	K
$t_{remplissage}$	Temps de remplissage du réservoir	h
$U_{cellule}$	Tension réelle de la cellule	V
U_{th}	Tension thermoneutre	V
V	Volume de stockage	m^3 ou L
$\dot{V}(H_2)$	Débit volumique d'hydrogène	$L.h^{-1}$
V_{tube}	Volume interne du filtre catalytique	cm^3
η_F	Rendement faradique	%
η_a	Surtension anodique	V
η_c	Surtension cathodique	V
ρ	Masse volumique ou densité	$g.cm^{-3}$
σ	Conductivité électrique de l'électrolyte	$S.cm^{-1}$
τ	Temps de séjour dans le filtre catalytique	s
ε	Porosité du lit catalytique	–
λ_{Cu}	Conductivité thermique du cuivre	$W.m^{-1}.K^{-1}$

TABLE 2.8 – Abréviations utilisées dans le chapitre

Abréviation	**Signification**
AEC	Alkaline Electrolyzer Cell (Électrolyseur alcalin)
PEM	Proton Exchange Membrane
SOEC	Solid Oxide Electrolyzer Cell
NaOH	Hydroxyde de sodium
H_2	Hydrogène
O_2	Oxygène
OH^-	Ion hydroxyde
PCI	Pouvoir Calorifique Inférieur
GPL	Gaz de Pétrole Liquéfié
FSM	Finite State Machine

Chapitre 3

Conception et Dimensionnement du Séchoir Solaire Hybride

3.1 Introduction

Dans un contexte marqué par les défis de la sécurité alimentaire, de la transition énergétique et de la réduction des pertes post-récolte, le séchage des produits agricoles apparaît comme l'une des techniques de conservation les plus efficaces et les plus répandues. En réduisant la teneur en eau des produits, le séchage permet de limiter les phénomènes de dégradation microbiologique, enzymatique et chimique tout en augmentant significativement leur durée de conservation [21, 26].

Les méthodes traditionnelles de séchage, reposant principalement sur l'exposition directe au rayonnement solaire, demeurent largement utilisées dans de nombreuses régions du monde en raison de leur simplicité et de leur faible coût. Toutefois, ces techniques présentent plusieurs limites telles qu'une forte dépendance aux conditions climatiques, une faible maîtrise des paramètres de séchage, une exposition des produits aux contaminants extérieurs ainsi qu'une dégradation potentielle de leurs qualités nutritionnelles et organoleptiques [27, 33]. Selon l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO), les pertes post-récolte peuvent atteindre près de 30 % de la production agricole mondiale, particulièrement dans les pays en développement où les infrastructures de conservation restent limitées [28].

Face à ces contraintes, les technologies de séchage solaire se sont imposées comme une alternative durable permettant de valoriser une source d'énergie renouvelable, abondante et gratuite. Les séchoirs solaires permettent d'améliorer les conditions de séchage tout en réduisant la consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre associées à l'utilisation des com-

bustibles fossiles [34, 35]. Néanmoins, leur principal inconvénient demeure l'intermittence du rayonnement solaire, qui limite leur fonctionnement durant les périodes nuageuses et pendant les heures nocturnes.

Afin de surmonter cette limitation, plusieurs travaux de recherche se sont orientés vers le développement de systèmes de séchage hybrides combinant l'énergie solaire à des sources thermiques d'appoint [36, 29]. Dans cette perspective, l'hydrogène vert apparaît aujourd'hui comme une solution particulièrement prometteuse. Produit par électrolyse de l'eau à partir d'électricité renouvelable, il constitue un vecteur énergétique propre permettant de stocker l'énergie solaire sous forme chimique et de la restituer ultérieurement sous forme de chaleur [11, 13, 14].

Le système proposé dans le présent mémoire est un séchoir solaire hybride conçu pour répondre à la problématique de l'intermittence énergétique tout en assurant un fonctionnement autonome et respectueux de l'environnement. L'originalité de l'approche réside dans l'intégration d'une chaîne énergétique complète comprenant un système photovoltaïque, un électrolyseur alcalin, un dispositif de stockage d'hydrogène et un brûleur hybride H_2/GPL. Comme présenté dans le chapitre précédent, l'électricité produite par les panneaux photovoltaïques alimente l'électrolyseur qui génère l'hydrogène vert destiné au stockage énergétique.

Le système développé fonctionne selon trois modes complémentaires :

— le mode solaire direct utilisant exclusivement l'énergie thermique fournie par le capteur solaire ;

— le mode hydrogène vert exploitant l'énergie stockée sous forme d'hydrogène pour assurer l'appoint thermique ;

— le mode secours GPL garantissant la continuité du processus de séchage lorsque les ressources solaires et les réserves d'hydrogène deviennent insuffisantes.

La Figure 3.1 présente l'architecture fonctionnelle générale du séchoir solaire hybride ainsi que la démarche méthodologique adoptée pour son dimensionnement. Elle met en évidence les différentes sources d'énergie mobilisées, les principaux sous-systèmes ainsi que les flux énergétiques intervenant dans le fonctionnement global de l'installation.

Une caractéristique essentielle de la conception proposée réside dans le principe du non-mélange entre les produits de combustion et l'air de séchage. Les gaz issus de la combustion de l'hydrogène ou du GPL sont confinés dans un compartiment spécifique tandis que la chaleur est transférée à l'air de séchage à travers une paroi métallique par conduction et rayonnement thermique. Cette séparation garantit la qualité sanitaire des produits séchés en évitant toute contamination liée aux gaz de combustion [4, 5].

Par ailleurs, la chambre de séchage est équipée d'un vitrage transparent

permettant de bénéficier simultanément de l'effet de serre solaire et de l'apport thermique fourni par le système hybride. Cette configuration améliore le rendement énergétique global du séchoir tout en assurant une meilleure homogénéité thermique à l'intérieur de la chambre.

L'un des atouts majeurs du système réside dans le stockage de l'énergie sous forme d'hydrogène. Contrairement aux batteries électrochimiques dont la capacité de stockage et la durée de vie demeurent limitées, l'hydrogène offre une solution flexible permettant le stockage à long terme de l'énergie renouvelable [13, 14]. Cette caractéristique rend le séchoir particulièrement adapté aux zones rurales isolées, aux exploitations agricoles autonomes ainsi qu'aux régions bénéficiant d'un fort potentiel solaire.

L'objectif principal de ce chapitre est de présenter la démarche de conception et de dimensionnement du séchoir solaire hybride développé dans cette étude. Les différentes étapes abordées concernent :

— l'analyse des besoins et l'établissement du cahier des charges fonctionnel ;
— la modélisation thermique et énergétique du processus de séchage ;
— le dimensionnement de la chambre de séchage ;
— le dimensionnement du capteur solaire thermique ;
— le dimensionnement du système de chauffage hybride H_2/GPL ;
— le dimensionnement du circuit aéraulique et des équipements de ventilation ;
— l'évaluation des performances énergétiques attendues du système.

Ce chapitre constitue ainsi le fondement de la conception du prototype réalisé et fournit l'ensemble des éléments techniques nécessaires à sa réalisation pratique, présentée dans le chapitre suivant.

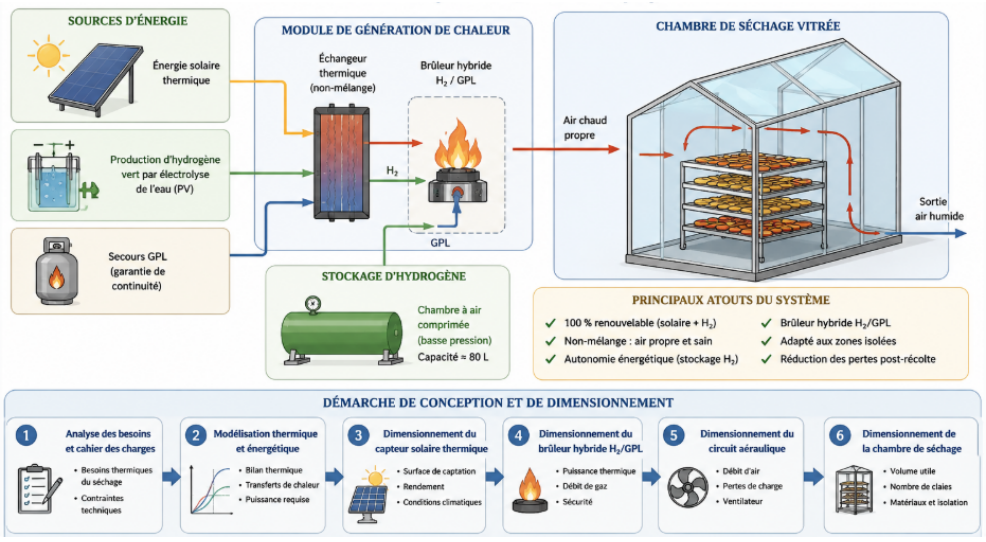


FIGURE 3.1 – Architecture fonctionnelle et démarche de conception du séchoir solaire hybride intégrant l'hydrogène vert.

3.2 Cahier des Charges Fonctionnel

Le cahier des charges fonctionnel constitue l'étape préliminaire du processus de conception du séchoir solaire hybride. Il permet de définir les besoins à satisfaire, les contraintes techniques et environnementales ainsi que les exigences de performance auxquelles devra répondre le système développé. Les spécifications retenues sont établies à partir des exigences de séchage des produits agricoles, des conditions climatiques du site d'implantation et des contraintes liées à l'utilisation de l'énergie solaire et de l'hydrogène vert [21, 28, 34, 13].

3.2.1 Analyse des besoins

Besoins de séchage

Le système est destiné au séchage de produits agroalimentaires variés tels que les fruits, les légumes, les plantes aromatiques et médicinales ainsi que différents produits végétaux. L'objectif principal est d'assurer une réduction contrôlée de la teneur en eau afin de prolonger la durée de conservation tout en préservant la qualité nutritionnelle et organoleptique des produits [21, 26].

La teneur en eau initiale des produits frais varie généralement entre 70 % et 95 % sur base humide, tandis que la teneur finale visée après séchage

est comprise entre 10 % et 20 %, conformément aux recommandations de conservation de la FAO [28].

Le procédé retenu est un séchage convectif indirect à air chaud. Dans cette configuration, l'air de séchage ne présente aucun contact direct avec les gaz de combustion issus du brûleur, garantissant ainsi la qualité sanitaire des produits séchés.

Contraintes thermiques et aérauliques

Les performances du séchoir sont définies à partir des paramètres thermiques et aérauliques suivants :

- Température de séchage : comprise entre 45 et 70 °C avec une température nominale de fonctionnement fixée à 55 °C.
- Vitesse de l'air au niveau des produits : comprise entre 0.5 et 1.0 $m.s^{-1}$, avec une valeur nominale de 0.6 $m.s^{-1}$.
- Débit d'air de séchage : compris entre 80 et 200 $m^3.h^{-1}$ selon la charge introduite dans le séchoir.

Ces valeurs permettent d'assurer un transfert thermique efficace tout en limitant les risques de dégradation des composés thermosensibles tels que les vitamines, pigments et enzymes [34, 35].

Contraintes climatiques du site

Le séchoir est conçu pour fonctionner dans les conditions climatiques des régions sahariennes algériennes caractérisées par un fort potentiel solaire.

Les principales données climatiques retenues pour le dimensionnement sont :

- Irradiation solaire globale : 5.5 à 7.5 $kWh.m^{-2}.jour^{-1}$;
- Température ambiante diurne : 30 à 45 °C ;
- Température ambiante nocturne : 10 à 25 °C ;
- Humidité relative moyenne : 20 à 40 % ;
- Présence fréquente de poussières et vents désertiques.

Ces conditions offrent un environnement particulièrement favorable au séchage solaire tout en imposant des exigences spécifiques concernant la protection des équipements et le maintien des performances thermiques [34].

Contraintes énergétiques

La source énergétique principale du système est l'énergie solaire thermique récupérée par un capteur solaire à air. En raison du caractère intermittent du rayonnement solaire, une source d'appoint thermique est nécessaire afin d'assurer la continuité du processus de séchage.

L'appoint énergétique est assuré prioritairement par l'hydrogène vert produit localement par électrolyse de l'eau et stocké pour une utilisation ultérieure. En cas d'insuffisance du stock d'hydrogène, un brûleur GPL assure la continuité du fonctionnement.

Contraintes de sécurité

La présence d'hydrogène et de GPL impose l'application de mesures de sécurité strictes afin de garantir un fonctionnement fiable et sans danger.

Les principales exigences retenues sont :

— Détection automatique des fuites d'hydrogène ;
— Fermeture immédiate des électrovannes en cas d'alarme ;
— Activation automatique de la ventilation de sécurité ;
— Coupure du brûleur en cas de surchauffe ;
— Retour automatique à un état sûr en cas de panne électrique (Fail-Safe).

Le système applique ainsi une stratégie de sécurité à tolérance zéro conforme aux recommandations relatives aux installations utilisant des gaz combustibles [31, 32].

3.2.2 Exigences fonctionnelles

Modes de fonctionnement

Le séchoir solaire hybride est conçu pour fonctionner selon trois modes hiérarchisés.

Mode solaire direct Ce mode constitue le mode de fonctionnement prioritaire. Le chauffage de l'air est assuré exclusivement par le capteur solaire thermique lorsque l'irradiation disponible permet d'atteindre la température de consigne.

Mode hydrogène vert Lorsque l'apport solaire devient insuffisant, l'énergie stockée sous forme d'hydrogène est utilisée pour alimenter le brûleur et maintenir la température de séchage. Ce mode permet un fonctionnement entièrement renouvelable du système.

Mode secours GPL En cas d'épuisement du stock d'hydrogène ou d'indisponibilité du système de production, le brûleur fonctionne au GPL afin d'assurer la continuité du séchage.

3.2.3 Synthèse du cahier des charges

TABLE 3.1 – Cahier des charges fonctionnel du séchoir solaire hybride

Fonction	**Paramètre**	**Valeur retenue**	**Justification**
Capacité	Masse par cycle	5 à 15 kg	Prototype semi-pilote
Température	Plage de séchage	45 à 70 °C	Recommandations FAO
Température	Valeur optimale	50 à 60 °C	Préservation de la qualité
Durée	Cycle complet	6 à 18 h	Séchage journalier
Aéraulique	Vitesse d'air	0.5 à 1.0 $m.s^{-1}$	Transfert thermique optimal
Aéraulique	Débit d'air	80 à 200 $m^3.h^{-1}$	Adapté à la capacité
Énergie	Solaire thermique	60 à 80 %	Ressource principale
Énergie	Hydrogène vert	20 à 40 %	Continuité énergétique
Énergie	GPL	Secours	Fiabilité du système
Autonomie	Durée d'appoint	4 à 8 h	Fonctionnement nocturne
Sécurité H_2	Détection de fuite	Obligatoire	Normes de sécurité gaz
Sécurité H_2	Coupure automatique	Oui	Protection active
Sécurité GPL	Électrovanne	Oui	Sécurité de fonctionnement
Commande	Régulation	Boucle fermée	Qualité du séchage
Commande	Supervision	T°, HR, pression gaz	Contrôle et sécurité

3.3 Dimensionnement énergétique

Le dimensionnement énergétique constitue une étape essentielle dans la conception du séchoir solaire hybride. Il permet d'évaluer les besoins thermiques nécessaires au séchage du produit ainsi que les dimensions des sous-systèmes énergétiques associés, notamment le capteur solaire thermique et le brûleur d'appoint. La tomate a été retenue comme produit de référence en raison de sa teneur en eau initiale particulièrement élevée (94 % sur base

humide), ce qui représente un cas de dimensionnement défavorable et donc conservatif pour la conception du système [21, 26].

3.3.1 Caractérisation du produit : la tomate

Les caractéristiques initiales retenues pour le dimensionnement sont les suivantes :

— Masse fraîche initiale : $M_i = 10$ kg ;
— Teneur en eau initiale : $X_i = 94$ % (base humide) ;
— Teneur en eau finale visée : $X_f = 10$ % (base humide).

La masse de matière sèche contenue dans le produit frais est obtenue par le bilan de matière :

$$M_{ms} = M_i(1 - X_i) = 10 \times 0.06 = 0.6\ kg \tag{3.1}$$

La masse finale du produit séché est alors :

$$M_f = \frac{M_{ms}}{1 - X_f} = \frac{0.6}{0.90} = 0.67\ kg \tag{3.2}$$

La quantité totale d'eau à évaporer pendant le séchage est :

$$M_{eau} = M_i - M_f = 10 - 0.67 = 9.33\ kg \tag{3.3}$$

Ce résultat montre que plus de 93 % de la masse initiale du produit doit être éliminée sous forme de vapeur d'eau. La tomate constitue ainsi un produit particulièrement exigeant du point de vue énergétique.

3.3.2 Évaluation des besoins énergétiques

L'énergie thermique nécessaire au séchage comprend l'énergie sensible permettant d'élever la température du produit jusqu'à la température de séchage, ainsi que l'énergie latente nécessaire à l'évaporation de l'eau contenue dans le produit.

$$Q_{besoin} = m_p C_{p,p} \Delta T + m_e L_v \tag{3.4}$$

où :

— $m_p = 10$ kg : masse du produit frais ;
— $C_{p,p} = 3571$ J.kg^{-1}.K^{-1} : capacité thermique massique de la tomate ;
— $\Delta T = 40$ K : élévation de température (15 à 55°C) ;
— $m_e = 9.33$ kg : masse d'eau à évaporer ;
— $L_v = 2.26 \times 10^6$ J.kg^{-1} : chaleur latente de vaporisation de l'eau.

L'énergie sensible est donnée par :

$$Q_{sensible} = 10 \times 3571 \times 40 = 1.43\ MJ \tag{3.5}$$

L'énergie latente nécessaire à l'évaporation est :

$$Q_{latente} = 9.33 \times 2.26 \times 10^6 = 21.08\ MJ \tag{3.6}$$

L'énergie utile totale requise pour le séchage devient :

$$Q_{besoin} = Q_{sensible} + Q_{latente} = 22.51\ MJ \approx 6.25\ kWh \tag{3.7}$$

On constate que l'énergie latente représente environ 94 % du besoin énergétique total, ce qui est caractéristique du séchage des produits fortement hydratés.

En considérant une consommation spécifique d'énergie moyenne de :

$$CSE = 6\ MJ/kg_{eau}$$

correspondant à un rendement global du séchoir de l'ordre de 35 % [34, 35], l'énergie totale à fournir au système est :

$$E_{total} = M_{eau} \times CSE = 9.33 \times 6 = 56\ MJ \approx 15.6\ kWh \tag{3.8}$$

Pour un cycle de séchage d'une durée de huit heures, la puissance thermique moyenne requise est :

$$P_{moyenne} = \frac{E_{total}}{t} = \frac{56 \times 10^6}{8 \times 3600} = 1944\ W \approx 2\ kW \tag{3.9}$$

Cette puissance constitue la référence de dimensionnement de l'ensemble des sous-systèmes thermiques du séchoir.

3.3.3 Dimensionnement du capteur solaire thermique

Le capteur solaire à air représente la source principale d'énergie thermique du système. Sa surface est calculée de manière à assurer environ 60 % des besoins énergétiques journaliers.

$$A_{cap} = \frac{Q_{besoin} \times f_{sol}}{G \times \eta_{cap} \times t} \tag{3.10}$$

avec :

— $Q_{besoin} = 22.51$ MJ ;
— $f_{sol} = 0.60$;
— $G = 900$ W.m^{-2} ;

— $\eta_{cap} = 0.55$;
— $t = 8$ h $= 28800$ s.

L'application numérique conduit à :

$$A_{cap} = \frac{22.51 \times 10^6 \times 0.60}{900 \times 0.55 \times 28800} = 0.95\ m^2 \tag{3.11}$$

Par mesure de sécurité, une surface normalisée de :

$$A_{cap} = 1.0\ m^2$$

a été retenue afin de tenir compte des pertes thermiques et des variations climatiques.

Le capteur adopté est un capteur plan à air, simple vitrage, muni d'un absorbeur métallique peint en noir mat ($\alpha \approx 0.95$) et d'une isolation thermique arrière destinée à limiter les pertes vers l'environnement.

3.3.4 Dimensionnement du brûleur hybride H_2/GPL

Le brûleur hybride assure la continuité du séchage lors des périodes de faible ensoleillement ou pendant les phases nocturnes.

Dans le cas défavorable d'une irradiation réduite à :

$$G_{min} = 400\ W.m^{-2}$$

pendant seulement quatre heures, l'énergie solaire récupérée est :

$$Q_{sol,min} = A_{cap} G_{min} \eta_{cap} t_{min} = 1 \times 400 \times 0.55 \times 14400 = 3.17\ MJ \tag{3.12}$$

L'énergie complémentaire à fournir par le brûleur est alors :

$$Q_{gaz} = Q_{besoin} - Q_{sol,min} = 22.51 - 3.17 = 19.34\ MJ \tag{3.13}$$

soit environ 86 % du besoin énergétique total.

Fonctionnement en mode hydrogène

Pour l'hydrogène, de pouvoir calorifique inférieur :

$$PCI_{H_2} = 120\ MJ.kg^{-1}$$

et avec un rendement de combustion de 90 %, la puissance thermique nécessaire est :

$$P_{gaz,H_2} = \frac{Q_{gaz}}{\eta_{comb} t_{min}} = 1489\ W \tag{3.14}$$

La masse d'hydrogène consommée par cycle est :

$$M_{H_2} = \frac{Q_{gaz}}{PCI_{H_2}\eta_{comb}} = 0.19\ kg/cycle \tag{3.15}$$

Fonctionnement en mode GPL

Pour le GPL (butane), de pouvoir calorifique inférieur :

$$PCI_{GPL} = 45.7\ MJ.kg^{-1}$$

et avec un rendement de combustion de 85 %, la consommation est :

$$M_{GPL} = \frac{Q_{gaz}}{PCI_{GPL}\eta_{comb}} = 0.50\ kg/cycle \tag{3.16}$$

Afin d'assurer une montée rapide en température et de compenser les pertes thermiques éventuelles, un brûleur hybride de puissance nominale :

$$P_{bruleur} = 5\ kW$$

a été retenu.

3.4 Dimensionnement aéraulique

Le circuit aéraulique assure le transport de la chaleur produite par le capteur solaire jusqu'à la chambre de séchage tout en évacuant l'humidité générée durant le procédé.

3.4.1 Débit massique d'air

Le débit massique d'air est obtenu à partir du bilan énergétique de l'air chauffé :

$$\dot{m}_{air} = \frac{P_{eff}}{C_{p,air}\Delta T} = \frac{1943}{1005 \times 40} = 0.048\ kg.s^{-1} \tag{3.17}$$

où :
— $C_{p,air} = 1005$ J.kg^{-1}.K^{-1} ;
— $\Delta T = 40$ K.

3.4.2 Débit volumique et choix du ventilateur

Le débit volumique correspondant est :

$$Q_v = \frac{\dot{m}_{air} \times 3600}{\rho_{air}} = \frac{0.048 \times 3600}{1.06} = 163 \ m^3.h^{-1} \tag{3.18}$$

avec :

$$\rho_{air} = 1.06 \ kg.m^{-3}$$

À partir d'une marge de sécurité de 20 %, le débit de conception retenu est :

$$Q_{v,design} = 200 \ m^3.h^{-1} \tag{3.19}$$

Ce débit peut être assuré par un ventilateur axial ou centrifuge à courant continu (12 ou 24 V), d'une puissance comprise entre 15 et 25 W, directement alimenté par le système photovoltaïque. L'utilisation d'un ventilateur DC permet une alimentation autonome, une régulation simple par PWM ainsi qu'une faible consommation électrique compatible avec le fonctionnement énergétique global du séchoir.

TABLE 3.2 – Synthèse du dimensionnement énergétique et aéraulique du séchoir solaire hybride

Paramètre	**Valeur retenue**
Masse initiale de tomates	10 kg
Teneur en eau initiale	94 % (b.h.)
Teneur en eau finale	10 % (b.h.)
Masse d'eau à évaporer	9.33 kg
Énergie utile de séchage	22.51 MJ (6.25 kWh)
Énergie totale requise	56 MJ (15.6 kWh)
Puissance thermique moyenne	1.94 kW
Fraction solaire retenue	60 %
Surface du capteur solaire	1.0 m^2
Irradiation nominale	900 $W.m^{-2}$
Rendement du capteur	55 %
Énergie solaire minimale disponible	3.17 MJ
Énergie d'appoint requise	19.34 MJ
Puissance thermique minimale du brûleur	1.49 kW
Puissance nominale du brûleur retenue	5 kW
Consommation d'hydrogène	0.19 kg/cycle
Consommation de GPL	0.50 kg/cycle
Débit massique d'air	0.048 $kg.s^{-1}$
Débit volumique calculé	163 $m^3.h^{-1}$
Débit volumique retenu	200 $m^3.h^{-1}$
Puissance du ventilateur	15 – 25 W

3.5 Dimensionnement de la chambre de séchage

La chambre de séchage constitue l'élément central du système, puisqu'elle assure le confinement du produit et le contact avec l'air chaud de séchage. Son dimensionnement doit garantir une répartition homogène du flux d'air sur l'ensemble des claies, un temps de séjour suffisant pour les échanges thermiques et massiques, ainsi qu'une capacité de chargement conforme aux

exigences définies dans le cahier des charges fonctionnel [21, 26, 28].

3.5.1 Surface active de séchage

La surface active de séchage est déterminée à partir de la charge surfacique admissible du produit. Pour le séchage de tomates découpées en tranches fines, les valeurs recommandées dans la littérature se situent généralement entre 5 et 8 kg.m^{-2} [21, 26]. Une valeur moyenne de :

$$\sigma = 7\ kg.m^{-2}$$

est retenue pour le dimensionnement.

La surface minimale nécessaire est alors :

$$S_{active} = \frac{M_p}{\sigma} = \frac{10}{7} = 1.43\ m^2 \tag{3.20}$$

Afin de faciliter la fabrication et d'assurer une bonne circulation de l'air entre les niveaux, cette surface est répartie sur plusieurs claies superposées. Une configuration composée de trois claies d'environ 0.50 m^2 chacune permet d'obtenir une surface totale proche de 1.5 m^2.

3.5.2 Volume utile de la chambre

Le volume utile de séchage est estimé à partir de la surface active et de l'épaisseur moyenne de la couche de produit :

$$V_u = S_{active} \times h_{moy} = 1.43 \times 0.10 = 0.143\ m^3 \tag{3.21}$$

où :

$$h_{moy} = 0.10\ m$$

représente la hauteur moyenne occupée par le produit sur les claies.

Le volume réel de la chambre doit également intégrer les espaces nécessaires à la circulation de l'air, aux supports mécaniques et aux zones de distribution du flux. Un coefficient d'aménagement de :

$$k = 2$$

est adopté.

Le volume total devient alors :

$$V_{tot} = V_u \times k = 0.143 \times 2 = 0.286\ m^3 \tag{3.22}$$

Pour des raisons constructives, une valeur normalisée comprise entre 0.25 et 0.30 m^3 est retenue pour la conception du prototype.

3.5.3 Dimensionnement des ouvertures d'air

Les sections d'entrée et de sortie d'air doivent permettre le passage du débit de ventilation retenu tout en limitant les pertes de charge.

Pour un débit volumique :

$$Q_v = 200\ m^3.h^{-1} = 0.0556\ m^3.s^{-1}$$

et une vitesse d'air dans les conduits de :

$$v_{air} = 4\ m.s^{-1}$$

la section minimale des ouvertures est donnée par :

$$S_{orifice} = \frac{Q_v}{v_{air}} = \frac{0.0556}{4} = 0.0139\ m^2 \tag{3.23}$$

Le diamètre équivalent d'une ouverture circulaire est obtenu par :

$$D_{eq} = \sqrt{\frac{4S_{orifice}}{\pi}} = 0.133\ m \tag{3.24}$$

soit :

$$D_{eq} \approx 133\ mm$$

Le diamètre normalisé immédiatement supérieur est :

$$D_{eq} = 140\ mm$$

qui est retenu pour la réalisation des conduits d'entrée et de sortie d'air.

3.5.4 Spécifications géométriques de la chambre

TABLE 3.3 – Spécifications géométriques de la chambre de séchage

Paramètre	**Valeur**
Capacité de traitement	10 kg
Surface active de séchage	1.43 m^2
Nombre de claies	3
Volume utile	0.143 m^3
Volume total de la chambre	0.286 m^3
Débit de ventilation	200 $m^3.h^{-1}$
Diamètre des ouvertures	140 mm

3.5.5 Optimisation thermodynamique de la chambre

Afin d'améliorer les performances thermiques du séchoir, toutes les surfaces internes de la chambre (parois, cadres, supports et grilles) sont revêtues d'une peinture noire mate présentant une absorptivité élevée ($\alpha \approx 0.95$). Cette disposition favorise l'absorption du rayonnement solaire incident et contribue à l'élévation de la température interne par rayonnement et conduction [34, 35].

Par ailleurs, l'évacuation de l'air humide est assurée par une cheminée vitrée située en partie supérieure de la chambre. Cette cheminée remplit une double fonction :

— création d'un tirage thermique naturel par différence de densité entre l'air chaud humide et l'air extérieur ;
— amplification de l'effet de serre grâce au vitrage, augmentant la température de l'air extrait et renforçant ainsi le renouvellement d'air.

Cette solution permet d'améliorer l'efficacité globale du séchage tout en réduisant la consommation électrique liée à la ventilation.

3.6 Synthèse du dimensionnement

Les calculs précédents ont permis de dimensionner l'ensemble des sous-systèmes constituant le séchoir solaire hybride. Le cas de référence retenu correspond au séchage de 10 kg de tomates fraîches présentant une teneur en eau initiale de 94 % (base humide) et une teneur finale visée de 10 % (base humide).

L'analyse du bilan massique a montré qu'une masse totale de 9.33 kg d'eau doit être évaporée au cours d'un cycle de séchage. Les besoins énergétiques associés ont été évalués à 22.51 MJ d'énergie utile, soit environ 6.25 kWh. En tenant compte du rendement global du système et de la consommation spécifique d'énergie des séchoirs à convection forcée, l'énergie totale nécessaire atteint 56 MJ, correspondant à une puissance thermique moyenne de l'ordre de 2 kW pour un cycle de huit heures.

Le capteur solaire thermique à air, dimensionné sur la base d'une fraction solaire de 60 %, présente une surface de captation de 1.0 m^2 et assure l'essentiel de l'apport énergétique durant les périodes d'ensoleillement normal. Afin de garantir la continuité du procédé en cas de faible irradiation ou durant les périodes nocturnes, un brûleur hybride H_2/GPL de puissance nominale 5 kW a été retenu. Cette puissance offre une marge de sécurité importante permettant une montée rapide en température ainsi qu'une compensation efficace des pertes thermiques.

Le système de ventilation a été dimensionné pour assurer un débit d'air de 200 $m^3.h^{-1}$, compatible avec les exigences de transfert thermique et d'évacuation de l'humidité. Ce débit est assuré par un ventilateur à courant continu de faible puissance, directement alimenté par le système photovoltaïque.

Enfin, la chambre de séchage a été dimensionnée pour accueillir une charge de 10 kg de produit répartie sur plusieurs claies, avec une surface active d'environ 1.43 m^2 et un volume interne proche de 0.29 m^3, garantissant une circulation homogène de l'air de séchage.

Les principaux résultats du dimensionnement sont récapitulés dans le Tableau 3.4.

TABLE 3.4 – Synthèse complète du dimensionnement du séchoir solaire hybride

Sous-système	**Paramètre**	**Valeur retenue**
Produit (tomate)	Masse fraîche initiale	10 kg
	Eau à évaporer	9.33 kg
	Masse finale du produit	0.67 kg
Énergie	Énergie utile de séchage	22.51 MJ (6.25 kWh)
	Énergie totale requise	56 MJ (15.6 kWh)
	Puissance thermique moyenne	1.94 kW
Capteur solaire	Surface de captation	1.0 m^2
	Rendement thermique	55 %
Brûleur hybride	Puissance nominale	5 kW
	Consommation H_2/cycle	0.19 kg
	Consommation GPL/cycle	0.50 kg
Circuit aéraulique	Débit volumique	200 $m^3.h^{-1}$
	Ventilateur	DC 12–24 V (15–25 W)
Chambre de séchage	Surface active	1.43 m^2
	Nombre de claies	3
	Volume interne	0.29 m^3
	Diamètre des ouvertures	140 mm

3.7 Conclusion du chapitre

Ce chapitre a été consacré à la conception et au dimensionnement du séchoir solaire hybride à stockage d'énergie par hydrogène vert. À partir des besoins identifiés et du cahier des charges fonctionnel établi précédemment, les différents sous-systèmes ont été dimensionnés de manière à garantir les performances thermiques, énergétiques et opérationnelles requises pour le séchage des produits agricoles.

L'étude a été menée sur le cas de référence de la tomate, choisie en raison de sa teneur en eau initiale particulièrement élevée (94 % sur base humide), représentant un scénario de dimensionnement défavorable. Les calculs ont montré que le séchage de 10 kg de produit frais nécessite l'évaporation d'en-

viron 9.33 kg d'eau, correspondant à une énergie utile de séchage de 22.51 MJ. En tenant compte des pertes thermiques et du rendement global du système, l'énergie totale requise a été estimée à 56 MJ, soit une puissance thermique moyenne proche de 2 kW pour un cycle de séchage de huit heures.

Sur cette base, un capteur solaire thermique à air de 1.0 m^2 a été retenu comme source énergétique principale, capable de couvrir environ 60 % des besoins thermiques dans les conditions climatiques nominales du site d'implantation. Afin d'assurer la continuité du procédé lors des périodes de faible ensoleillement ou de fonctionnement nocturne, un brûleur hybride H_2/GPL de puissance nominale 5 kW a été dimensionné. Le système a également été complété par un circuit aéraulique à convection forcée assurant un débit de 200 $m^3.h^{-1}$ grâce à un ventilateur à courant continu de faible consommation énergétique.

Le dimensionnement de la chambre de séchage a conduit à une surface active de l'ordre de 1.43 m^2 répartie sur plusieurs claies, ainsi qu'à un volume interne permettant une circulation homogène de l'air chaud et une évacuation efficace de l'humidité produite durant le séchage. L'intégration d'une cheminée vitrée favorise en outre le tirage naturel et contribue à l'amélioration des performances thermiques globales du système.

Par ailleurs, la conception proposée repose sur une architecture énergétique hiérarchisée privilégiant l'énergie solaire comme source principale, l'hydrogène vert comme source d'appoint renouvelable et le GPL comme solution de secours. Cette stratégie permet de garantir la continuité du fonctionnement tout en réduisant la dépendance aux combustibles fossiles et l'impact environnemental du procédé.

Enfin, l'ensemble du système a été conçu dans le respect des exigences de sécurité liées à l'utilisation de l'hydrogène, notamment par l'application du principe de séparation entre les gaz de combustion et l'air de séchage, l'intégration de dispositifs de détection et de protection, ainsi que l'adoption d'une logique de fonctionnement sécurisée de type *Fail-Safe*.

Le chapitre suivant sera consacré à l'architecture globale du prototype réalisé, à la présentation détaillée de ses différents composants ainsi qu'à l'analyse de son fonctionnement expérimental.

Nomenclature du Chapitre 3

TABLE 3.5 – Nomenclature du Chapitre 3

Symbole	**Désignation**	**Unité**
A_{cap}	Surface du capteur solaire thermique	m^2
$C_{p,air}$	Capacité thermique massique de l'air	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
$C_{p,p}$	Capacité thermique massique du produit	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
CSE	Consommation spécifique d'énergie	$MJ.kg^{-1}$
D_{eq}	Diamètre équivalent des ouvertures d'air	m
E_{total}	Énergie totale requise pour le séchage	MJ
f_{gaz}	Fraction énergétique assurée par le brûleur	–
f_{sol}	Fraction énergétique assurée par le solaire	–
G	Irradiation solaire moyenne	$W.m^{-2}$
G_{min}	Irradiation solaire minimale	$W.m^{-2}$
h_{moy}	Hauteur moyenne de la couche de produit	m
k	Coefficient d'aménagement volumique	–
L_v	Chaleur latente de vaporisation de l'eau	$J.kg^{-1}$
M_e	Masse d'eau à évaporer	kg
M_f	Masse finale du produit séché	kg
M_i	Masse initiale du produit frais	kg
M_{ms}	Masse de matière sèche	kg
M_{GPL}	Masse de GPL consommée	kg
M_{H_2}	Masse d'hydrogène consommée	kg
$P_{bruleur}$	Puissance nominale du brûleur hybride	W
P_{gaz,H_2}	Puissance thermique fournie en mode hydrogène	W
$P_{moyenne}$	Puissance thermique moyenne nécessaire	W
Q_{besoin}	Énergie utile nécessaire au séchage	MJ
Q_{gaz}	Énergie fournie par le brûleur	MJ
$Q_{latente}$	Énergie latente d'évaporation	MJ
$Q_{sensible}$	Énergie sensible de chauffage du produit	MJ

Nomenclature du Chapitre 3

TABLE 3.6 – Nomenclature du Chapitre 3

Symbole	**Désignation**	**Unité**
$Q_{sol,min}$	Énergie solaire disponible en conditions défavorables	MJ
Q_v	Débit volumique d'air	$m^3.h^{-1}$
$Q_{v,design}$	Débit volumique de conception	$m^3.h^{-1}$
S_{active}	Surface active de séchage	m^2
$S_{orifice}$	Section des ouvertures d'air	m^2
t	Durée de séchage	h ou s
t_{min}	Durée minimale d'ensoleillement	h ou s
V_{tot}	Volume total de la chambre de séchage	m^3
V_u	Volume utile de séchage	m^3
v_{air}	Vitesse de l'air dans les conduits	$m.s^{-1}$
X_f	Teneur en eau finale (base humide)	%
X_i	Teneur en eau initiale (base humide)	%
$\dot{m}_{air}$	Débit massique d'air	$kg.s^{-1}$
ΔT	Écart de température	K
η_{cap}	Rendement thermique du capteur solaire	–
η_{comb}	Rendement de combustion	–
ρ_{air}	Masse volumique de l'air	$kg.m^{-3}$
σ	Charge surfacique du produit	$kg.m^{-2}$

TABLE 3.7 – Abréviations utilisées dans le Chapitre 3

Abréviation	**Signification**
CSE	Consommation Spécifique d'Énergie
DC	Direct Current (courant continu)
GPL	Gaz de Pétrole Liquéfié
H_2	Hydrogène
PCI	Pouvoir Calorifique Inférieur
PWM	Pulse Width Modulation
PV	Photovoltaïque
ATEX	Atmosphères Explosibles

Chapitre 4

Matériels et Méthodes : Réalisation et Instrumentation

Les chapitres précédents ont permis d'établir les bases théoriques du procédé de séchage solaire hybride et de dimensionner les différents sous-systèmes énergétiques, thermiques et aérauliques. Afin de valider les choix de conception retenus, un prototype expérimental a été réalisé et instrumenté. Ce chapitre présente l'ensemble des matériels utilisés, la réalisation mécanique du système ainsi que l'intégration des dispositifs de mesure, de commande et de sécurité. Une attention particulière est accordée à l'architecture globale du prototype, à la chambre de séchage et aux interfaces permettant le fonctionnement coordonné des différentes sources d'énergie.

4.1 Architecture globale et schéma synoptique

L'architecture générale du prototype de Séchoir Solaire Hybride (SSH), illustrée à la Figure 4.1, repose sur l'intégration de trois chaînes fonctionnelles complémentaires : la chaîne énergétique, la chaîne thermo-aéraulique et la chaîne de commande.

La chaîne énergétique regroupe les éléments assurant la production, le stockage et la gestion de l'énergie. Elle comprend les panneaux photovoltaïques, le régulateur de charge MPPT, la batterie tampon, l'électrolyseur alcalin destiné à la production d'hydrogène vert ainsi que le système de stockage basse pression de l'hydrogène.

La chaîne thermo-aéraulique est responsable de la production et du transfert de chaleur vers le produit à sécher. L'air ambiant est d'abord préchauffé par le capteur solaire thermique à air, puis, lorsque les conditions d'ensoleillement deviennent insuffisantes, un appoint thermique est assuré par le brûleur

hybride H_2/GPL. L'air chauffé est ensuite distribué à travers la chambre de séchage selon un mode de convection forcée garantissant une répartition homogène de la chaleur.

Enfin, la chaîne de commande est organisée selon une architecture hiérarchique à deux niveaux. Le premier niveau correspond à un pupitre de commande entièrement manuel, câblé en logique physique et indépendant de tout système numérique. Ce mode assure le fonctionnement minimal du prototype, même en cas de défaillance du système de supervision, et constitue ainsi le niveau de sécurité principal du dispositif.

Le second niveau est constitué d'un système de commande automatique basé sur une carte Arduino Mega 2560. Celui-ci assure l'acquisition des données issues des capteurs, la supervision du fonctionnement, la gestion des actionneurs à travers un module relais huit canaux, ainsi que la mise en œuvre des fonctions de sécurité et de régulation thermique. Une logique de commande basée sur une machine à états finis (FSM) permet la gestion automatique des différents modes de fonctionnement du séchoir.

La transition entre les modes manuel et automatique est réalisée à l'aide d'un sélecteur rotatif à clé AUTO/MANUEL, garantissant une commutation rapide et sécurisée sans interruption du fonctionnement du système.

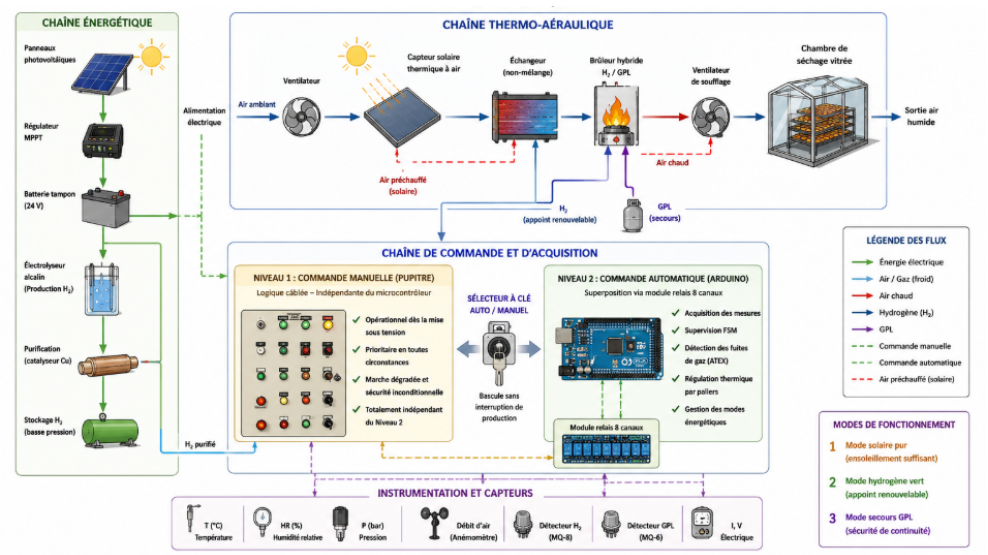


FIGURE 4.1 – Architecture globale et schéma synoptique du prototype de séchoir solaire hybride (SSH).

4.2 Réalisation de la chambre de séchage

La chambre de séchage constitue l'élément central du prototype puisqu'elle accueille les produits à traiter et assure les échanges thermiques et massiques entre l'air chaud et la matière humide. Sa conception a été réalisée de manière à garantir une bonne résistance mécanique, une faible inertie thermique et une excellente visibilité du procédé de séchage.

4.2.1 Structure et présentation

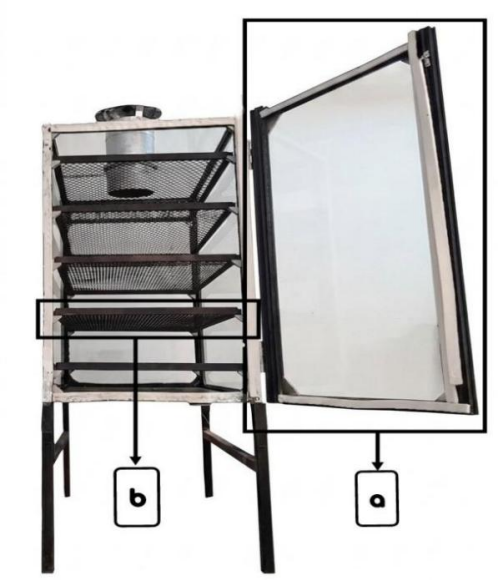
La chambre de séchage réalisée est présentée à la Figure 4.8. Elle se présente sous la forme d'une enceinte parallélépipédique de dimensions internes de 800 × 800 × 400 mm, correspondant à un volume utile d'environ 0,256 m^3.

L'ossature est constituée de profilés en aluminium anodisé noir de type V-Slot (20×20 mm et 20×40 mm), assemblés au moyen d'équerres et d'écrous de type T-nuts. Cette solution constructive offre une bonne rigidité mécanique tout en facilitant les opérations de montage, de maintenance et d'évolution du prototype.

Les parois latérales ainsi que la porte frontale sont réalisées en verre trempé de 5 mm d'épaisseur inséré dans les rainures des profilés. Cette configuration permet non seulement de protéger le produit contre l'environnement extérieur, mais également d'observer visuellement le déroulement du séchage sans ouverture de la chambre.

L'accès à l'intérieur est assuré par une porte frontale vitrée équipée d'un système de fermeture et d'un joint périphérique d'étanchéité limitant les infiltrations d'air et les pertes thermiques.

La chambre comporte cinq claies amovibles réparties sur plusieurs niveaux et espacées de manière à favoriser une circulation homogène de l'air chaud autour du produit. Ces claies sont supportées par des cornières métalliques fixées directement sur la structure porteuse. Un capteur de température et d'humidité relative est installé dans la partie supérieure de l'enceinte afin de suivre en temps réel les conditions thermo-hygrométriques régnant à l'intérieur de la chambre durant les essais expérimentaux.



(a) Système d'ouverture de la chambre de séchage : (a) porte vitrée ; (b) claie amovible destinée au chargement du produit.



(b) Identification des principaux éléments constitutifs.

FIGURE 4.2 – Chambre de séchage réalisée : (a) vue générale de la chambre intégrée au prototype complet ; (b) détail des principaux composants : cheminée d'évacuation, ossature V-Slot, parois transparentes, plaque perforée d'admission d'air et supports des claies.



FIGURE 4.3 – vue de la chambre de séchage dans la prototype complet.

4.2.2 Interface aéraulique

Le circuit aéraulique a été conçu afin d'assurer un transfert efficace de la chaleur produite vers la chambre de séchage et de garantir une évacuation continue de l'humidité extraite du produit.

L'air ambiant est d'abord admis dans le capteur solaire thermique à travers une ouverture munie d'un filtre à poussières empêchant l'introduction de particules solides dans le système. Il circule ensuite au contact de l'absorbeur métallique ondulé peint en noir mat, où il récupère l'énergie thermique issue du rayonnement solaire.

L'air préchauffé est ensuite acheminé vers la chambre de séchage au moyen de quatre gaines flexibles isolées de diamètre 140 mm. Ces conduits assurent le transfert de chaleur tout en limitant les pertes thermiques vers l'environnement extérieur.

À l'entrée de la chambre, un plénum de distribution associé à une plaque déflectrice permet de répartir uniformément le flux d'air chaud sous les différentes claies de séchage. Cette disposition évite les phénomènes de court-circuit aéraulique et favorise l'homogénéité des conditions de séchage sur l'ensemble du volume utile.

L'extraction de l'air humide est réalisée au sommet de la chambre par l'intermédiaire d'une cheminée centrale équipée d'un ventilateur d'extraction. Cette configuration crée une circulation forcée de type *Push-Pull*, améliorant simultanément le transfert thermique et l'évacuation de l'humidité.

Par ailleurs, deux ventilateurs supplémentaires sont installés dans la chambre de captation afin de renforcer le renouvellement de l'air et d'améliorer la sécurité de fonctionnement du système, notamment lors des phases d'appoint thermique.

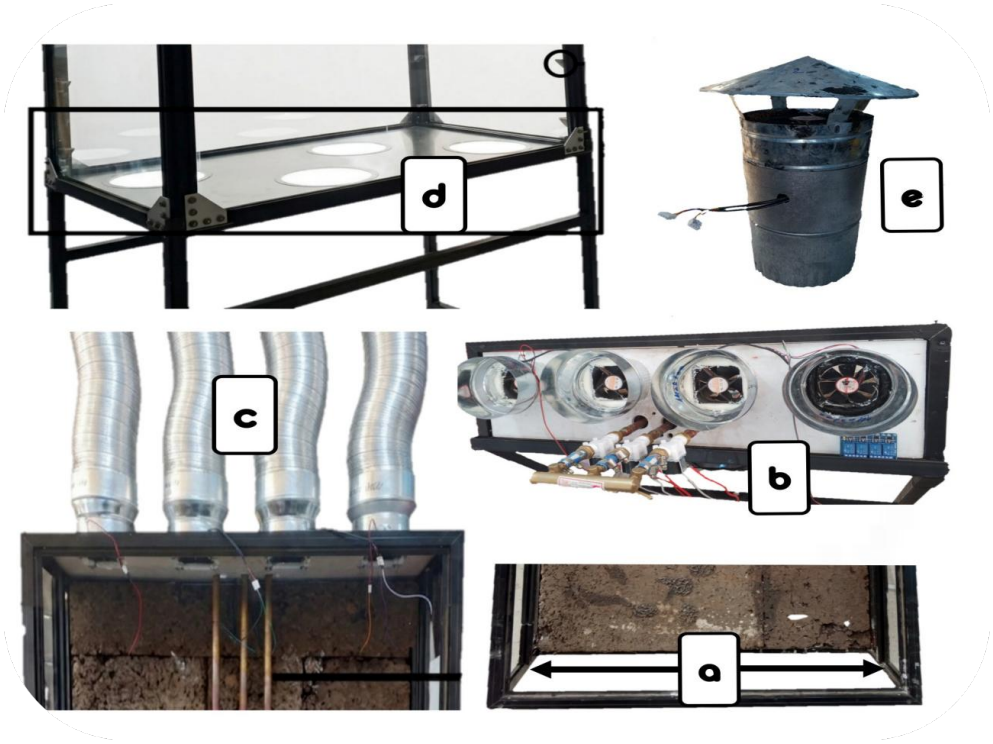


FIGURE 4.4 – Interface aéraulique du prototype : (a) admission d'air ambiant avec filtre ; (b) ventilateurs d'injection ; (c) gaines flexibles de transfert ; (d) plénum de distribution d'air chaud ; (e) cheminée motorisée d'extraction de l'air humide.

4.3 Réalisation du système thermique hybride

Le système thermique hybride constitue le cœur énergétique du prototype de séchoir solaire hybride. Il a été conçu afin d'assurer la production continue de chaleur nécessaire au séchage, indépendamment des variations des conditions météorologiques. Comme illustré à la Figure 4.5, ce système associe un capteur solaire thermique à air et un brûleur bi-énergie H_2/GPL intégrés dans un même caisson thermique.

L'architecture adoptée repose sur une séparation physique complète entre le circuit d'air de séchage et le circuit de combustion. La partie supérieure du caisson est dédiée à la captation solaire et à la circulation de l'air de séchage, tandis que la partie inférieure renferme le brûleur hybride et la chambre de combustion. Les deux compartiments sont séparés par une plaque métallique conductrice jouant le rôle d'échangeur thermique. Cette configuration permet de transmettre la chaleur produite par la combustion vers l'air de séchage

sans contact direct entre les gaz de combustion et les produits alimentaires, garantissant ainsi un séchage indirect conforme aux exigences sanitaires et de qualité des produits traités.



FIGURE 4.5 – Système thermique hybride réalisé intégrant le capteur solaire thermique à air et le brûleur bi-énergie H_2/GPL.

4.3.1 Capteur solaire thermique à air

Le capteur solaire thermique à air constitue la principale source d'énergie du système. Il a été dimensionné afin d'assurer la majeure partie des besoins thermiques du procédé de séchage dans les conditions climatiques nominales du site d'implantation.

Comme présenté à la Figure 4.6, le capteur possède une surface utile de 2.0 m^2 correspondant à des dimensions de 2000 mm $\times$ 1000 mm. Sa structure porteuse est réalisée à partir de profilés en aluminium offrant à la fois légèreté, résistance mécanique et excellente résistance à la corrosion.

Le vitrage supérieur est constitué d'une plaque de verre trempé de 6 mm d'épaisseur assurant une transmission élevée du rayonnement solaire tout en protégeant les éléments internes contre les agressions extérieures. L'absorbeur est réalisé à partir d'une tôle métallique ondulée revêtue d'une peinture noire mate à forte absorptivité solaire ($\alpha \approx 0.92$).

La géométrie ondulée de l'absorbeur permet d'augmenter la surface d'échange thermique disponible et de favoriser les phénomènes de turbulence dans l'écoulement de l'air, améliorant ainsi les transferts convectifs entre la plaque chauffée et le fluide caloporteur.

Afin de limiter les pertes thermiques vers l'environnement, les faces latérales ainsi que la partie inférieure du capteur sont isolées par une couche de liège compressé d'environ 40 mm d'épaisseur, matériau présentant de bonnes propriétés thermiques et une excellente résistance à l'humidité.



FIGURE 4.6 – Capteur solaire thermique à air : absorbeur ondulé peint en noir mat, vitrage en verre trempé de 6 mm et structure porteuse en aluminium.

4.3.2 Brûleur bi-énergie H_2/GPL

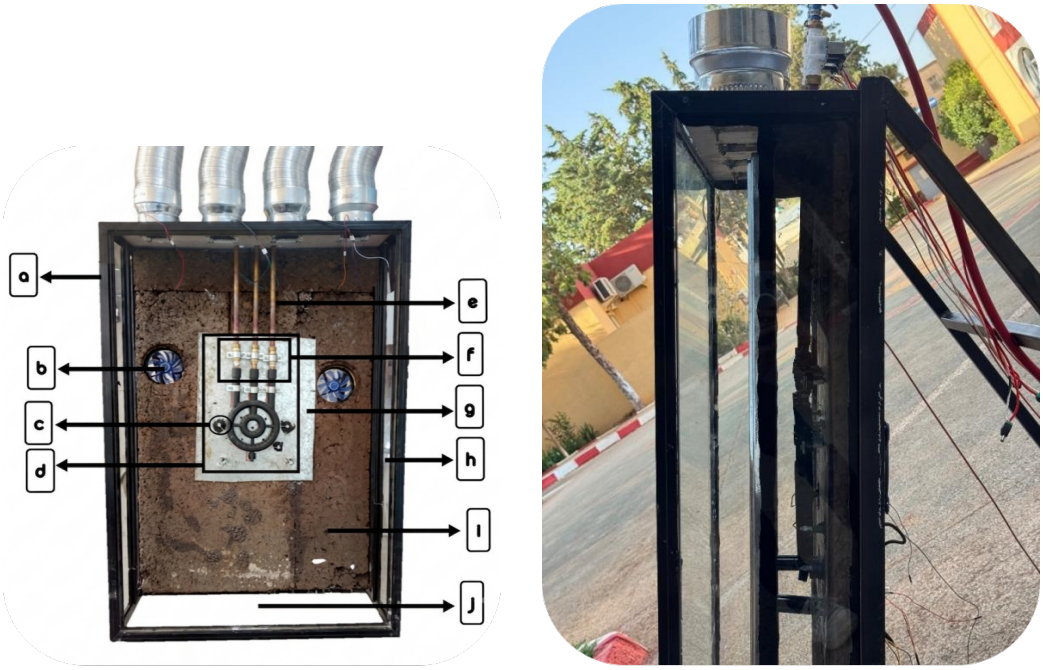
L'appoint thermique du système est assuré par un brûleur bi-énergie H_2/GPL de puissance nominale 5 kW intégré dans la partie inférieure du caisson thermique. Ce dispositif garantit la continuité du procédé de séchage

durant les périodes de faible ensoleillement ou lors du fonctionnement nocturne.

Le principe retenu est celui du chauffage indirect. Les gaz de combustion restent confinés à l'intérieur de la chambre de combustion et n'entrent jamais en contact avec l'air de séchage. La chaleur produite est transmise à travers la plaque métallique séparatrice qui agit comme échangeur thermique entre les deux compartiments.

Le brûleur est monté sur une plaque de support en acier galvanisé assurant à la fois sa fixation mécanique et une diffusion homogène de la chaleur à l'intérieur du caisson thermique.

L'allumage est réalisé à l'aide d'un module électronique haute tension générant des étincelles au niveau des électrodes d'allumage. Le système d'alimentation comprend trois électrovannes solénoïdes indépendantes notées V_{Fl1}, V_{Fl2} et V_{Fl3}, montées sur une rampe de distribution commune. Cette configuration permet une modulation de la puissance thermique selon plusieurs niveaux de fonctionnement (0 %, 33 %, 67 % et 100 %) tout en assurant une répartition homogène de la flamme sur l'ensemble du brûleur.



(a) vue frontale du brûleur bi-énergie H_2/GPL et de ses composants internes

(b) vue latérale de l'ensemble montrant l'intégration du brûleur dans le caisson thermique.

FIGURE 4.7 – Composants internes de la chambre de combustion : (a) ossature métallique ; (b) ventilateur de purge ; (c) électrode d'allumage ; (d) brûleur 5 kW ; (e) tubes de distribution en cuivre ; (f) injecteurs ; (g) plaque métallique de support ; (h) vitrage ; (i) isolation thermique ; (j) admission d'air comburant.

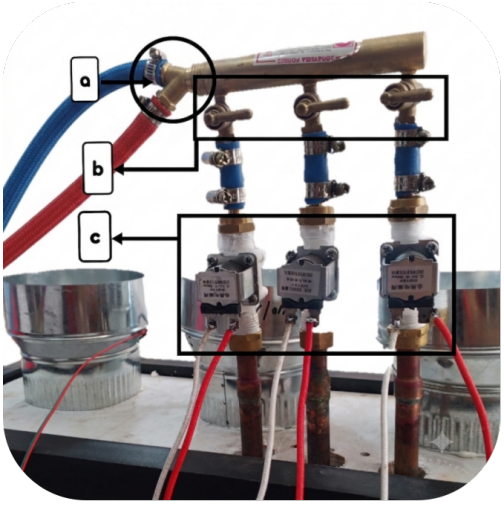
4.3.3 Circuit d'alimentation en gaz

Le système d'alimentation en combustible a été conçu afin de permettre l'utilisation alternative de l'hydrogène et du GPL tout en garantissant un niveau élevé de sécurité de fonctionnement.

Comme illustré à la Figure **??**, le brûleur est alimenté par deux lignes distinctes : une ligne hydrogène et une ligne GPL. Chaque circuit comporte un détendeur de pression, une vanne manuelle d'isolement, une électrovanne de sécurité ainsi qu'un clapet anti-retour destiné à prévenir tout risque de retour de flamme.

Les deux lignes convergent vers un collecteur principal distribuant le combustible vers les différentes électrovannes de modulation du brûleur. Cette architecture permet d'ajuster la puissance thermique délivrée en fonction

des besoins du procédé tout en assurant une exploitation sécurisée des deux combustibles.



(a) collecteur de distribution et électrovannes solénoïdes assurant la modulation du débit de combustible.



(b) vue arrière du prototype montrant l'intégration du circuit d'alimentation GPL et de la rampe de distribution.

FIGURE 4.8 – Circuit d'alimentation en gaz : (a) collecteur principal de distribution ; (b) vannes manuelles d'isolement ; (c) électrovannes de commande du brûleur.

4.3.4 Stockage d'hydrogène

Le stockage de l'hydrogène produit par électrolyse est assuré par un réservoir équipé de dispositifs de mesure et de sécurité permettant le suivi permanent des conditions de fonctionnement.

Comme présenté à la Figure 4.9, le système comporte une vanne manuelle d'isolement, un manomètre analogique permettant une lecture locale de la pression ainsi qu'un transmetteur de pression connecté au système de supervision.

Le signal délivré par le transmetteur est converti en une entrée analogique exploitable par la carte Arduino Mega 2560 afin d'assurer la surveillance continue de la pression de stockage. Cette information est utilisée dans la logique de commande pour autoriser ou interdire le fonctionnement du brûleur en mode hydrogène.

Afin de garantir un fonctionnement sûr, un seuil minimal de pression est imposé avant toute autorisation d'allumage du brûleur. Cette stratégie permet d'éviter les défauts de combustion liés à une pression insuffisante et

contribue à la protection globale du système.

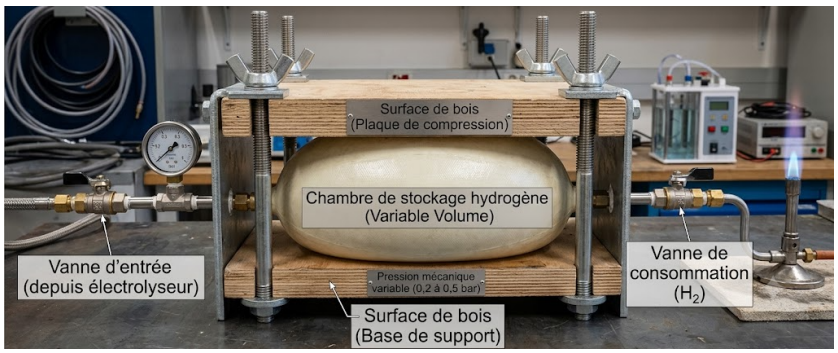


FIGURE 4.9 – Système de stockage de l'hydrogène comprenant le réservoir, le manomètre de contrôle et le transmetteur de pression connecté au système de supervision.

4.4 Instrumentation et système de commande

Afin de garantir un fonctionnement fiable, sécurisé et flexible du séchoir solaire hybride, un système de commande à double mode a été développé. Cette architecture permet d'assurer la continuité du procédé aussi bien en exploitation normale qu'en situation dégradée. Le principe retenu repose sur la coexistence d'un mode de commande manuelle entièrement câblé et d'un mode de commande automatique basé sur un microcontrôleur.

Le mode manuel constitue le niveau primaire de commande. Il est totalement indépendant de l'électronique de supervision et demeure opérationnel même en cas de défaillance du système automatique. Il assure ainsi la marche dégradée du prototype et garantit la continuité du séchage en toutes circonstances.

Le mode automatique constitue quant à lui le niveau supérieur de supervision. Il est assuré par une carte Arduino Mega 2560 et permet l'acquisition des données issues des capteurs, la régulation des actionneurs, la surveillance des paramètres de sécurité ainsi que l'implémentation de la machine à états finis (FSM) développée au Chapitre 5.

L'un des principes fondamentaux de cette architecture est que l'ensemble du câblage de puissance (ventilateurs, électrovannes, allumage) est physiquement réalisé sur le pupitre manuel. Le système automatique se superpose à cette infrastructure par l'intermédiaire d'un module relais, sans duplication des circuits de puissance. La sélection du mode de fonctionnement est réalisée à l'aide d'un sélecteur rotatif à clé AUTO/MANUEL implanté sur la face

avant de l'armoire électrique.

4.4.1 Architecture générale du système de commande

Le système de commande adopté repose sur une architecture hiérarchique à deux niveaux, illustrée à la Figure 4.10.

Le premier niveau correspond à la commande manuelle. Celle-ci est réalisée sous la forme d'un pupitre entièrement câblé en logique physique et ne nécessite aucun microcontrôleur pour fonctionner. Dès la mise sous tension de la batterie, l'opérateur peut agir directement sur les ventilateurs, les électrovannes et le système d'allumage du brûleur. Cette commande reste prioritaire sur toutes les autres fonctions du système.

Le second niveau correspond à la commande automatique assurée par une carte Arduino Mega 2560 associée à un module relais huit canaux. Cette couche de supervision permet l'acquisition des mesures, la gestion automatique des actionneurs, la régulation thermique ainsi que la surveillance des dispositifs de sécurité.

Cette architecture hiérarchique garantit qu'une éventuelle défaillance du système de supervision n'affecte jamais la capacité de l'opérateur à reprendre immédiatement le contrôle du prototype.

TABLE 4.1 – Principaux organes du pupitre de commande manuelle

Organe	**Repère**	**Fonction**
Bouton d'arrêt d'urgence	AU1	Coupure immédiate des actionneurs tout en maintenant la ventilation de purge.
Bouton poussoir START	S0	Mise sous tension du bus de commande.
Potentiomètre extraction	RV1	Réglage de la vitesse du ventilateur d'extraction.
Potentiomètre injection	RV2	Réglage de la vitesse des ventilateurs d'injection d'air chaud.
Potentiomètre purge	RV3	Réglage de la vitesse des ventilateurs de purge.
Commutateur de mode	S2	Sélection du mode de fonctionnement : Veille, Solaire ou Gaz.

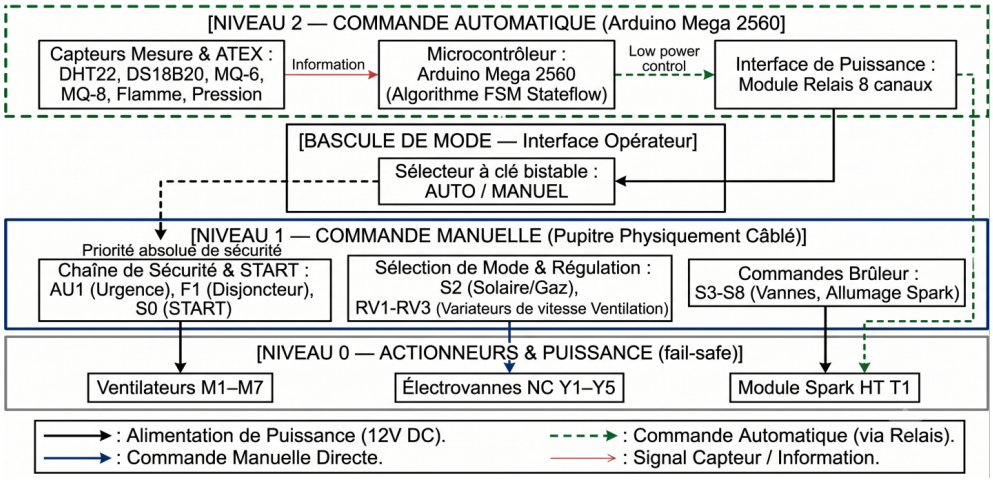


FIGURE 4.10 – Architecture hiérarchique du système de commande à double mode (manuel et automatique).

TABLE 4.2 – Architecture hiérarchique du système de commande

Niveau	Désignation	Composants principaux	Fonction
0	Sécurité matérielle	Disjoncteur, arrêt d'urgence, fusibles, diodes de protection	Protection électrique et mise en sécurité immédiate du système.
1	Commande manuelle	Pupitre de commande, commutateurs, potentiomètres, LEDs	Pilotage direct des actionneurs par l'opérateur.
2	Commande automatique	Arduino Mega 2560, module relais, capteurs et afficheur LCD	Supervision, régulation thermique et surveillance des défauts.

4.4.2 Logique de commande manuelle

La logique de commande manuelle a été développée afin de garantir un fonctionnement simple, intuitif et sécurisé du prototype. Son architecture électrique est organisée autour de trois niveaux d'alimentation distincts, représentés à la Figure 4.11.

— **Alimentation directe** : réservée exclusivement aux ventilateurs de purge et indépendante de l'arrêt d'urgence ;
— **Bus sécurisé** : alimenté après l'arrêt d'urgence et assurant la mise hors tension de tous les équipements critiques en cas d'incident ;

— **Bus de commande** : activé volontairement par l'opérateur via le bouton START.

Cette architecture garantit qu'en cas d'arrêt d'urgence, les dispositifs de purge restent opérationnels afin d'assurer l'évacuation des gaz potentiellement présents dans la chambre thermique.

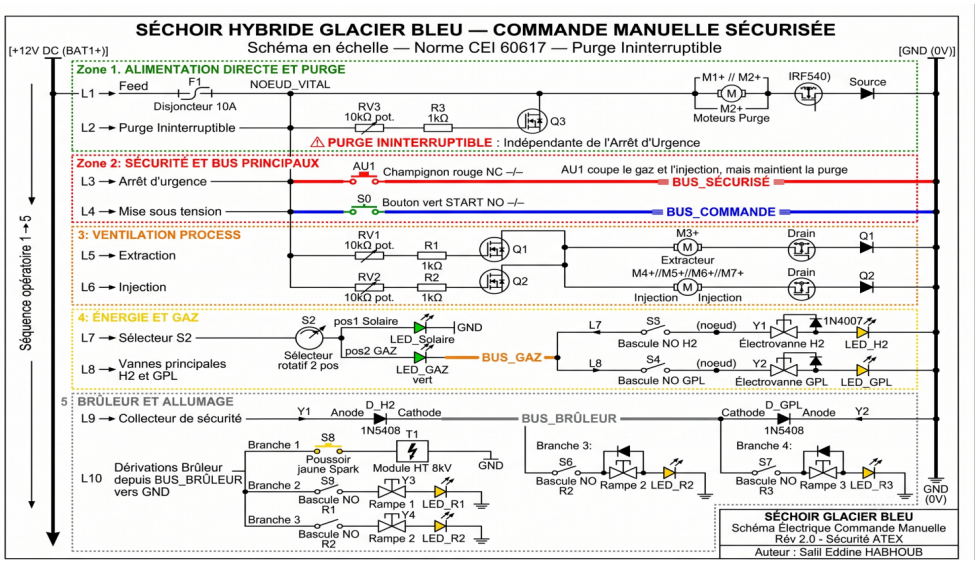


FIGURE 4.11 – Schéma électrique du mode de commande manuelle avec maintien de la ventilation de purge.

Ventilation de purge et sécurité ATEX

Les ventilateurs de purge M1 et M2 sont alimentés directement à partir du circuit principal, en amont de l'arrêt d'urgence. Cette disposition permet de maintenir la ventilation même lorsque l'ensemble des autres actionneurs est désactivé.

Ce choix répond aux exigences de sécurité associées à l'utilisation de l'hydrogène et du GPL. En cas d'incident ou de fuite de gaz, l'appui sur le bouton d'arrêt d'urgence provoque l'arrêt immédiat de l'injection de combustible et de l'allumage, tandis que la ventilation continue d'assurer l'évacuation des gaz résiduels présents dans l'enceinte thermique.

Fonctionnement du pupitre manuel

Après déverrouillage de l'arrêt d'urgence, l'opérateur active le bus de commande au moyen du bouton START. Les ventilateurs de procédé sont alors pilotés à l'aide des potentiomètres RV1 et RV2.

Le sélecteur S2 permet de choisir le mode énergétique utilisé :
— **Position Veille** : aucun actionneur thermique n'est activé ;
— **Position Solaire** : fonctionnement uniquement par énergie solaire ;
— **Position Gaz** : alimentation des électrovannes et autorisation de l'allumage du brûleur.

Lorsque le mode gaz est sélectionné, l'opérateur peut ouvrir progressivement les rampes du brûleur et déclencher l'allumage par action sur le bouton poussoir d'étincelle.

TABLE 4.3 – États des principaux actionneurs selon les conditions de fonctionnement

Condition	M1-M2	M3	M4-M7	Y1-Y2	Y3-Y5
Arrêt d'urgence (AU1)	Actif	Arrêt	Arrêt	Fermées	Fermées
AU1 déverrouillé	Actif	Arrêt	Arrêt	Fermées	Fermées
START activé	Actif	Selon RV1	Selon RV2	Fermées	Fermées
Mode Gaz	Actif	Selon RV1	Selon RV2	Ouvertes	Ouvertes

Procédure d'allumage manuel

La procédure d'allumage du brûleur est réalisée selon les étapes suivantes :

1. Mise en route de la ventilation de purge ;
2. Attente d'une durée minimale de deux minutes afin d'évacuer les gaz résiduels ;
3. Déverrouillage de l'arrêt d'urgence et activation du bouton START ;
4. Réglage des ventilateurs d'injection et d'extraction ;
5. Sélection du mode GAZ ;
6. Déclenchement de l'allumage par maintien du bouton Spark jusqu'à l'apparition de la flamme.



FIGURE 4.12 – Implantation des composants de sécurité, de ventilation et d'alimentation à l'intérieur du système thermique hybride.

4.4.3 Mode de commande automatique basé sur Arduino Mega 2560

Après la validation de l'infrastructure électrique et du pupitre de commande manuelle, une couche de supervision intelligente a été intégrée au prototype afin d'assurer l'automatisation du procédé de séchage. Cette couche

constitue le second niveau de l'architecture hiérarchique de commande présentée précédemment.

Le cœur du système de supervision repose sur une carte Arduino Mega 2560, retenue pour son nombre important d'entrées/sorties numériques et analogiques, sa capacité à générer des signaux PWM matériels destinés à la commande des ventilateurs, ainsi que sa robustesse dans les applications de prototypage industriel.

L'intégration de l'Arduino est réalisée en superposition du pupitre manuel. Le microcontrôleur commande les mêmes actionneurs que le système manuel (électrovannes, ventilateurs et module d'allumage) à travers un module relais opto-isolé, sans modification du câblage de puissance existant. Cette approche garantit une continuité de fonctionnement puisque l'opérateur peut reprendre instantanément le contrôle du système en sélectionnant le mode manuel à l'aide du commutateur AUTO/MANUEL.

Le rôle de l'Arduino consiste à acquérir en temps réel les informations fournies par les différents capteurs, surveiller l'état du procédé, exécuter les fonctions de sécurité et piloter automatiquement les actionneurs conformément à la stratégie de commande définie par la machine à états finis (FSM).

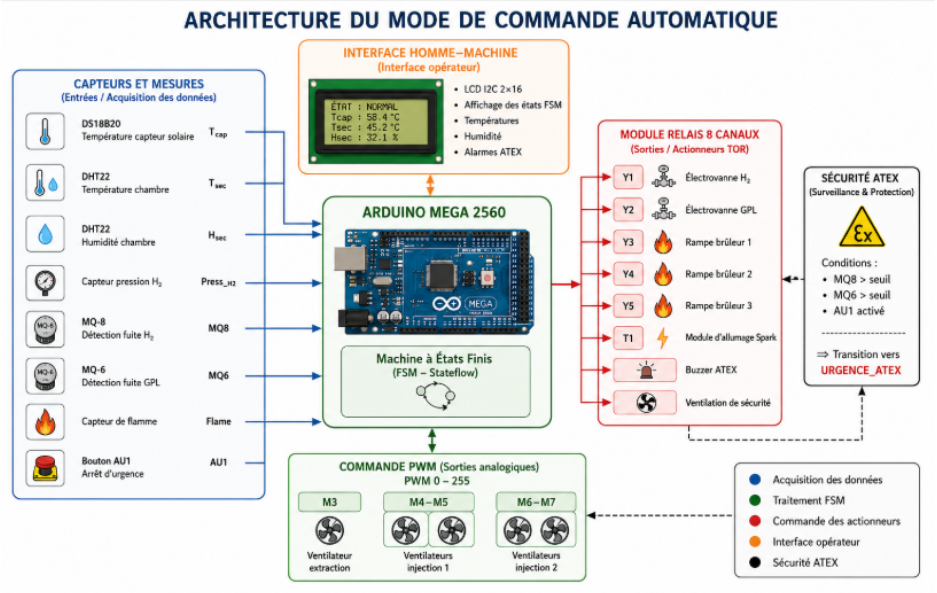


FIGURE 4.13 – Architecture matérielle du système de commande automatique basé sur une carte Arduino Mega 2560 et un module relais huit canaux.

A. Acquisition des données et fonctions de sécurité

Afin d'assurer le suivi du procédé et la protection de l'installation, la carte Arduino Mega 2560 est interfacée avec un ensemble de capteurs thermiques, aérauliques et de sécurité. Ces capteurs fournissent en temps réel les variables nécessaires à la prise de décision de la machine à états finis.

La température du capteur solaire, notée T_{cap}, est mesurée à l'aide d'une sonde numérique DS18B20. Les conditions thermo-hygrométriques à l'intérieur de la chambre de séchage sont surveillées par un capteur DHT22 fournissant simultanément la température de séchage T_{sec} et l'humidité relative H_{sec}.

La pression de stockage de l'hydrogène est mesurée à l'aide d'un transmetteur industriel 4–20 mA couvrant une plage de 0 à 3 bar. Le signal est converti en tension par une résistance de shunt avant acquisition par l'Arduino. Cette information permet notamment d'autoriser ou d'interdire le fonctionnement du brûleur en mode hydrogène.

La détection des fuites de gaz est assurée par deux capteurs complémentaires. Le capteur MQ-8, dédié à l'hydrogène, est installé dans la partie supérieure de l'installation afin de détecter les accumulations de gaz léger. Le capteur MQ-6, destiné au GPL, est positionné à proximité du sol afin de détecter les éventuelles accumulations de gaz lourd. Le dépassement d'un seuil critique provoque immédiatement le déclenchement de l'état d'urgence de la machine à états.

Enfin, un détecteur de flamme assure la validation de l'allumage du brûleur et confirme la présence effective de la combustion après chaque séquence d'allumage.

TABLE 4.4 – Affectation des principales entrées et sorties de l'Arduino Mega 2560

Broche	**Type**	**Composant**	**Signal**	**Fonction**
D2	Entrée	AU1	HIGH/LOW	Arrêt d'urgence
D3	Entrée	Détecteur de flamme	Flame	Confirmation d'allumage
D4 à D8	Sorties	Relais Y1 à Y5	ON/OFF	Commande des électrovannes
D9 à D11	PWM	Ventilateurs	0–255	Régulation de vitesse
D12	Sortie	Module Spark T1	ON/OFF	Allumage du brûleur
D13	Sortie	Buzzer	ON/OFF	Alarme sonore
A0	Entrée	DS18B20	T_{cap}	Température capteur solaire
A1	Entrée	DHT22	T_{sec}	Température chambre
A2	Entrée	DHT22	H_{sec}	Humidité relative
A3	Entrée	Transmetteur 4–20 mA	Press_{H_2}	Pression hydrogène
A4	Entrée	MQ-8	H_2	Détection fuite H_2
A5	Entrée	MQ-6	GPL	Détection fuite GPL
SDA/SCL	I^2C	LCD 2×16	I^2C	Affichage des états

TABLE 4.5 – Capteurs de mesure et de sécurité utilisés par le système automatique

Capteur	**Variable**	**Plage**	**Critère de décision**
DS18B20	T_{cap}	-55 à 125 °C	Disponibilité solaire
DHT22	T_{sec}, H_{sec}	±0.5 °C / ±2 % HR	Régulation thermique
Transmetteur 4–20 mA	Press_{H_2}	0 à 3 bar	Autorisation mode H_2
MQ-8	H_2	100 à 10000 ppm	Détection fuite hydrogène
MQ-6	GPL	200 à 10000 ppm	Détection fuite GPL
Capteur IR/UV	Flame	Binaire	Validation d'allumage

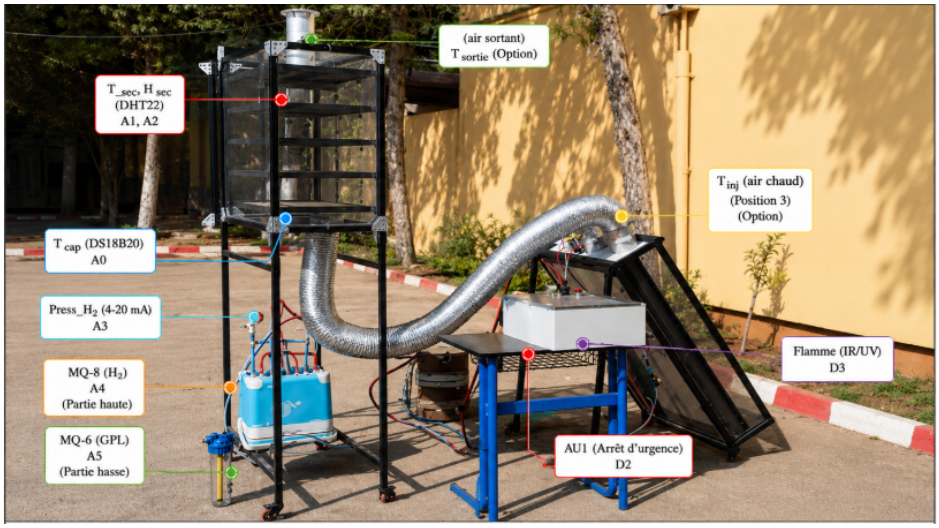


FIGURE 4.14 – Positionnement des capteurs dans le prototype : sonde DS18B20 (T_{cap}), capteur DHT22 (T_{sec} et H_{sec}), détecteurs de gaz et capteur de flamme.

B. Logique de puissance et commande des actionneurs

La carte Arduino Mega 2560 ne pilote pas directement les actionneurs de puissance. En raison des limitations électriques de ses sorties numériques (5 V, courant maximal d'environ 40 mA par broche), les signaux de commande sont transmis à des interfaces de puissance dédiées assurant l'adaptation électrique et l'isolation galvanique entre les circuits de commande et les circuits de puissance.

L'interface entre la couche logicielle et les actionneurs est assurée par un module relais à huit canaux équipé d'opto-coupleurs TLP521. Chaque canal est commandé par un signal logique actif bas et offre une isolation galvanique pouvant atteindre 2500 V. Cette architecture permet de protéger efficacement la carte Arduino contre les perturbations électriques générées par les charges inductives.

Les relais pilotent les électrovannes principales d'alimentation en combustible, à savoir l'électrovanne hydrogène (Y_1) et l'électrovanne GPL (Y_2), ainsi que les électrovannes de modulation de puissance (Y_3, Y_4 et Y_5). Ces dernières permettent d'ajuster la puissance thermique du brûleur selon trois niveaux correspondant respectivement à environ 33 %, 67 % et 100 % de la puissance nominale.

La commande des ventilateurs est réalisée par modulation de largeur d'impulsion (PWM). Les signaux PWM générés par les broches D9, D10 et D11

pilotent les grilles des transistors MOSFET de puissance utilisés également dans le mode manuel. Cette technique permet de réguler efficacement la vitesse des ventilateurs d'extraction et d'injection d'air tout en minimisant les pertes énergétiques.

C. Interface homme-machine

Afin de faciliter l'exploitation du prototype et d'assurer une surveillance locale du procédé, une interface homme-machine (IHM) a été intégrée sur la face avant de l'armoire de commande. Cette interface permet à l'opérateur de connaître en permanence l'état du système sans recourir à un ordinateur externe.

L'affichage est assuré par un écran LCD alphanumérique 2×16 caractères connecté à la carte Arduino via le protocole I^2C. Les informations affichées sont directement générées par la machine à états finis et reflètent l'état instantané du procédé.

L'écran fournit notamment les températures mesurées dans le capteur solaire et dans la chambre de séchage, le mode énergétique actif (solaire, hydrogène ou GPL), ainsi que les éventuels messages d'alarme et de diagnostic.

Cette interface améliore considérablement l'ergonomie du système en permettant à l'opérateur de visualiser rapidement les conditions de fonctionnement et de détecter immédiatement toute anomalie.

TABLE 4.6 – Messages affichés sur l'écran LCD selon l'état de fonctionnement du système

Code	**Ligne 1**	**Ligne 2**	**Signification**
0	ATTENTE DEMARRAGE	T_{sec} : XX.X °C	Système en veille
1	MODE : SOLAIRE	T_{cap} : XX T_c : XX	Fonctionnement solaire actif
2	MODE : H_2 BRULEUR	T_{sec} : XX T_c : XX	Fonctionnement en mode hydrogène
3	MODE : GPL SECOURS	T_{sec} : XX T_c : XX	Fonctionnement en mode GPL
-2	ERREUR ALLUMAGE	VERIFIER BRULEUR	Échec de détection de flamme
-99	URGENCE ATEX	PURGE EN COURS	Détection d'une fuite de gaz



FIGURE 4.15 – Face avant de l'armoire de commande du prototype SSH : zone de sécurité, commande de ventilation, sélection énergétique et commande du brûleur.

D. Préparation à l'implémentation logicielle

L'architecture matérielle présentée dans ce chapitre fournit l'ensemble des

ressources nécessaires à l'acquisition des données, à la surveillance du procédé et au pilotage des actionneurs. Cependant, la présence des capteurs et des interfaces de commande ne définit pas à elle seule le comportement global du système.

Le séchoir solaire hybride présente plusieurs modes de fonctionnement énergétiques (solaire, hydrogène et GPL), des séquences de sécurité obligatoires (purge, allumage, arrêt d'urgence) ainsi que des mécanismes de basculement automatique entre les différentes sources d'énergie. La coordination de ces fonctions nécessite une stratégie de commande rigoureuse et structurée.

Une programmation classique basée uniquement sur des structures conditionnelles (`if/else`) conduirait rapidement à une logique complexe, difficile à maintenir et potentiellement source de conflits entre états de fonctionnement. Afin de garantir un niveau élevé de fiabilité et de sûreté de fonctionnement, la stratégie de commande a été développée sous la forme d'une Machine à États Finis (FSM).

L'approche retenue repose sur la méthodologie *Model-Based Design*, mise en œuvre à l'aide de l'environnement MATLAB/Stateflow. Cette méthode permet de représenter graphiquement les différents états du système, les transitions associées ainsi que les conditions de sécurité, avant la génération automatique du code embarqué destiné à la carte Arduino Mega 2560.

Le chapitre suivant sera consacré à la conception détaillée de cette machine à états finis, à la simulation des différents scénarios de fonctionnement et à l'implémentation des algorithmes de commande permettant l'exploitation autonome du séchoir solaire hybride.

Chapitre 5

Modélisation de la Commande et Simulation sous MATLAB/Simulink

5.1 Introduction

Comme présenté dans les Chapitres **??** et **??**, le séchoir solaire hybride développé dans ce travail associe plusieurs sous-systèmes énergétiques et de commande : capteur solaire thermique, brûleur hybride H_2/GPL, système de stockage d'hydrogène, instrumentation embarquée et unité de supervision basée sur une carte Arduino Mega 2560. La coexistence de ces différents éléments impose la mise en œuvre d'une stratégie de commande capable d'assurer simultanément la sécurité du procédé, l'efficacité énergétique et la stabilité thermique du séchage.

La conception d'un système de commande fiable pour un procédé mettant en œuvre des gaz inflammables tels que l'hydrogène et le GPL ne peut reposer uniquement sur une implémentation directe du code embarqué. Une phase préalable de modélisation et de simulation numérique est indispensable afin de vérifier le comportement du système, d'analyser les séquences de fonctionnement et de détecter d'éventuelles anomalies avant toute expérimentation sur le prototype réel.

Dans cette optique, une démarche de *Model-Based Design* (MBD) a été adoptée. Cette approche consiste à développer un modèle numérique complet du système de commande, appelé couramment *jumeau numérique*, permettant de reproduire virtuellement le comportement du séchoir avant son déploiement sur la plateforme matérielle.

La modélisation a été réalisée sous l'environnement MATLAB/Simulink,

tandis que la logique décisionnelle a été développée à l'aide de l'outil Stateflow, spécialisé dans la conception de machines à états finis (*Finite State Machine – FSM*). Cette approche permet de formaliser graphiquement les différents états du système, les transitions associées ainsi que les conditions de sécurité nécessaires au fonctionnement du procédé.

L'objectif principal de ce chapitre est donc de présenter l'environnement de modélisation retenu, l'architecture générale du modèle développé ainsi que les principes ayant conduit à la conception de la machine à états finis qui servira de base à l'implémentation embarquée sur la carte Arduino Mega 2560.

5.2 Présentation de l'environnement MATLAB/Simulink/St

5.2.1 MATLAB/Simulink : simulation orientée système

MATLAB/Simulink constitue aujourd'hui l'une des plateformes les plus utilisées dans les domaines de l'automatique, de l'électronique de puissance et des systèmes embarqués. Cet environnement permet de représenter graphiquement un système à l'aide de blocs fonctionnels interconnectés, puis de simuler son comportement dans différentes conditions de fonctionnement.

Dans le cadre du présent projet, Simulink est utilisé pour construire le modèle numérique du système de commande du séchoir solaire hybride. Il permet de reproduire virtuellement les signaux issus des capteurs, les actions de l'opérateur ainsi que les réponses des différents actionneurs.

L'environnement Dashboard de Simulink offre également la possibilité de créer une interface homme-machine virtuelle comprenant différents éléments interactifs tels que :

- des curseurs (*Slider*) permettant de modifier les valeurs des températures et de la pression d'hydrogène ;
- des interrupteurs (*Toggle Switch*) simulant les commandes opérateur ;
- des boutons rotatifs (*Knob*) ;
- des voyants lumineux (*Lamp*) représentant l'état des actionneurs ;
- des indicateurs analogiques (*Gauge*) pour la visualisation des commandes PWM.

Ces composants permettent de reproduire fidèlement le comportement du pupitre de commande décrit au Chapitre **??**, sans nécessiter la présence du matériel physique.

5.2.2 Stateflow : modélisation des machines à états finis

Stateflow est une extension de Simulink spécifiquement dédiée à la représentation des systèmes à événements discrets et des logiques séquentielles complexes. Il permet de modéliser graphiquement des machines à états finis à travers des diagrammes d'états, des transitions conditionnelles et des actions associées.

La logique de fonctionnement d'un état repose généralement sur trois types d'actions :

— **entry** : exécutée lors de l'entrée dans un état ;
— **during** : exécutée tant que l'état demeure actif ;
— **exit** : exécutée lors de la sortie de l'état.

L'utilisation de Stateflow est particulièrement adaptée au système développé dans ce mémoire car la supervision du séchoir repose essentiellement sur des événements discrets et des changements d'état. Les principales fonctions représentées sont :

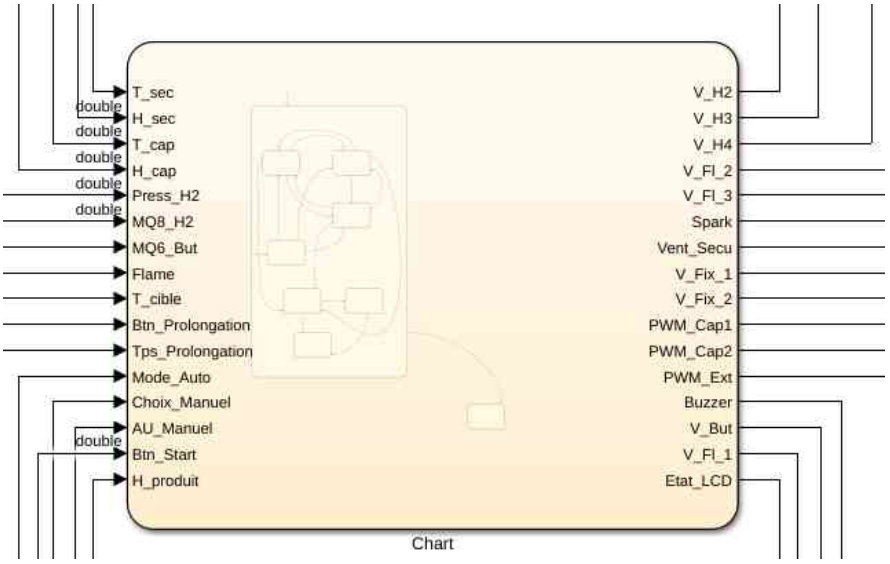
— la commutation entre les modes énergétiques solaire, hydrogène et GPL ;
— la séquence d'allumage temporisée du brûleur ;
— la vérification de présence de flamme ;
— les procédures de purge de sécurité ;
— la gestion prioritaire des situations d'urgence ATEX ;
— la régulation thermique par paliers du brûleur hybride.

Grâce à cette représentation graphique, les algorithmes de commande deviennent plus lisibles, plus faciles à valider et moins sujets aux erreurs qu'une programmation classique basée uniquement sur des structures conditionnelles de type `if/else`.

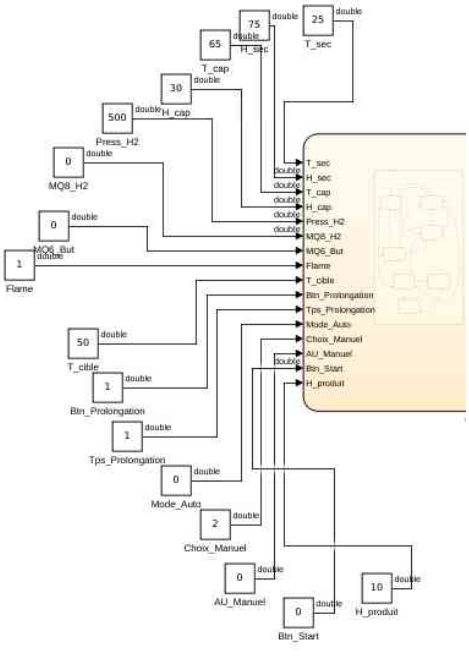
5.3 Architecture globale du modèle Simulink

5.3.1 Structure fonctionnelle à trois couches

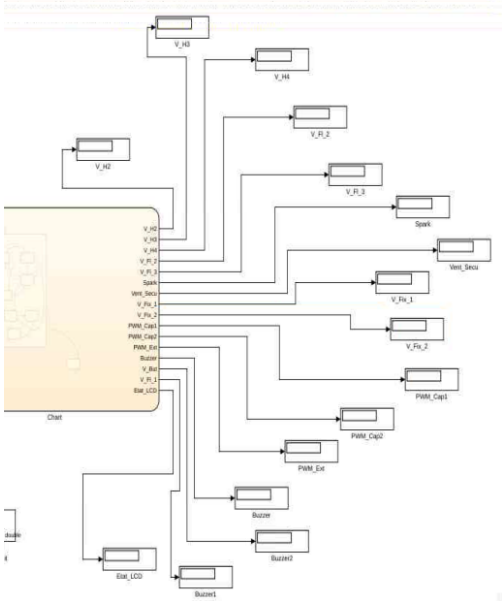
Conformément à l'architecture matérielle présentée au Chapitre **??**, le modèle Simulink a été organisé selon une architecture fonctionnelle à trois couches : acquisition des données, traitement décisionnel et commande des actionneurs.



(a) Vue générale du modèle Simulink.



(b) Interface Dashboard simulant les capteurs et commandes opérateur.



(c) Bloc Chart Stateflow et indicateurs de sortie.

FIGURE 5.1 – Architecture globale du modèle Simulink : (a) vue générale du système de commande ; (b) couche d'acquisition basée sur les blocs Dashboard simulant les capteurs et les commandes opérateur ; (c) couche de traitement Stateflow et visualisation des sorties représentant les actionneurs du séchoir hybride.

Couche d'acquisition des données

La première couche regroupe l'ensemble des signaux représentant les capteurs du système réel. Ces informations sont générées à l'aide de composants Dashboard permettant à l'utilisateur de reproduire différentes conditions de fonctionnement.

Les principales variables simulées sont :

— la température du séchoir T_{sec} ;
— la température du capteur solaire T_{cap} ;
— la pression du réservoir d'hydrogène $Press_{H2}$;
— les commandes opérateur ;
— les détecteurs de fuite MQ8 et MQ6 ;
— le capteur de présence de flamme.

Les blocs Dashboard utilisés sont des *Slider*, *Toggle Switch* et *Constant* reproduisant respectivement les mesures analogiques, les commandes manuelles et les états logiques des capteurs.

Couche de traitement

La couche de traitement est constituée d'un unique bloc *Chart Stateflow*. Celui-ci centralise l'ensemble des informations provenant des capteurs et génère toutes les commandes destinées aux actionneurs.

Afin de garantir une parfaite compatibilité avec l'environnement Simulink, toutes les variables ont été définies sous forme scalaire de type `double` (taille 1×1). Cette convention évite les erreurs de dimensionnement lors de la compilation et simplifie les échanges entre Simulink et Stateflow.

Le diagramme Stateflow constitue ainsi le cœur décisionnel du système de commande.

Couche de commande des actionneurs

La troisième couche représente les actionneurs du prototype et les différents indicateurs visuels associés.

Les sorties générées par le diagramme Stateflow pilotent :

— les électrovannes d'alimentation en gaz ;
— le système d'allumage ;
— les ventilateurs de circulation d'air ;
— les voyants lumineux ;
— l'affichage LCD simulé.

Les états logiques des actionneurs sont visualisés à l'aide de blocs *Lamp*, tandis que les commandes analogiques sont représentées par des blocs *Gauge* et *Display*.

Cette organisation modulaire facilite l'analyse du fonctionnement global du système et permet de séparer clairement les fonctions d'acquisition, de décision et d'action.

5.3.2 Initialisation des variables temporelles

Lors de la simulation d'une machine à états finis, une attention particulière doit être portée à l'initialisation des variables utilisées dans les séquences temporisées. Une variable non initialisée peut entraîner un comportement imprévisible dès le premier cycle de calcul.

Dans le cas présent, la procédure d'allumage du brûleur utilise un chronomètre de confirmation destiné à vérifier la présence de flamme après l'ouverture des électrovannes. Afin d'éviter tout déclenchement intempestif lors du démarrage de la simulation, ce compteur doit être explicitement initialisé.

Cette opération est réalisée au niveau de la transition par défaut du diagramme Stateflow à l'aide de l'instruction suivante :

$$chrono\_confirmation = 0 \tag{5.1}$$

L'équation 5.1 garantit que le chronomètre démarre systématiquement à zéro avant l'activation du premier état de la machine. Le comportement du modèle devient ainsi entièrement déterministe dès le lancement de la simulation.

Cette précaution améliore la robustesse du modèle et contribue à la validation correcte des séquences de démarrage et de sécurité qui seront détaillées dans les sections suivantes.

5.4 Dictionnaire des variables du bloc Stateflow

La conception d'une machine à états finis nécessite une définition rigoureuse des variables utilisées pour les échanges d'informations entre l'environnement Simulink et le diagramme Stateflow. Cette étape est essentielle afin de garantir la cohérence du modèle, la traçabilité des données ainsi que la robustesse du processus de simulation.

Les variables utilisées dans le système de commande peuvent être regroupées en trois catégories principales :

— les **variables d'entrée (E)** provenant des capteurs physiques ou des commandes opérateur ;

— les **variables de sortie (S)** destinées au pilotage des actionneurs et à l'affichage des informations système ;
— les **variables locales (L)** utilisées pour les calculs internes, les temporisations et la gestion des transitions entre états.

Le Tableau 5.1 présente l'ensemble des variables utilisées dans le diagramme Stateflow, leurs domaines de définition ainsi que leur rôle fonctionnel.

TABLE 5.1 – Dictionnaire des variables du diagramme Stateflow

Variable	**Type**	**Domaine**	**Description**
Btn_Start	E	{0,1}	Bouton Marche/Arrêt général du système
Mode_Auto	E	{0,1}	Sélecteur de mode : automatique ou manuel
Choix_Manuel	E	{1,2,3}	Forçage manuel du mode énergétique (1=Solaire, 2=H_2, 3=GPL)
T_cap	E	$\mathbb{R}^+$	Température du capteur solaire (°C)
H_cap	E	[0 ; 100]	Humidité relative extérieure (%)
T_sec	E	$\mathbb{R}^+$	Température de la chambre de séchage (°C)
H_sec	E	[0 ; 100]	Humidité relative de la chambre (%)
T_cible	E	$\mathbb{R}^+$	Température de consigne du séchage (°C)
H_produit	E	[0 ; 100]	Humidité résiduelle cible du produit (%)
Press_H2	E	$\mathbb{R}^+$	Pression du réservoir d'hydrogène (bar)
MQ8_H2	E	$\mathbb{R}^+$	Niveau de détection d'hydrogène ambiant
MQ6_But	E	$\mathbb{R}^+$	Niveau de détection de GPL ambiant
Flame	E	{0,1}	Détection de flamme (1 = flamme présente)
AU_Manuel	E	{0,1}	Arrêt d'urgence manuel
Btn_Prolongation	E	{0,1}	Demande de prolongation du cycle de séchage
Tps_Prolongation	E	$\mathbb{R}^+$	Durée de prolongation demandée (min)
Etat_LCD	S	Entier	Code d'état affiché sur l'IHM
V_H2	S	{0,1}	Électrovanne principale d'alimentation H_2
V_H3	S	{0,1}	Électrovanne secondaire H_2
V_H4	S	{0,1}	Électrovanne tertiaire H_2
V_Fl_1	S	{0,1}	Électrovanne de rampe brûleur n°1
V_Fl_2	S	{0,1}	Électrovanne de rampe brûleur n°2
V_Fl_3	S	{0,1}	Électrovanne de rampe brûleur n°3
V_But	S	{0,1}	Électrovanne principale GPL
Spark	S	{0,1}	Commande du module d'allumage haute tension
PWM_Cap1	S	[0 ; 255]	Commande PWM des ventilateurs d'injection 1 et 2
PWM_Cap2	S	[0 ; 255]	Commande PWM des ventilateurs d'injection 3 et 4
PWM_Ext	S	[0 ; 255]	Commande PWM du ventilateur d'extraction
Vent_Secu	S	{0,1}	Ventilation de sécurité ATEX
V_Fix_1	S	{0,1}	Brasseur d'air interne n°1
V_Fix_2	S	{0,1}	Brasseur d'air interne n°2
Buzzer	S	{0,1}	Alarme sonore
chrono_confirmation	L	$\mathbb{R}^+$	Temporisation de confirmation d'allumage
H_fin	L	[0 ; 100]	Critère de fin de séchage
T1_seuil	L	$\mathbb{R}^+$	Premier seuil de modulation du brûleur (°C)
T2_seuil	L	$\mathbb{R}^+$	Deuxième seuil de modulation du brûleur (°C)

Note : E = Entrée ; S = Sortie ; L = Variable locale.

5.5 Machine à États Finis Stateflow

5.5.1 Vue d'ensemble du diagramme d'états

Comme présenté dans la Section 5.4, l'ensemble des variables du système est traité par une machine à états finis développée sous Stateflow. Cette architecture permet de représenter de manière explicite les différents modes de fonctionnement du séchoir hybride ainsi que les transitions associées aux événements, aux mesures capteurs et aux conditions de sécurité.

Le diagramme général a été structuré selon une approche hiérarchique comportant un super-état principal dédié au fonctionnement normal du système ainsi qu'un état critique indépendant destiné à la gestion des situations d'urgence.

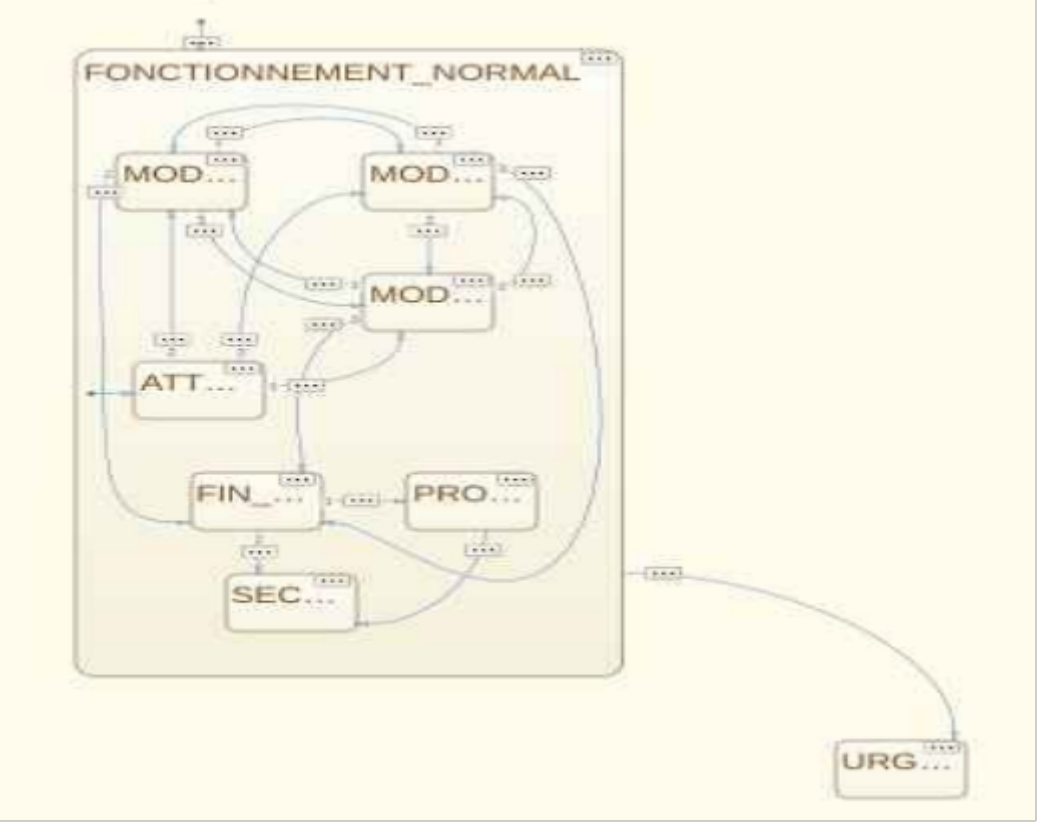


FIGURE 5.2 – Architecture générale de la machine à états finis Stateflow.

L'organisation retenue repose sur deux niveaux principaux :

— **FONCTIONNEMENT_NORMAL** : super-état regroupant l'ensemble des modes nécessaires au déroulement normal du cycle de séchage ;
— **URGENCE_ATEX** : état critique indépendant accessible depuis n'importe quel état actif dès qu'une situation dangereuse est détectée.

Le super-état *FONCTIONNEMENT_NORMAL* contient les sous-états suivants :

— ATTENTE_DEMARRAGE ;
— MODE_SOLAIRE ;
— MODE_H2 ;
— MODE_GPL ;
— PROLONGATION ;
— FIN_TEMPORISATION ;
— SECHAGE_TERMINE.

Ces états décrivent l'intégralité du cycle de fonctionnement du séchoir depuis l'attente de démarrage jusqu'à la fin du processus de séchage.

L'état *URGENCE_ATEX* possède quant à lui une priorité absolue. Une transition externe permet d'interrompre instantanément toute séquence en cours dès qu'une fuite d'hydrogène ou de GPL est détectée par les capteurs de sécurité. Cette architecture garantit le respect des exigences de sûreté de fonctionnement définies dans le cahier des charges présenté au Chapitre **??**.

Enfin, la transition par défaut représentée par la flèche d'initialisation du diagramme positionne automatiquement la machine dans l'état *ATTENTE_DEMARRAGE* tout en réinitialisant les variables temporelles nécessaires à l'exécution correcte des séquences d'allumage et de sécurité.

5.6 Stratégie de contrôle du brûleur : logique à trois paliers

L'une des principales difficultés associées au contrôle thermique du séchoir hybride concerne la gestion de la puissance du brûleur H_2/GPL. En effet, le système doit être capable de fournir rapidement l'énergie nécessaire lors des phases de démarrage tout en évitant les dépassements de température susceptibles d'altérer la qualité du produit séché.

Afin de répondre à ces exigences, une stratégie de commande originale basée sur une modulation séquentielle de la puissance thermique a été développée. Cette approche repose sur l'utilisation de trois électrovannes indépendantes commandant différentes rampes du brûleur, permettant ainsi une adaptation progressive de la puissance calorifique en fonction de l'évolution

de la température de la chambre de séchage.

5.6.1 Motivation et justification de la stratégie

Dans une architecture classique, le brûleur est généralement commandé selon une logique binaire de type ON/OFF. Bien que simple à mettre en œuvre, cette approche présente plusieurs limitations lorsqu'elle est appliquée à un procédé thermique caractérisé par une forte inertie, comme le séchage solaire hybride.

Les principaux inconvénients observés sont les suivants :

— **Montée en température lente :** lorsque seule une électrovanne est utilisée, le débit de combustible demeure limité, ce qui augmente la durée nécessaire pour atteindre la température de consigne. Cette situation devient particulièrement pénalisante lors des variations rapides de l'ensoleillement ou pendant les périodes nuageuses.

— **Oscillations thermiques importantes :** une commande tout-ou-rien provoque des alternances successives entre pleine puissance et extinction complète du brûleur. Ce comportement engendre un phénomène de type *bang-bang*, caractérisé par des dépassements de consigne (*overshoot*) suivis de phases de refroidissement. Ces oscillations peuvent détériorer la qualité du séchage et réduire la durée de vie des électrovannes ainsi que du système d'allumage.

Afin de limiter ces effets indésirables, une stratégie de modulation par paliers a été retenue. Son principe consiste à adapter progressivement la puissance thermique délivrée par le brûleur en fonction de l'écart entre la température mesurée et la température de consigne.

Le fonctionnement repose sur deux phases principales :

1. **Phase de démarrage à pleine puissance :** dès l'activation du brûleur, les trois électrovannes de rampe (V_{Fl1}, V_{Fl2} et V_{Fl3}) sont ouvertes simultanément. La totalité de la puissance thermique disponible est ainsi mobilisée afin d'accélérer la montée en température.
2. **Phase de régulation progressive :** lorsque la température de la chambre augmente, les électrovannes sont fermées successivement selon des seuils prédéfinis. La puissance thermique est ainsi réduite par paliers successifs, ce qui diminue l'inertie thermique du système et limite les dépassements de consigne.

Cette stratégie constitue un compromis efficace entre rapidité de chauffage et stabilité thermique.

5.6.2 Définition des seuils de régulation

Afin d'assurer une adaptation automatique à toutes les conditions de fonctionnement, les seuils intermédiaires de modulation ne sont pas fixés de manière arbitraire. Ils sont calculés dynamiquement à chaque activation du brûleur en fonction :

— de la température initiale de la chambre de séchage $T_{sec,0}$;
— de la température de consigne T_{cible}.

L'intervalle thermique à parcourir est divisé en trois zones de largeur identique. Les deux seuils intermédiaires sont alors définis par :

$$T_1 = T_{sec,0} + \frac{1}{3}\left(T_{cible} - T_{sec,0}\right) \tag{5.2}$$

$$T_2 = T_{sec,0} + \frac{2}{3}\left(T_{cible} - T_{sec,0}\right) \tag{5.3}$$

où :

— $T_{sec,0}$ représente la température mesurée dans la chambre au moment de l'activation du brûleur ;
— T_{cible} correspond à la température de consigne du procédé de séchage ;
— T_1 et T_2 sont les seuils de réduction progressive de la puissance thermique.

Les équations 5.2 et 5.3 permettent d'obtenir automatiquement des seuils adaptés à chaque situation de fonctionnement. Cette méthode garantit que la réduction de puissance est proportionnelle à la progression réelle de la montée en température, indépendamment de la valeur choisie pour la consigne.

5.6.3 Table de vérité de la régulation par paliers

Le comportement du brûleur est résumé dans le Tableau 5.2. Chaque combinaison d'états des électrovannes correspond à un niveau de puissance thermique déterminé.

TABLE 5.2 – Table de vérité de la régulation séquentielle du brûleur ($T_1 < T_2 < T_{cible}$)

Condition sur T_{sec}	V_{Fl1}	V_{Fl2}	V_{Fl3}	**Puissance**
$T_{sec} < T_1$ (démarrage ou réchauffage)	1	1	1	100 %
$T_1 \leq T_{sec} < T_2$ (Palier 1)	0	1	1	$\approx$ 67 %
$T_2 \leq T_{sec} < T_{cible}$ (Palier 2)	0	0	1	$\approx$ 33 %
$T_{sec} \geq T_{cible}$ (Consigne atteinte)	0	0	0	0 %

La Figure ?? présentera dans la section suivante l'implémentation de cette logique directement au sein du diagramme Stateflow. La stratégie proposée permet ainsi d'obtenir une montée en température rapide tout en conservant une bonne stabilité thermique autour de la consigne de séchage.

5.6.4 Code Stateflow de l'état MODE_H2

Le Listing 5.1 présente l'algorithme complet implémenté dans l'état `MODE_H2`. Celui-ci assure l'alimentation du brûleur à hydrogène, la gestion de l'allumage, la surveillance de la présence de flamme ainsi que la régulation thermique par la stratégie à trois paliers décrite précédemment.

```
state MODE_H2

 entry:
   PWM_Cap1 = 0;
   PWM_Cap2 = 0;
   V_But = 0;

   V_H2 = 1;
   V_H3 = 1;
   V_H4 = 1;

   V_Fl_1 = 1;
   V_Fl_2 = 1;
   V_Fl_3 = 1;

   Spark = 1;

   V_Fix_1 = 1;
   V_Fix_2 = 1;

   PWM_Ext = 128;

   chrono_confirmation = 0;

   T1_seuil = T_sec + (T_cible - T_sec)/3;
   T2_seuil = T_sec + 2*(T_cible - T_sec)/3;

   Etat_LCD = 2;

 during:

```

```
32      chrono_confirmation = chrono_confirmation + 1;
33
34      if (Flame == 0) && (chrono_confirmation > 300)
35
36          Spark = 0;
37
38          V_H2 = 0;
39          V_H3 = 0;
40          V_H4 = 0;
41
42          V_Fl_1 = 0;
43          V_Fl_2 = 0;
44          V_Fl_3 = 0;
45
46          Buzzer = 1;
47          Etat_LCD = -2;
48
49      end
50
51      if (Flame == 1)
52
53          Spark = 0;
54
55          H_fin = H_cap + H_produit;
56
57          if (T_sec < T1_seuil)
58
59              V_Fl_1 = 1;
60              V_Fl_2 = 1;
61              V_Fl_3 = 1;
62              PWM_Ext = 128;
63
64          elseif (T_sec >= T1_seuil) && (T_sec < T2_seuil)
65
66              V_Fl_1 = 0;
67              V_Fl_2 = 1;
68              V_Fl_3 = 1;
69              PWM_Ext = 80;
70
71          elseif (T_sec >= T2_seuil) && (T_sec < T_cible)
72
73              V_Fl_1 = 0;
74              V_Fl_2 = 0;
```

```
75            V_Fl_3 = 1;
76            PWM_Ext = 60;
77
78         elseif (T_sec >= T_cible)
79
80            V_Fl_1 = 0;
81            V_Fl_2 = 0;
82            V_Fl_3 = 0;
83
84            V_H2 = 0;
85            V_H3 = 0;
86            V_H4 = 0;
87
88            PWM_Ext = 200;
89
90         end
91      end
92
93   exit:
94
95      V_Fl_1 = 0;
96      V_Fl_2 = 0;
97      V_Fl_3 = 0;
98
99      V_H2 = 0;
100     V_H3 = 0;
101     V_H4 = 0;
102
103     Spark = 0;
104
105     V_Fix_1 = 0;
106     V_Fix_2 = 0;
107
108  end
```

Listing 5.1 – Code Stateflow de l'état MODE_H2 (stratégie à trois paliers)

5.6.5 Initialisation et état ATTENTE_DEMARRAGE

```
1  state ATTENTE_DEMARRAGE
2
3   entry:
4
```

```
    V_H2 = 0;
    V_H3 = 0;
    V_H4 = 0;

    V_But = 0;

    V_Fl_1 = 0;
    V_Fl_2 = 0;
    V_Fl_3 = 0;

    Spark = 0;
    Buzzer = 0;

    PWM_Cap1 = 0;
    PWM_Cap2 = 0;
    PWM_Ext = 0;

    Vent_Secu = 0;

    V_Fix_1 = 0;
    V_Fix_2 = 0;

    Etat_LCD = 0;

    chrono_confirmation = 0;

 during:

    H_fin = H_cap + H_produit;

end
```

Listing 5.2 – Code Stateflow de l'état ATTENTE_DEMARRAGE

```
state MODE_SOLAIRE

 entry:

    V_H2 = 0;
    V_H3 = 0;
    V_H4 = 0;

    V_But = 0;

```

```
    V_Fl_1 = 0;
    V_Fl_2 = 0;
    V_Fl_3 = 0;

    Spark = 0;

    PWM_Cap1 = 180;
    PWM_Cap2 = 180;

    PWM_Ext = 100;

    V_Fix_1 = 1;
    V_Fix_2 = 1;

    Etat_LCD = 1;

  during:

    H_fin = H_cap + H_produit;

    if (T_sec > T_cible + 2)

       PWM_Ext = 220;

    end

end
```

Listing 5.3 – Code Stateflow de l'état MODE_SOLAIRE

5.6.6 État MODE_BUTANE

L'état `MODE_BUTANE` constitue le mode de secours lorsque la pression d'hydrogène devient insuffisante ($Press\_H2 \leq 50$ bar). Son fonctionnement est strictement identique à celui de l'état `MODE_H2`. La seule différence réside dans la source énergétique utilisée : l'alimentation en hydrogène est remplacée par l'ouverture de l'électrovanne GPL `V_But`.

Afin d'éviter une redondance inutile dans le mémoire, le code complet n'est pas reproduit. La logique de régulation à trois paliers demeure inchangée.

```
state URGENCE_ATEX

```

```
3   entry:
4
5     V_H2 = 0;
6     V_H3 = 0;
7     V_H4 = 0;
8
9     V_But = 0;
10
11    V_Fl_1 = 0;
12    V_Fl_2 = 0;
13    V_Fl_3 = 0;
14
15    Spark = 0;
16
17    PWM_Cap1 = 0;
18    PWM_Cap2 = 0;
19
20    V_Fix_1 = 0;
21    V_Fix_2 = 0;
22
23    Vent_Secu = 1;
24
25    PWM_Ext = 255;
26
27    Buzzer = 1;
28
29    Etat_LCD = -99;
30
31  during:
32
33    Vent_Secu = 1;
34    Buzzer = 1;
35
36  end
```

Listing 5.4 – Code Stateflow de l'état URGENCE_ATEX

5.7 Validation par simulation

Après la conception de la machine à états finis et l'implémentation de la logique de commande sous Stateflow, une phase de validation fonctionnelle a été réalisée afin de vérifier la cohérence du comportement du système dans

différentes conditions d'exploitation.

Les essais ont été effectués dans l'environnement MATLAB/Simulink à l'aide des blocs *Dashboard* permettant de reproduire les actions de l'opérateur ainsi que les variations des grandeurs physiques mesurées par les capteurs. Les indicateurs visuels de type *Lamp*, les afficheurs numériques et les oscilloscopes Simulink ont été utilisés pour observer les réactions du système en temps réel.

L'objectif principal de cette campagne de simulation est de vérifier :

— le fonctionnement correct des différents modes de séchage ;
— la validité des transitions entre états ;
— la performance de la régulation thermique à trois paliers ;
— la robustesse des mécanismes de sécurité ;
— le respect du cahier des charges fonctionnel.

5.7.1 Protocole de simulation

La validation a été conduite à travers plusieurs scénarios représentatifs couvrant aussi bien les conditions nominales que les situations dégradées susceptibles d'être rencontrées lors de l'exploitation du séchoir hybride.

Pour chaque essai, les paramètres d'entrée sont imposés manuellement au moyen des blocs Dashboard tandis que les sorties sont analysées à partir des indicateurs visuels, des chronogrammes et des variables internes du diagramme Stateflow.

TABLE 5.3 – Scénarios de simulation et résultats attendus

Scénario	**Conditions initiales**	**Résultat attendu**
S1 – Solaire nominal	$T_{cap} = 75°C$, $T_{cible} = 50°C$, $Press_{H2} = 500$ bar, $Mode\_Auto = 1$	Activation de l'état MODE_SOLAIRE, fermeture complète des circuits gaz, ventilation solaire active et affichage $Etat\_LCD = 1$.
S2 – Bascule H_2	$T_{cap} = 25°C$, $T_{sec} = 30°C$, $T_{cible} = 50°C$, $Press_{H2} = 500$ bar	Allumage du brûleur H_2, ouverture simultanée des trois rampes, fermeture séquentielle aux seuils T_1 et T_2, extinction à l'atteinte de la consigne.
S3 – Secours GPL	$T_{cap} = 25°C$, $Press_{H2} = 20$ bar	Basculement automatique vers le mode GPL avec verrouillage du circuit hydrogène et affichage $Etat\_LCD = 3$.
S4 – Fuite ATEX	$MQ8_{H2} > 400$ pendant le séchage, $AU\_Manuel = 0$	Arrêt immédiat de toutes les vannes, activation de la ventilation de sécurité, déclenchement du buzzer et affichage $Etat\_LCD = -99$.

5.7.2 Analyse du scénario S2 : validation de la régulation à trois paliers

Le scénario S2 constitue le test principal de validation de la stratégie de contrôle développée dans ce travail. Il permet d'évaluer la capacité du système à atteindre rapidement la température de consigne tout en limitant les dépassements thermiques.

Pour les conditions initiales considérées ($T_{sec} = 30°C$ et $T_{cible} = 50°C$), les seuils calculés dynamiquement sont :

$$T_1 = 36.7°C \tag{5.4}$$

$$T_2 = 43.3°C \tag{5.5}$$

L'évolution temporelle de la température et des commandes des électrovannes met en évidence quatre phases distinctes :

1. **Phase de démarrage** ($T_{sec} < T_1$)

   Les trois électrovannes de rampe sont ouvertes simultanément ($V_{Fl1} = V_{Fl2} = V_{Fl3} = 1$). Le brûleur fonctionne à pleine puissance afin de réduire au maximum le temps de montée en température.

2. **Palier 1** ($T_1 \leq T_{sec} < T_2$)

   La vanne V_{Fl1} est fermée. La puissance thermique est réduite d'environ un tiers, ce qui diminue l'inertie thermique du système.

3. **Palier 2** ($T_2 \leq T_{sec} < T_{cible}$)

   Les vannes V_{Fl1} et V_{Fl2} sont fermées. Seule la troisième rampe demeure active, permettant une approche progressive de la consigne.

4. **Extinction**

   Lorsque $T_{sec} \geq T_{cible}$, l'ensemble des électrovannes est fermé et l'extracteur est accéléré afin d'évacuer l'excès de chaleur résiduelle.

Les chronogrammes obtenus montrent une diminution progressive de la pente de montée en température ainsi qu'une suppression quasi complète du phénomène de dépassement de consigne (*overshoot*), confirmant ainsi l'efficacité de la stratégie proposée.

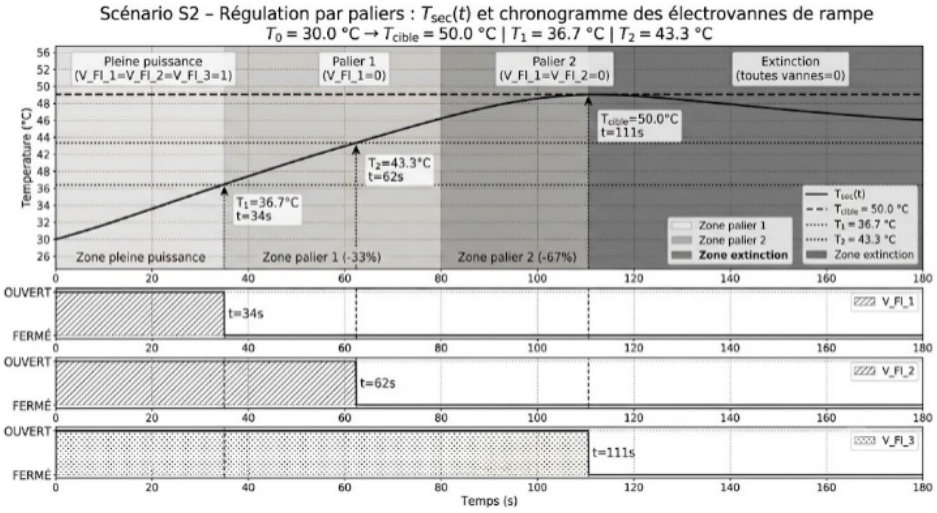


FIGURE 5.3 – Évolution de la température $T_{sec}(t)$ et chronogramme des électrovannes V_{Fl1}, V_{Fl2} et V_{Fl3} lors du scénario S2.

5.7.3 Analyse des scénarios S3 et S4

Le scénario S3 permet de vérifier la continuité de service lorsque la réserve d'hydrogène devient insuffisante. Dès que la pression du réservoir passe sous le seuil minimal autorisé, la machine à états quitte automatiquement l'état MODE_H2 pour activer l'état MODE_BUTANE.

Les résultats montrent que cette transition s'effectue sans conflit d'actionneurs ni interruption de la régulation thermique. La même stratégie de modulation à trois paliers est conservée, garantissant une qualité de séchage identique quelle que soit la source énergétique utilisée.

Le scénario S4 vise quant à lui la validation du système de sécurité ATEX. La simulation d'une concentration anormale d'hydrogène entraîne immédiatement l'activation de l'état URGENCE_ATEX.

Toutes les électrovannes sont alors fermées, l'étincelle d'allumage est désactivée, la ventilation de sécurité est forcée à son niveau maximal et une alarme sonore est déclenchée. Le temps de réaction observé correspond à un seul pas d'échantillonnage, ce qui satisfait pleinement les exigences d'une architecture de sécurité de type *fail-safe*.

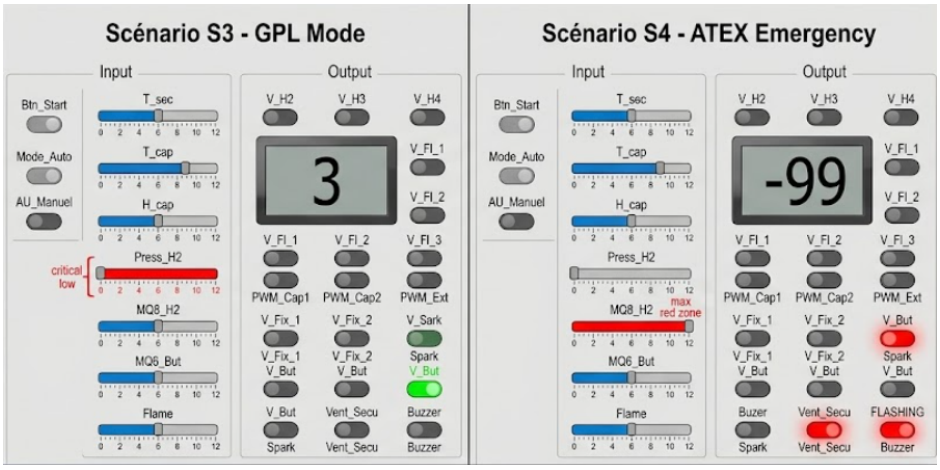


FIGURE 5.4 – Indicateurs visuels obtenus lors des scénarios S3 (basculement GPL) et S4 (déclenchement de la sécurité ATEX).

5.8 Discussion et limites du modèle

5.8.1 Apports de la modélisation Stateflow

La phase de modélisation sous Stateflow a permis d'identifier et de corriger plusieurs problèmes potentiels avant toute implémentation matérielle.

Les principaux enseignements tirés de cette étape sont les suivants :

- **Gestion du démarrage :** la réinitialisation explicite du compteur `chrono_confirmation` garantit un comportement reproductible dès l'entrée dans les états actifs.
- **Cohérence des types de données :** la normalisation des variables au format `double` a permis d'éliminer plusieurs incompatibilités entre Simulink et Stateflow.
- **Sécurisation des transitions :** les actions `exit` assurent l'extinction systématique des actionneurs lors d'un changement d'état.
- **Calcul dynamique des seuils :** l'évaluation de T_1 et T_2 dans l'action `entry` garantit la stabilité des seuils pendant tout le cycle de chauffe.

TABLE 5.4 – Bilan comparatif des résultats attendus et obtenus

Scénario	Conditions	Résultat attendu	Résultat obtenu	Conclusion
S1	$T_{cap} \geq T_{cible}$	Mode solaire actif	Toutes les vannes gaz fermées et ventilation active	Conforme
S2	$T_{cap} < T_{cible}$ $Press_{H2} > 50$	Montée rapide sans dépassement excessif	Fermeture séquentielle à $T_1 = 36.7°C$ et $T_2 = 43.3°C$ Dépassement $< 1°C$	Conforme
S3	$Press_{H2} \leq 50$	Passage automatique au GPL	Transition réalisée au même pas de simulation	Conforme
S4	$MQ8_{H2} > 400$	Arrêt d'urgence immédiat	Temps de réaction égal à un pas d'échantillonnage	Conforme
S5	$Btn\_Start = 0$	Blocage du système	Maintien dans ATTENTE_DEMARRAGE	Conforme

Les résultats obtenus démontrent la cohérence globale de la logique de commande et la conformité du comportement simulé avec les exigences du cahier des charges fonctionnel.

5.8.2 Limites et perspectives

Malgré les résultats encourageants obtenus lors des simulations, certaines limitations doivent être soulignées.

Le modèle développé représente principalement la couche décisionnelle et événementielle du système. Les phénomènes thermiques réels de la chambre de séchage, tels que l'inertie thermique des matériaux, les pertes par convection et rayonnement, l'humidité du produit ou encore la variabilité du rayonnement solaire, ne sont pas modélisés explicitement.

Une perspective naturelle de ce travail consiste à coupler la machine à états Stateflow avec un modèle thermique dynamique de la chambre de séchage. Cette approche permettrait de réaliser une co-simulation commande–procédé en boucle fermée et d'optimiser les paramètres de régulation avant les essais expérimentaux sur le prototype réel.

5.9 Conclusion

Ce chapitre a présenté la modélisation complète du système de commande du séchoir solaire hybride à stockage d'énergie par hydrogène vert sous l'environnement MATLAB/Simulink/Stateflow, en suivant une approche de conception basée sur les modèles (*Model-Based Design*). Cette méthodologie a permis de développer une représentation structurée et hiérarchisée du comportement du système avant toute implémentation matérielle, réduisant ainsi les risques d'erreurs lors de la phase de réalisation.

La machine à états finis élaborée intègre l'ensemble des modes de fonctionnement définis dans le cahier des charges fonctionnel. Elle assure la gestion coordonnée du mode solaire prioritaire, du mode hydrogène, du mode GPL de secours ainsi que des mécanismes de sécurité associés aux risques industriels de type ATEX. L'utilisation de Stateflow a permis de formaliser de manière rigoureuse les transitions entre états, les conditions de déclenchement et les actions appliquées aux différents actionneurs du système.

La contribution principale de ce chapitre réside dans la conception et l'implémentation d'une stratégie originale de contrôle du brûleur fondée sur une modulation séquentielle de puissance à trois paliers. Cette approche repose sur un démarrage à pleine puissance suivi d'une réduction progressive du débit énergétique par fermeture successive des électrovannes de rampe selon les seuils définis par les équations (5.2) et (5.3). Contrairement à une commande binaire classique de type ON/OFF, cette stratégie permet de concilier rapidité de montée en température, limitation des dépassements de consigne et stabilité du régime thermique sans recourir à un régulateur PID complexe.

Les différents scénarios de simulation réalisés ont permis de valider la cohérence fonctionnelle du modèle et de vérifier le respect des exigences du cahier des charges. Les résultats obtenus confirment notamment la bonne gestion des transitions énergétiques, l'efficacité de la régulation thermique proposée ainsi que la robustesse des mécanismes de sécurité mis en œuvre. Les simulations ont également démontré la capacité du système à maintenir un fonctionnement sûr en présence de situations dégradées, telles qu'une fuite d'hydrogène ou l'épuisement de la réserve énergétique.

L'ensemble de ces résultats constitue une base solide pour l'implémentation embarquée de la stratégie de commande sur la carte Arduino Mega 2560 et pour la validation expérimentale du système réel présentée dans le chapitre suivant.

Conclusion Générale

Au terme de ce travail, nous avons étudié, conçu, réalisé et automatisé un séchoir solaire hybride intégrant l'hydrogène vert comme solution de stockage énergétique et d'appoint thermique. Ce projet s'inscrit dans le contexte actuel de transition énergétique et de développement durable, où la réduction de la dépendance aux combustibles fossiles constitue un enjeu majeur pour les secteurs agricole et industriel.

Le point de départ de cette étude repose sur le constat que le séchage représente l'une des opérations les plus énergivores dans les chaînes de transformation agroalimentaire. Face à l'augmentation continue des coûts de l'énergie et aux contraintes environnementales croissantes, le recours aux énergies renouvelables apparaît comme une solution particulièrement adaptée pour améliorer la durabilité de ces procédés.

Dans un premier temps, une étude bibliographique approfondie a permis d'analyser les principes fondamentaux du séchage solaire, les technologies de production d'hydrogène vert ainsi que les différentes solutions de stockage énergétique. Cette analyse a conduit à la sélection d'une architecture hybride originale associant un capteur solaire thermique à air, un électrolyseur alcalin alimenté par énergie photovoltaïque et un système de chauffage d'appoint utilisant l'hydrogène ou, en dernier recours, le GPL.

Sur la base du cahier des charges établi, le système a ensuite été dimensionné à partir d'un cas d'étude représentatif portant sur le séchage de la tomate. Les calculs thermiques et énergétiques réalisés ont permis de déterminer les besoins du procédé et de dimensionner les différents sous-systèmes du séchoir, notamment le capteur solaire, la chambre de séchage, les circuits aérauliques et le brûleur hybride.

Une attention particulière a été accordée à la conception de la chaîne hydrogène. Un électrolyseur alcalin expérimental a été développé afin de produire l'hydrogène à partir d'électricité photovoltaïque. Afin d'améliorer la pureté du gaz produit, un dispositif de purification catalytique a été intégré pour réduire les risques de contamination croisée entre l'hydrogène et l'oxygène. Une solution originale de stockage basse pression a également été

proposée à travers l'utilisation d'une chambre à air de camion comprimée entre deux plateaux rigides. Cette approche permet de limiter les contraintes techniques et économiques associées aux réservoirs haute pression tout en demeurant adaptée à un prototype expérimental.

La réalisation pratique du système a conduit à l'intégration de l'ensemble des sous-systèmes développés au sein d'un prototype fonctionnel comprenant le capteur solaire thermique, la chambre de séchage multi-plateaux, l'électrolyseur alcalin, le système de purification, le stockage d'hydrogène, le circuit d'alimentation en gaz ainsi que le brûleur bi-énergie H_2/GPL. Le système thermique hybride adopté repose sur un principe de chauffage indirect permettant d'éviter tout contact entre les gaz de combustion et l'air de séchage, garantissant ainsi la qualité sanitaire des produits traités.

Sur le plan de l'automatisation, une architecture de commande à double niveau a été développée. Un mode manuel assure un fonctionnement sécurisé même en cas de défaillance électronique, tandis qu'un mode automatique basé sur une carte Arduino Mega 2560 permet la supervision intelligente du procédé. L'ensemble des capteurs, actionneurs et fonctions de sécurité a été intégré au sein d'une machine à états finis modélisée sous MATLAB/Stateflow.

La stratégie de commande élaborée permet de gérer automatiquement les transitions entre les différentes sources énergétiques, de privilégier l'énergie solaire lorsque les conditions sont favorables, d'exploiter l'hydrogène comme source renouvelable de secours et de n'utiliser le GPL qu'en ultime recours. Une stratégie innovante de régulation du brûleur à trois paliers a également été proposée afin de réduire les oscillations thermiques et d'améliorer la stabilité de la température de séchage.

Les simulations réalisées ont validé le comportement global du système, la cohérence des transitions entre états, l'efficacité de la régulation thermique ainsi que les mécanismes de sécurité liés aux risques ATEX. Les essais expérimentaux effectués sur le prototype ont confirmé la faisabilité technique de la solution proposée ainsi que le bon fonctionnement des principaux sous-systèmes développés.

Par ailleurs, l'analyse économique réalisée montre que le prototype peut être construit à partir de composants largement disponibles sur le marché national à un coût raisonnable, ce qui constitue un atout important en vue d'une éventuelle industrialisation ou d'un déploiement dans les exploitations agricoles.

Malgré les résultats encourageants obtenus, plusieurs perspectives d'amélioration peuvent être envisagées. Parmi celles-ci figurent l'intégration d'un modèle thermique avancé de la chambre de séchage, l'optimisation énergétique par commande adaptative, l'utilisation de capteurs connectés pour la supervision à distance ainsi que l'évaluation expérimentale sur d'autres pro-

duits agricoles. Une étude approfondie des performances énergétiques et environnementales du système à plus grande échelle pourrait également constituer une extension pertinente de ce travail.

En conclusion, ce mémoire démontre la faisabilité technique d'un séchoir solaire hybride à stockage d'énergie par hydrogène vert capable d'assurer un séchage continu, fiable et respectueux de l'environnement. La solution proposée contribue au développement de technologies énergétiques durables adaptées aux régions à fort potentiel solaire et représente une voie prometteuse pour la valorisation des ressources renouvelables dans le contexte algérien.

Bibliographie

[1] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 5th ed. Wiley, 2020.

[2] S. A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering : Processes and Systems*, 3rd ed. Academic Press, 2021.

[3] CDER, *Atlas des énergies renouvelables en Algérie.* Alger : Centre de Développement des Énergies Renouvelables, 2023.

[4] FAO, *Food Loss and Food Waste Assessment Methodology.* Rome : Food and Agriculture Organization, 2019.

[5] ——, *Drying of Fruits and Vegetables : Post-Harvest Management.* Rome : Food and Agriculture Organization, 2020.

[6] S. Souheyla, "Étude et réalisation d'un séchoir solaire," Master's thesis, Université de Biskra, 2018.

[7] R. Prakash and S. Kumar, "Recent developments in solar dryers for agricultural products," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 215, 2025.

[8] D. Kong and G. Zhang, "A comprehensive review of hybrid solar dryers integrated with auxiliary energy systems for agricultural products," *Energy*, vol. 293, 2024.

[9] S. Singh and R. S. Gill, "Active indirect solar dryer for agricultural products : experimental evaluation and economic feasibility," *Energy*, vol. 222, 2021.

[10] D. S. Malwad and D. C. Sonawane, "Recent advancements in indirect solar drying of agricultural products," *Journal of Renewable Energy and Environment*, vol. 11, pp. 174–191, 2024.

[11] Ministère de la Transition Énergétique, *Stratégie nationale de développement de l'hydrogène vert en Algérie*, Alger, 2024.

[12] Y. Benchenina, A. Zemmit, and M. M. Bouzaki, "Advancing green hydrogen production in algeria : opportunities and challenges," *Scientific Reports*, vol. 15, 2025.

[13] IRENA, *Green Hydrogen Cost Reduction : Scaling up Electrolysers*, Abu Dhabi, 2023.

[14] IEA, *Global Hydrogen Review 2024*. Paris : International Energy Agency, 2024.

[15] A. Franco and C. Giovannini, "Recent advances in water electrolysis for green hydrogen generation," *Sustainability*, vol. 15, 2023.

[16] P. Millet and R. Ngameni, *Hydrogen Production by Water Electrolysis*. London : ISTE Editions, 2021.

[17] A. Ursua, L. M. Gandia, and P. Sanchis, "Hydrogen production from water electrolysis : current status and future trends," *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, pp. 410–426.

[18] K. Zeng and D. Zhang, "Recent progress in alkaline water electrolysis," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 36, pp. 307–326.

[19] G. Nonhebel, *Drying of Solids in the Chemical Industry*. London : Butterworth & Co., 1971.

[20] G. N. Tiwari, "Convective heat and mass transfer in greenhouse drying," *Solar Energy*, vol. 76, pp. 765–773, 2004.

[21] K. Sacilik, R. Keskin, and A. K. Elicin, "Thin-layer drying behaviour of organic tomato slices in a solar dryer," *Journal of Food Engineering*, vol. 73, pp. 231–238, 2006.

[22] A. Benseddik, "Modélisation et simulation du séchage solaire," Ph.D. dissertation, Université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie, 2011.

[23] SECAAR, *Techniques de séchage solaire*, SECAAR, Dakar, Sénégal.

[24] O. Aumporn, "Performance comparison of solar dryers," *Energy Reports*, vol. 3, pp. 37–43, 2017.

[25] A. A. Hassanain, "Performance of indirect solar drying systems," *Renewable Energy*, vol. 34, pp. 225–231, 2009.

[26] V. P. Sethi and S. K. Sharma, "Survey and evaluation of greenhouse solar drying technologies," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, pp. 1145–1151, 2009.

[27] S. Janjai and B. K. Bala, "Performance of a large-scale greenhouse solar dryer," *Applied Energy*, vol. 88, pp. 1364–1372, 2011.

[28] A. Fadhel, S. Kooli, and A. Farhat, "Comparison of drying methods for grapes," *Desalination*, vol. 185, pp. 535–541, 2005.

[29] A. Elkhadraoui, S. Kooli, and A. Farhat, "Experimental investigation of mixed-mode greenhouse solar drying," *Renewable Energy*, vol. 78, pp. 590–598, 2015.

[30] M. Carmo, D. L. Fritz, J. Mergel, and D. Stolten, "A comprehensive review on pem water electrolysis," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, pp. 4901–4934.

[31] *Standard Guide for Hydrogen Systems Safety*, ASTM International Std. ASTM G142.

[32] *Explosive Atmospheres – Electrical Installations in Hazardous Areas*, International Electrotechnical Commission Std. IEC 60 079.

[33] A. K. Elicin and K. Sacilik, "Drying characteristics of apples in a solar tunnel dryer," *Biosystems Engineering*, vol. 91, pp. 367–373, 2005.

[34] N. S. Rathore and N. L. Panwar, "Experimental studies on greenhouse dryer," *Renewable Energy*, vol. 35, pp. 1640–1644, 2010.

[35] E. A. Almuhanna, "Utilization of solar greenhouse for date drying," *Journal of Agricultural Science*, vol. 4, pp. 237–244, 2012.

[36] C. Phusampao and Y. Tirawanichakul, "Performance of greenhouse solar dryer for macadamia nuts," *Energy Procedia*, vol. 56, pp. 667–676, 2014.