

Travail de fin d'études et stage[BR]- Travail de fin d'études : Conception d'un incubateur pour la promotion du développement rural de pays en voie de développement[BR]- Stage d'insertion professionnelle

Auteur : Dembour, Juliette

Promoteur(s) : Lemort, Vincent

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil électromécanicien, à finalité spécialisée en énergétique

Année académique : 2020-2021

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/11566>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



Conception d'un incubateur pour la promotion du développement rural de pays en voie de développement.

COORDONNÉ PAR INGÉNIEURS SANS FRONTIÈRES - BELGIQUE

*Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de Master
Ingénieur Civil en Electromécanique, à finalité spécialisée en
énergétique*

Juliette Dembour

Promoteur :

V. LEMORT

Superviseur :

N. PAULUS

Coordinatrice ISF :

M. KRESSE

Membres du jury :

V. LEMORT

M. KRESSE

S. GENDEBIEN

UNIVERSITÉ DE LIÈGE
FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
ANNÉE ACADEMIQUE 2020 - 2021

Résumé

Ingénieurs sans Frontières - Belgique est une ASBL qui vise à apporter un soutien technique aux difficultés soulevées par certaines populations de pays en voie de développement. Dans la région de Tabligbo, au Togo, le phénomène d'exode rural est problématique. La création d'un élevage de poulets au sein d'un village peut aider à limiter ce problème. Cependant, l'utilisation de couveuses commerciales existantes est à éviter. Celles-ci sont coûteuses et non adaptées à fonctionner dans ces zones au climat chaud et humide.

Ce travail traite de la conception d'un prototype de couveuse destiné à être reproduit localement, avec une certaine facilité et à coût faible. Pour assurer le bon développement des œufs, différents aspects doivent être abordés : la régulation de la température à un niveau très stable, le contrôle du taux d'humidité moyen, un certain brassage de l'air, ainsi que le retournement périodique des œufs. Pour réduire les coûts d'installation et de fonctionnement, l'utilisation d'un système de refroidissement doit être évitée. Une modélisation des échanges thermiques et hygrométriques est effectuée afin d'orienter les choix de composition des parois de la couveuse, ainsi qu'estimer la puissance de chauffage nécessaire. Des données TMY (Typical Meteorological Year) sont utilisées et plusieurs mois types sont simulés. L'accent a été mis sur une minimisation des coûts de fonctionnement et des risques de surchauffe à l'intérieur de la couveuse. Le caisson est composé d'une couche de contreplaqué et une couche de polystyrène expansé en guise d'isolation. Un dispositif électronique est conçu afin de piloter les lampes halogènes, utilisées comme système de chauffage, de même que les différents capteurs, ventilateurs et le moteur.

Le montage électronique du prototype doit encore être finalisé avant de le soumettre à des phases de test en chambre climatique. Une étude de l'introduction de matériaux PCM (Matériaux à Changement de Phase) dans les parois de la couveuse a permis de justifier leur utilité potentielle dans des régions proches de Tabligbo, caractérisées par des maxima de températures particulièrement élevés. Dans une deuxième phase du projet, la couveuse sera rendue autosuffisante, au moyen de panneaux photovoltaïques et d'un système de stockage. L'objectif final est de rendre la couveuse accessible à des zones reculées, au réseau électrique défaillant ou inexistant.

Remerciements

Tout d’abord, je tiens à remercier Arnaud Fanovard, étudiant en automatisation à l’IESN (HENALLUX - *Haute École de Namur-Liège-Luxembourg*), qui m’a aidée bénévolement tout au long de la conception du dispositif électronique. Ma formation d’ingénieure électromécanicienne ne me permettait pas, dans un délai aussi court, de concevoir entièrement le système nécessaire au fonctionnement de la couveuse. En suivant les demandes et recommandations nécessaires au bon fonctionnement de la couveuse, il a alors étudié chaque partie du contrôle thermique, d’hygrométrie et de ventilation. Par la suite, et avec son aide, j’ai repris le matériel nécessaire, me suis familiarisée avec le code électronique et les composants afin de tout implémenter pour le prototype de couveuse. Je lui dois la quasi-totalité de mes connaissances en électronique.

Ensuite, j’aimerais remercier toutes les personnes qui ont participé, de près ou de loin, à mes apprentissages et au bon avancement de ce projet. En premier, merci à mon promoteur, Vincent Lemort ainsi qu’à Nicolas Paulus, qui me suivent depuis plusieurs mois. Merci au personnel du labo, en particulier Bernard Loly, José Concha et Richard Labenda pour leurs conseils avisés, leur disponibilité et leurs encouragements. Ensuite, merci à Myriam Kresse et Martin Scohier, bénévoles de l’ASBL Ingénieurs sans Frontières, qui m’ont dirigée, conseillée, de façon toujours bienveillante et encourageante. Finalement, merci à ma famille et mes amis, à Caroline Minne, Alice Stockart, Victoria Collignon, ainsi qu’à Pierre Mazy pour son intérêt et sa patience lors de mes premiers pas dans le domaine de la construction.

Pour conclure, je suis fière du travail accompli, des nombreux apprentissages que cela m’a apporté et des rencontres, passées et à venir, de personnes qui œuvrent pour un partenariat Nord-Sud dans une perspective durable.

Table des matières

1	Introduction et motivation	1
1.1	Introduction générale	1
1.2	Contextualisation	2
1.2.1	Ingénieurs sans Frontières - Belgique	2
1.2.2	Tabligbo, Togo	2
1.3	Objectifs et challenges	4
2	Problématique	6
2.1	Durée d'incubation	7
2.2	Température	7
2.3	Hygrométrie	7
2.4	Ventilation	8
2.5	Retournement des œufs	9
3	État de l'art	11
3.1	Introduction	11
3.1.1	Interaction de l'œuf avec l'air intérieur de la couveuse	11
3.2	Couveuses existantes	13
3.2.1	Couveuses commerciales	13
3.2.2	Couveuse d'œufs d'autruche	14
3.2.3	Revue de la littérature	15
3.3	Matériaux d'isolation	17
3.3.1	Matériaux conventionnels	17
3.3.2	Matériaux à changement de phase (PCM)	18
3.3.3	Coût et accessibilité des matériaux	19
3.4	Équipements de contrôle thermique et hygrométrique	20
3.4.1	Chauffage	20
3.4.2	Ventilation	21
3.4.3	(Dés)humidification	21
3.4.4	Résumé	22

4	Modélisation	23
4.1	Méthode	24
4.1.1	Données climatiques	24
4.1.2	Paramètres	27
4.1.3	Échanges thermiques	28
4.1.4	Limites de température	34
4.1.5	Échanges hygrométriques	34
4.2	Résultats	37
4.2.1	Résultats - température	37
4.2.2	Résultats - humidité	41
4.2.3	Introduction de gel de silice	43
4.3	Conclusion	44
5	Conception et construction	46
5.1	Construction du caisson	46
5.2	Dispositif électronique	50
6	Conclusion et perspectives	54
6.1	Conclusion générale	54
6.2	Limitations et perspectives	56
6.2.1	Conception du caisson	56
6.2.2	Conception du système électronique	58
6.2.3	Approfondissements	59
6.3	Sur la route de Tabligbo	65
	Bibliographie	66
	Annexes	69
A	Contextualisation	69
A.1	Fonctionnement d'Ingénieurs Sans Frontières	69
A.2	Rappels théoriques sur la mesure du taux d'humidité	70
A.3	Mécanisme de retournement des œufs	70
B	État de l'art	71
B.1	Fiche technique ventilateurs	71
C	Modélisation	72
C.1	Fiches techniques PCM	72
C.2	Résultats	74
C.3	Dimensions caisson	74

Chapitre 1

Introduction et motivation

1.1 Introduction générale

Ce travail s'inscrit dans un contexte de développement économique et d'avancées technologiques toujours plus importants. Les pays dits « en développement » subissent depuis de nombreuses années les conséquences de l'exploitation de leurs terres, de leur climat extrême ainsi que, plus récemment, les conséquences du dérèglement climatique. Dans ces pays, beaucoup de personnes, villageois hier, ont migré vers les villes en abandonnant la campagne où il devient, par endroit, difficile de survivre. Certains villageois expriment alors le désir de rester dans leurs villages tout en s'assurant de ne manquer ni d'argent ni de nourriture. Parmi de nombreuses manières de limiter l'exode rural, mettre en place un élevage de poulets dans le village est un objectif réalisable. Une des clés est d'incuber artificiellement une grande quantité d'œufs fécondés dans un incubateur artificiel, aussi appelé *couveuse*. C'est la conception de cette couveuse qui sera développée dans ce travail. Le projet vise à venir en aide à des villageois de Tabligbo, au Togo, qui ont émis ce souhait de développement d'une couveuse semi-autonome. L'association Ingénieurs sans Frontières - Belgique a proposé et soutenu le projet mis en œuvre à l'Université de Liège, Belgique.

Ce travail reprendra toute la réflexion derrière la conception et construction d'un prototype de couveuse adapté au besoin énoncé. Les étapes de modélisation, construction et montage d'un dispositif de contrôle électronique seront détaillées. Notons que cette demande survient car les couveuses commerciales existantes sont non adaptées ou trop coûteuses pour ces zones reculées aux climats rudes.

1.2 Contextualisation

1.2.1 Ingénieurs sans Frontières - Belgique

Ingénieurs sans Frontières, par la suite abrégé par ISF, est une ASBL belge fondée en 1990. Elle résulte de la fusion de l'organisation Ingénieur Agence International (IAI) et d'un kot-à-projet de l'Université Catholique de Louvain. En 2001, l'association a été reconnue en tant qu'ONG et s'investit depuis lors à plusieurs niveaux pour contribuer au progrès humain en luttant contre la pauvreté dans les pays en voie de développement. ISF comprend 50 membres actifs et près de 250 sympathisants. La quasi-totalité sont des bénévoles, principalement des ingénieurs et techniciens, actifs ou retraités, ainsi que des ingénieurs en formation. Leur objectif commun est d'œuvrer pour la solidarité internationale en mettant à disposition leurs connaissances et leur savoir-faire [1].

ISF est composée d'une assemblée générale, d'un conseil d'administration et d'un bureau exécutif. Le CA et le bureau exécutif créent des commissions d'études à buts respectivement stratégiques et opérationnels. Le bureau exécutif pilote également un bureau permanent, où travaille l'unique salariée d'ISF, qui prend en charge les tâches journalières. Une tâche importante est la recherche de financements des projets, sous la forme de dons privés et à provenance d'entreprises. Une figure illustrant la structure d'ISF est disponible en Annexe A.1.

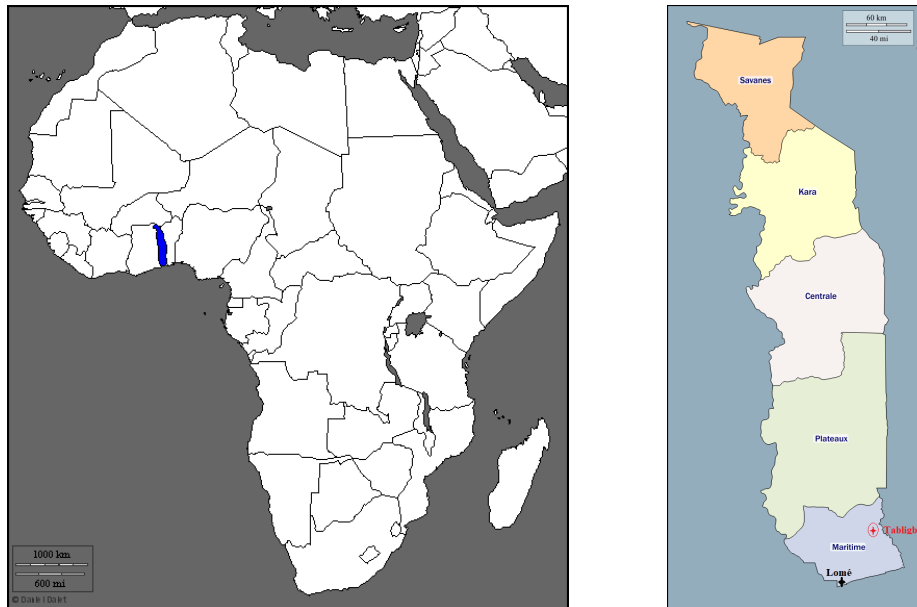
Globalement, ISF promeut le développement et l'utilisation de technologies sensibles aux besoins de l'homme et respectueuses de l'environnement. L'association tente de sensibiliser la population belge à ces problématiques au moyen de week-ends ou de journées de réflexion et d'échange. Elle s'organise autour de trois axes principaux [1] :

- La coopération au Sud : sur demande des populations locales, ISF apporte un soutien technique adapté aux conditions sociétales et climatiques des régions locales ;
- L'éducation au développement au Nord : ISF organise des actions visant à informer et sensibiliser au sujet de la place de l'ingénieur dans la citoyenneté solidaire et la coopération au développement ;
- L'offre de services : ISF contribue au partage d'expertise entre les populations du Nord et du Sud en adaptant les techniques existantes aux moyens disponibles sur place.

1.2.2 Tabligbo, Togo

Le Togo est un pays de l'Afrique de l'Ouest, dont la situation géographique peut être visualisée à la FIGURE 1.1a, sur laquelle le Togo est surligné en bleu. Tabligbo est un

grand village de la région Maritime du Togo, situé à environ 1h au Nord de la capitale côtière, Lomé. La FIGURE 1.1b permet de facilement visualiser ces informations. Tabligbo est un village de moins de 20 000 habitants, dans un pays qui en compte environ 8,6 millions.



(a) Localisation du Togo en Afrique [2]. (b) Régions administratives au Togo [3].

FIGURE 1.1 – Situation géographique de Tabligbo au Togo, Afrique de l’Ouest.

Cette région du globe, et plus particulièrement du Togo, est caractérisée par un climat de type tropical, c’est-à-dire chaud et humide. À Tabligbo, la température est relativement stable tout au long de l’année. On observe 20-25°C la nuit et 30-36°C au plus chaud de la journée, avec quelques variations en fonction des saisons. Les extrema de température n’excèdent pas 16 et 40°C. La saison des pluies s’étale de mi-avril à mi-juillet, bien que les mois de septembre et octobre soient aussi souvent caractérisés par des pluies fréquentes [4,5].

Ce pays en voie de développement a sollicité plusieurs fois le soutien technique d’ISF par le passé. Pour ce projet, le besoin d’aide extérieure s’est manifesté lorsque des difficultés techniques ont été rencontrées lors de la conception d’une couveuse artificielle. Comme nous le détaillerons en profondeur dans la section suivante, les conditions dans lesquelles doivent être conservés les œufs lors de l’incubation sont relativement exigeantes. Si l’on s’écarte excessivement de ces conditions idéales, l’incubation peut totalement échouer et ne mener à aucune naissance de poussins. De plus, les œufs ne peuvent rester statiques trop longtemps et doivent être retournés plusieurs fois par jour pendant l’incubation. Sans système mécanique automatisé, cette action prend du temps et peut mener à l’abandon du projet d’élevage de poulets. Le soutien technique d’ISF a alors été sollicité. La solution proposée va être détaillée tout au long de ce travail.

1.3 Objectifs et challenges

Dans cette section, nous allons détailler les objectifs précis de ce projet, ainsi que les challenges qui lui sont associés. Ceux-ci découlent des contraintes dans lesquelles ce projet évolue.

L'objectif global de ce travail consiste à concevoir une couveuse artificielle capable de recréer les conditions idéales d'incubation d'œufs de poule. Cela inclut un contrôle de la température, de l'hygrométrie, une certaine ventilation, mais aussi l'inclusion d'un mécanisme de retournement des œufs. De ce fait, un dispositif de contrôle électronique devra être créé. Ces contraintes impliquent une certaine demande d'électricité. La zone dans laquelle se trouve Tabligbo a récemment reçu de l'aide de la Fondation HeidelbergCement – Togo [6] et bénéficie depuis lors d'un réseau d'électricité relativement fiable. Dans une première phase du projet, les besoins en électricité de la couveuse sont destinés à être couverts par une connexion à ce réseau. Notons qu'un système de stockage par batterie peut être bienvenu dans ces zones dans lesquelles le réseau électrique n'est pas mûr. De plus, la couveuse dans son ensemble devra ensuite être soit démontable et transportable jusqu'au lieu d'utilisation, Tabligbo, soit facilement reproductible sur place pour permettre une utilisation dans le court terme.

Différents challenges se présentent lors de la conception de la couveuse. On peut en dénombrer trois principaux :

- La température à maintenir à l'intérieur de la couveuse doit être très stable et homogène. Cela implique un contrôle précis via l'utilisation de plusieurs capteurs fiables à différents endroits stratégiques de la couveuse. Sachant que le climat à Tabligbo est chaud, le risque de surchauffe est important. Et ce, d'autant plus que les charges internes à la couveuse entraînent une production de chaleur. Cela inclut la respiration des œufs, la ventilation et tout le système électronique.
- Les coûts doivent être limités. L'utilisation d'un groupe de froid permettant de refroidir l'air intérieur de la couveuse est dès lors compromise et doit être évitée. Les matériaux choisis doivent être bon marché, l'idéal étant qu'ils soient disponibles sur place afin d'assurer la durabilité de la couveuse si des problèmes techniques survenaient.
- Le système doit être simple d'utilisation. La couveuse doit pouvoir être utilisée par des personnes sans formation technique spécifique, pouvant se fier uniquement à un mode d'emploi simple qui leur serait fourni.

Dans une deuxième phase du projet, cette couveuse sera destinée à fonctionner en autosuffisance. Elle devra avoir la possibilité d'être connectée à un panneau photovoltaïque associé à un système de stockage de l'électricité. En effet, les projets menés par Ingénieurs sans Frontières s'inscrivent dans des objectifs sur le plus long terme. Ils

s'adressent à des personnes dans le besoin, vivant éventuellement dans des zones plus reculées. Par conséquent, l'accès à un réseau d'électricité fiable n'est pas garanti et une machine autonome énergétiquement est nécessaire. De plus, si le prototype développé menait à des résultats concluants, l'opportunité de construire d'autres couveuses pour des régions proches, pour des personnes en faisant la demande, serait saisie. L'adaptabilité du prototype proposé est donc primordiale.

La couveuse conçue ne devra en théorie pas être capable de résister aux intempéries. En effet, elle est destinée tant que possible à être placée soit à l'extérieur sous un toit soit à l'intérieur, à l'abri des pluies. Cependant, la conception de la couveuse visera à pouvoir s'adapter à une utilisation non protégée en extérieur. Cela sera d'autant plus utile pour l'adaptabilité du prototype en couveuse autonome via l'utilisation d'une installation photovoltaïque. Notons toutefois qu'une analyse du risque de vol en fonction de la localisation est nécessaire, de même que de potentiels dommages causés par des inondations lors des grosses pluies saisonnières.

En résumé, ce travail visera à répondre aux questions suivantes :

- *Quels sont les paramètres à prendre en compte et comment les contrôler ?* - Cet aspect est détaillé au Chapitre 2.
- *Qu'est-ce qui existe déjà et qu'est-ce qu'on peut en retirer ?* - Au Chapitre 3, nous analyserons les couveuses commerciales existantes et retirerons les informations disponibles dans la littérature .
- *Comment évaluer le besoin en énergie et les matériaux nécessaires à la réalisation des objectifs ?* - Une modélisation et les résultats de simulation obtenus seront présentés au Chapitre 4.
- *Par quelles étapes passent la conception et construction d'une couveuse ?* - Les descriptions du caisson de la couveuse et du dispositif électronique sont détaillées au Chapitre 5.
- *Comment poursuivre le projet, l'améliorer et l'adapter à d'autres situations ?* - Des conclusions seront tirées et des limitations, perspectives et approfondissements seront présentés au Chapitre 6.

Chapitre 2

Problématique

Afin de s'approprier ce projet de couveuse, il est nécessaire de décrire précisément les besoins qu'ont les œufs pour être efficacement incubés. Une couveuse artificielle est un appareil qui vise à reproduire des conditions idéales d'incubation, naturellement créées par la poule lors de la couvaison d'œufs fécondés. Ces conditions idéales peuvent être définies comme les conditions selon lesquelles une poule saine va permettre à l'embryon d'un œuf fécondé de se développer avec succès afin de donner naissance à un poussin en bonne santé après une durée déterminée. Globalement, ces conditions idéales incluent les points suivants :

- La *durée* de l'incubation est de 21 jours au maximum. Les œufs sains peuvent éclore à partir du 19^e jour d'incubation.
- La *température* idéale d'incubation est de 37,5°C. Cette température doit être maintenue très stable pendant toute la durée de l'incubation.
- L'*humidité relative* (RH - Relative Humidity) dans la couveuse doit être située entre 40 et 55% pendant les 18 premiers jours d'incubation. Pendant les trois derniers jours, l'humidité relative doit atteindre 65-85%.
- Une certaine *ventilation* est nécessaire pour brasser l'air afin d'obtenir des conditions ambiantes (température, hygrométrie) homogènes. De plus, une partie du CO_2 doit être évacuée afin d'assurer un taux d'oxygène suffisant dans l'air.
- Les œufs doivent être *retournés*, plusieurs fois par jour.

Ces conditions seront détaillées dans les sections suivantes. La littérature scientifique à ce sujet étant approximative, les différentes sources consultées sont croisées afin de choisir les conditions qui conduiront à un taux d'incubation le plus élevé possible. Le taux d'incubation est défini comme le rapport du nombre d'œufs incubés qui éclosent par rapport au nombre d'œufs fécondés introduits dans l'incubateur.

2.1 Durée d'incubation

La durée d'incubation est de 21 jours. À partir du 19^e jour cependant, les œufs peuvent commencer à éclore pour donner naissance aux poussins. Il est possible de conserver des œufs tout juste pondus pendant quelques jours avant de commencer l'incubation. Ceux-ci doivent alors être conservés au frais (entre 12 et 14°C) et dans une atmosphère humide ($RH > 75\%$). Il est conseillé de limiter ce stockage intermédiaire à 7 jours au maximum [7, 8].

2.2 Température

La température dans la couveuse doit être maintenue relativement constante tout au long de l'incubation. Selon plusieurs recherches, la température idéale d'incubation serait de 37,5°C, avec des déviations acceptables d'environ 0,3°C [7, 9, 10]. La plupart des sociétés commerciales consultées indiquent maintenir la température à 37,5 ou 37,7°C pendant les 18 premiers jours et 37,2 ou 37,5°C pendant les 3 derniers jours [11–16].

Le maintien de la température aux niveaux spécifiés est primordial afin de garantir une bonne incubation. Le taux de mortalité augmentera de façon significative si la température passe sous 35,6°C ou au-delà de 39,4°C pendant plusieurs heures [7]. Les variations de température ne sont donc pas fatales à condition qu'elles soient légères (1-2°C maximum) ou qu'elles soient très limitées dans le temps.

Il serait également possible qu'un refroidissement momentané des œufs incubés puisse être bénéfique. Cette méthode vise à reproduire au mieux le comportement de la poule couveuse qui doit interrompre de temps à autre la couvaie afin de se nourrir. Il apparaît qu'aucune étude fiable n'ait pu à ce jour vérifier cette hypothèse, qui ne sera donc pas considérée dans la suite de ce travail.

2.3 Hygrométrie

Le contrôle de l'hygrométrie au sein de la couveuse est un élément tout aussi important que la température. Quelques rappels théoriques sur la notion d'humidité relative sont proposés en Annexe A.2. Il est nécessaire de maintenir le taux d'humidité à un certain niveau dans le but de favoriser le développement adéquat de l'œuf fécondé. L'œuf, une fois pondu, possède une certaine quantité d'eau en son sein. Lors de l'incubation, une partie de cette eau s'évapore au travers de la coquille poreuse. À cette évacuation d'eau est associée une perte de poids qui se situe idéalement vers 13-15% du poids initial de l'œuf [9]. Si le RH (Humidité Relative) est supérieur aux niveaux conseillés, l'œuf ne perd pas assez d'eau, et vice versa. Selon la littérature

et les sociétés commerciales consultées [11–16], on retrouve généralement des RH s'étalant de 40 à 55% lors des 18 premiers jours d'incubation. Pendant les 3 derniers jours, le RH doit être augmenté, pour atteindre environ 20-30% de plus, entre 65 et 85%.

Au Togo, la température moyenne extérieure est d'environ 25°C avec une humidité relative de 80%, ce qui correspond à une teneur en eau de 16 g d'eau par kg d'air sec. Si cet air est introduit dans la couveuse et chauffé à 37,5°C, l'humidité relative est fortement réduite. À la TABLE 2.1, un exemple chiffré des données rencontrées au cours de ce travail est disponible. De plus, les œufs émettent une quantité non négligeable d'eau. Les interactions entre l'œuf en développement et l'air intérieur de la couveuse sont donc à évaluer. Pour ce faire, un bilan global sur les échanges hygrométriques est nécessaire (voir section 4.1.3).

Cas	Température [°C]	Teneur en eau [g d'eau/kg d'air]	Humidité relative [%]
1	25	16	80
2	37,5	16	39

TABLE 2.1 – Exemple de la variation de l'humidité relative de l'air avec la température, en supposant un chauffage isobare entre 25 et 37,5°C.

2.4 Ventilation

La couveuse doit être dotée d'un système de brassage de l'air par ventilation. Cela se justifie par le fait que les conditions auxquelles sont soumis les œufs doivent être homogènes tout au long de l'incubation. Les sociétés commerciales conseillent par ailleurs de changer 2 ou 3 fois les œufs de place lors de l'incubation [11–16], afin de pallier au manque d'homogénéité pouvant survenir entre différents endroits de la couveuse. Ces zones hétérogènes peuvent apparaître près de la bouche d'aération, du système de chauffage, d'une vitre, etc. L'efficacité de cette ventilation peut être évaluée en mesurant la température et l'hygrométrie à différents endroits de la couveuse, lors de différentes conditions opératoires.

Une certaine aération est également nécessaire afin d'introduire de l'air frais dans la couveuse. Les œufs *respirent* et ne perdent donc pas uniquement de l'eau, mais émettent aussi du CO_2 . Aucune donnée fiable à ce sujet n'a pu être trouvée, tant en termes d'ordre de grandeur d'émission de CO_2 par les œufs ou de taux de CO_2 maximum acceptable au sein de la couveuse. Il est conseillé à l'être humain de ne pas être exposé en continu à des concentrations en CO_2 dépassant les 1000 ppm (parties par millions), c'est-à-dire 0,1%. Par hypothèse, nous fixerons cette valeur comme concentration moyenne à maintenir dans la couveuse. De plus, une valeur limite de 5000 ppm (0,5%) est choisie, au-delà de

laquelle l'enclenchement d'une ventilation est conseillé.

2.5 Retournement des œufs

Un dernier aspect à considérer est le retournement périodique des œufs. Celui-ci est nécessaire afin d'éviter une malformation de l'embryon au sein de l'œuf [7]. Si un œuf restait statique trop longtemps, le jaune aurait tendance à se coller à la membrane intérieure de l'œuf. Notons qu'un simple pivotement de 90° de l'œuf est suffisant, il n'est pas nécessaire de leur imposer une rotation complète, c'est-à-dire de 180° . De façon naturelle, les œufs sont retournés par la poule plusieurs fois par jour. La fréquence du retournement semble dépendre de plusieurs facteurs et les recherches concernant cet aspect ne seront pas approfondies dans ce travail. Il semble par contre primordial de retourner les œufs avec le plus de précautions possible, car des mouvements brusques peuvent perturber le développement de ceux-ci.

Pour ce travail, le système de retournement des œufs sera repris d'un projet effectué par trois étudiants de l'HELMo - Gramme (*Haute École Libre Mosane - Liège*) dans le cadre d'un cours de projet multidisciplinaire. Le rapport complet de ce travail est fourni en annexe. Le système utilisé se résume à deux colonnes en métal auxquelles sont fixés plusieurs plateaux. Les œufs peuvent être placés sur ces plateaux en étant déposés sur de simples mousses. Leur position est alors fixée. Les plateaux, constituant les différents étages de la couveuse, peuvent pivoter de $\pm 45^\circ$. Ce pivotement est garanti par un moteur exerçant un couple sur le plateau supérieur, auquel sont reliés les plateaux inférieurs. La transmission de ce couple au plateau supérieur se fait via une chaîne de vélo. Ce simple mécanisme permet l'utilisation d'un moteur de faible puissance. Celle-ci est estimée à moins de 2W, pour un couple de 5,4 Nm. Le système global peut être visualisé à la FIGURE 2.1 tandis que les détails techniques du moteur utilisé sont disponibles en Annexe A.3.

Les plateaux ont une surface carrée de 54 cm de côté et le système global, une hauteur de 115 cm. Supposant que les œufs ont un diamètre de 6 cm, un maximum de 7 rangées de 7 œufs peut être placé par plateau, pour garantir un espacement suffisant entre les œufs. Le mécanisme global peut alors contenir près de 150 œufs au total (49 pour chacun des trois plateaux). Le système est fonctionnel et peut être activé de façon manuelle. En mode automatique, il est prévu que les plateaux contenant les œufs pivotent toutes les heures avec une vitesse de rotation faible, ce qui permet de faire pivoter les œufs avec la douceur nécessaire. Pour changer d'orientation, le mécanisme prend environ 30 secondes.

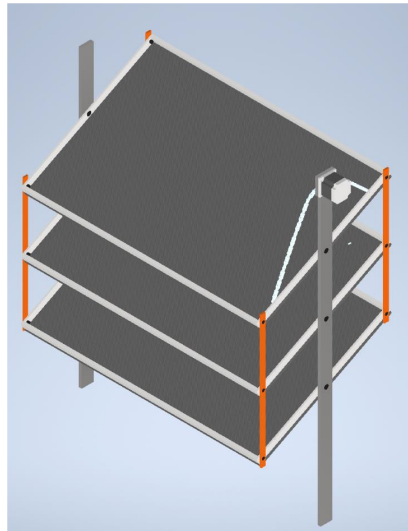


FIGURE 2.1 – Modélisation 3D simplifiée du système de retournement des œufs via Autodesk Inventor [17].

Chapitre 3

État de l'art

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous commencerons par décrire plus en profondeur les interactions des œufs avec l'air intérieur de la couveuse. Ensuite, une revue des couveuses existantes sera présentée, incluant des couveuses commerciales, une expérimentale et d'autres développées dans le cadre de recherches scientifiques. Par après, les différentes possibilités des matériaux et composants à utiliser pour la conception vont être décrites. Cela implique les matériaux d'isolation, le système de chauffage et de ventilation, ainsi que le système de dés/humidification. Dans le chapitre suivant, une modélisation complète de la couveuse sera présentée (chapitre 4). Cela permettra alors d'orienter les choix de composants, basés sur les résultats obtenus.

3.1.1 Interaction de l'œuf avec l'air intérieur de la couveuse

Les œufs interagissent avec l'air intérieur en émettant de la chaleur, ainsi qu'en évacuant une certaine quantité d'eau. Les émissions de CO_2 résultant de la respiration des embryons ne seront pas étudiées plus en détail (voir à ce sujet la section 2.4).

Globalement, les calculs d'émission de chaleur se basent sur la consommation d'oxygène de l'être vivant. Pour l'être humain, des études montrent qu'il produit au repos un peu plus de 1 W/kg [18]. Cela donne un ordre de grandeur qu'il est intéressant de comparer avec les données rencontrées. Différentes recherches ont été menées afin d'estimer les émissions de chaleur des œufs lors de l'incubation. *French* [9] résume les résultats de ces études et principalement celle de *Romijn* et *Lokhorst* [19]. Les résultats globaux sont disponibles à la FIGURE 3.1. Un œuf standard pèse environ 60 g. Pendant toute la durée de l'incubation, de l'eau s'échappe par évaporation et émet environ 19 mW de chaleur. Le dégagement de chaleur métabolique augmente au long de l'incubation pour atteindre 130 mW par œuf lors des trois derniers jours, ce qui représente environ 2 W/kg. Cette augmentation est liée à la croissance de l'embryon.

Pour une couveuse d'une capacité de 150 œufs, le dégagement de chaleur global devient important vers la moitié de la durée d'incubation. Il avoisine alors 10 W et peut dépasser 20 W au 15e jour.

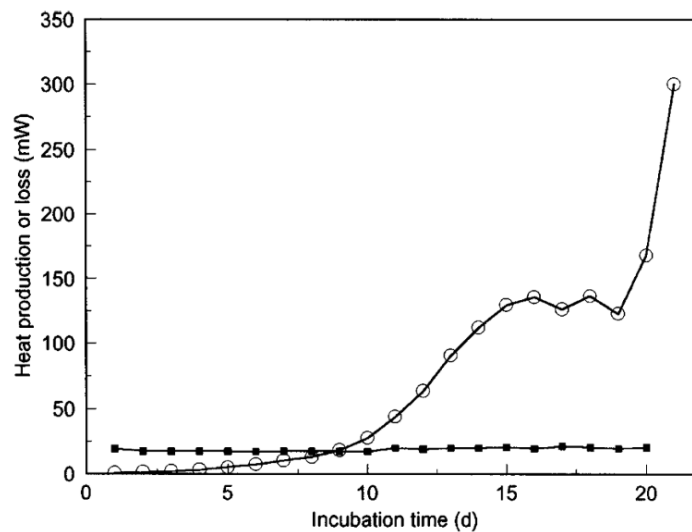


FIGURE 3.1 – Production de chaleur métabolique (○) et perte de chaleur par évaporation (■) d'un œuf de 64 g pendant l'incubation [9], depuis des données de [19]. On peut voir que la production de chaleur par évaporation reste constante tandis que la production de chaleur métabolique augmente tout au long de l'incubation.

Le taux d'humidité à l'intérieur de la couveuse est fortement influencé par les pertes en eau des œufs au cours de l'incubation. Celles-ci s'élèvent à approximativement 0,4 g par jour pour un œuf de 60 g (*French* [9]). Cela représente environ 60 g d'eau produite par jour dans une couveuse de 150 œufs. L'humidité extérieure étant globalement élevée au Togo, une simple ventilation ne suffit pas toujours pour évacuer cette quantité d'eau. Dès lors, un besoin de *déshumidification* apparaît. Nous discuterons de la méthode choisie à la section 3.4.3.

Un dernier aspect à prendre en compte est le bon développement des œufs. Afin de pouvoir l'évaluer, il est nécessaire d'effectuer des *mirages*. Ce mirage consiste à observer les œufs en appliquant une lumière forte sur ceux-ci. Un habitué pourra alors immédiatement juger si l'œuf est sain ou s'il faut l'écarter, pour qu'il ne contamine pas les autres. Ce mirage peut également servir à détecter si la perte de poids, associée au taux d'humidité, est adéquate. Il est conseillé d'effectuer le mirage des œufs aux jours 7 et 14 de l'incubation [7, 20]. De plus, il est préférable de prévoir une vitre dans la porte de la couveuse, permettant de détecter de l'extérieur un problème potentiel. Des ouvertures intempestives empêcheraient la couveuse et son système de contrôle de stabiliser la température à la valeur adéquate.

3.2 Couveuses existantes

Dans cette section, les informations disponibles dans les fiches techniques de sociétés commerciales seront analysées, afin de comprendre leur fonctionnement [11, 16]. Ensuite, le cas particulier d'une couveuse d'œufs d'autruche artisanale sera présenté. Finalement, certaines recherches récemment publiées seront également analysées afin d'orienter les choix de composants.

3.2.1 Couveuses commerciales

Il ressort de l'analyse des fiches techniques des couveuses commerciales que la demande de puissance associée à leur fonctionnement est relativement élevée. En effet, ces couveuses n'ont pas été conçues dans le but d'être bon marché, en utilisant, entre autres, des composants peu énergivores. Par conséquent, seuls les principes de base de fonctionnement de ces couveuses commerciales seront retenus, dans l'objectif de garder les aspects simples et utiles pour la conception de notre couveuse.

Pour le contrôle de la température par chauffage, la plupart des couveuses utilisent une ou plusieurs résistances électriques, en fonction de la taille de la couveuse. Des thermostats ayant une tolérance de $0,1^{\circ}\text{C}$ sont utilisés afin de contrôler cette température et d'activer les résistances en cas de besoin. Notons que les couveuses commerciales existantes sont destinées à être placées dans des environnements tempérés, entre 20 et 25°C . L'application de gros écarts de température n'est pas prévue pour ce type de couveuses, ce qui est fondamentalement différent du cas étudié.

Pour les couveuses bon marché, l'hygrométrie s'effectue par le placement d'un ou plusieurs récipients d'eau à l'intérieur de la couveuse. L'émission d'eau est proportionnelle à la surface d'eau en contact avec l'air, ce qui peut donc être manuellement et simplement contrôlé. D'autres couveuses, plus sophistiquées, sont équipées d'humidificateurs, qui peuvent être de plusieurs types. Un humidificateur à ultrasons utilise par exemple un principe de vibrations à haute fréquence pour produire de la brume. Une résistance plongée dans de l'eau permet d'augmenter le taux d'humidité par évaporation. Des hygromètres sont généralement utilisés pour le contrôle de l'humidité. Les hygromètres à bulbe humide, par exemple, mesurent la différence entre la température de bulbe humide et la température de l'air sec afin d'en déduire l'humidité relative de l'air. Aucun dispositif de déshumidification n'est renseigné dans les couveuses commerciales rencontrées.

Peu d'informations sont disponibles concernant le type de ventilateurs utilisés. La technologie de couveuse *Borotto* utilise un système avancé et breveté de contrôle de la distribution de température, via l'utilisation d'un contrôleur PID [11]. Le réglage

du débit de ventilation est relié à ce contrôleur. Pour le retournement des œufs, les couveuses commerciales utilisent toutes des systèmes de plateaux pivotants de façon manuelle ou automatique, généralement à $\pm 45^\circ$.

Les couveuses étudiées, comme mentionné plus haut, sont destinées à être utilisées dans des endroits tempérés, ne dépassant pas 25°C . Ces zones ne sont pas supposées subir de coupure d'électricité particulière importante. De ce fait, aucun dispositif de stockage d'énergie n'est proposé comme accompagnement de ces technologies.

Il est difficile d'estimer le taux d'incubation que peuvent fournir les couveuses commerciales. Celui-ci est variable, ne dépendant pas uniquement de la couveuse, mais aussi de ses conditions d'utilisation, ainsi que de la qualité des œufs fécondés qui y seront introduits. Cependant, il est renseigné dans l'article de Tiam Kapen [20] un taux d'incubation variant entre 96 et 98% pour trois couveuses commerciales de grande taille (entre 350 et 1500 œufs).

3.2.2 Couveuse d'œufs d'autruche

Dans le cadre de ce travail, nous avons eu l'occasion de nous entretenir avec un ancien producteur de couveuses d'œufs d'autruche. Certaines caractéristiques de ces couveuses ont été retenues. Tout d'abord, différentes informations ont été récoltées concernant les matériaux d'isolation utilisés pour constituer les parois de la couveuse. Ensuite, les détails du système de ventilation, de chauffage et d'aménagement intérieur de la couveuse ont été fournis.

Le principal élément isolant utilisé est une couche de polystyrène. L'extérieur de la couveuse est recouvert de panneaux contreplaqués. Ceux-ci permettent de donner un bel aspect à la couveuse et, de par leur nature lisse et solide, de résister aux intempéries auxquelles pourrait être soumise la couveuse lors du transport. Le système de ventilation et de chauffage est couplé. Les ventilateurs utilisés sont du type de ceux utilisés dans les ordinateurs portables modernes, dont la puissance consommée est peu importante, mais suffisante pour brasser l'air. Le fonctionnement concret du couplage résistance-ventilateurs peut être visualisé à la FIGURE 3.2. Pour le retournement des œufs, la solution la plus simple est l'utilisation d'un ancien vérin d'antenne parabolique. L'impulsion d'un moteur procure au vérin un mouvement de translation verticale qui permet de mettre les plateaux en mouvement.

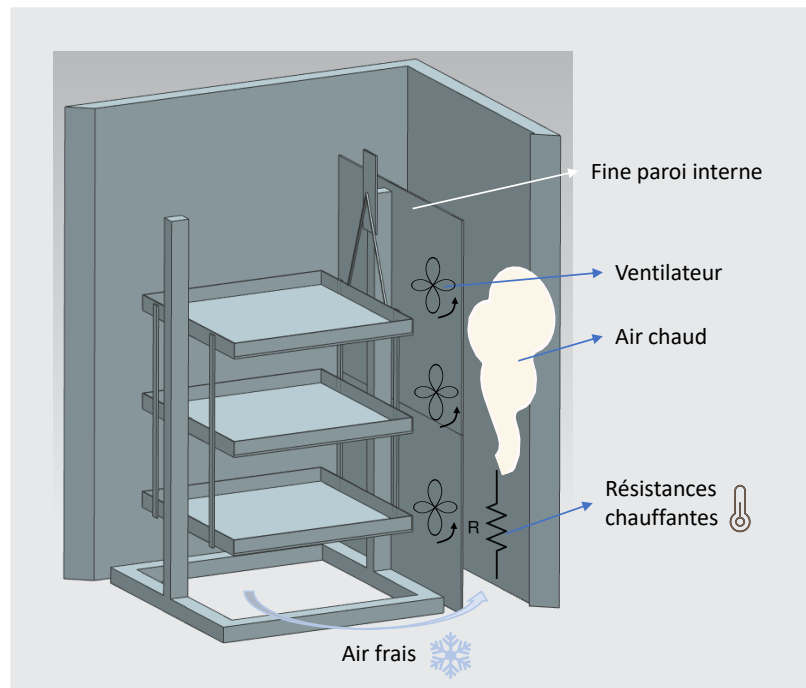


FIGURE 3.2 – Schéma du fonctionnement de la couveuse d'œufs d'autruche. Les résistances électriques, placées dans le dessous de la couveuse, réchauffent l'air frais. Les ventilateurs, placés au niveau des différents plateaux d'œufs, pulsent l'air chaud à hauteur de la surface des œufs. Le couplage résistance-ventilateurs est séparé du reste de la couveuse par une fine paroi.

3.2.3 Revue de la littérature

Les articles résultant de recherches menées dans le domaine des incubateurs ont été analysés. Certaines informations ont déjà été retirées et exposées au chapitre 2, telles que les températures de consigne et l'hygrométrie. D'autres informations sont cependant utiles au développement et à la conception de la couveuse.

Récemment, des recherches ont été menées par des universitaires au Cameroun. Ceux-ci visaient à développer une couveuse d'une capacité de 600 œufs (c'est-à-dire environ 4 fois plus grande que celle que nous étudions) qui soit efficace, bon marché et adaptée pour ce pays d'Afrique centrale [20]. Cet article donne des informations précieuses sur les composants utilisés, sur l'électronique et le câblage électrique. Pour la ventilation, plusieurs ventilateurs de 12 V ont été utilisés, consommant au total moins de 15 W de puissance électrique. Le couple résistance-ventilateur est placé dans la partie inférieure de la couveuse. Un humidificateur à ultrasons est utilisé pour maintenir le RH à 45% au début de l'incubation et l'élever à au moins 65% pour les trois derniers jours. Le système de retournement des œufs consiste également en un vérin mécanique, contrôlé électroniquement. Les résultats de cet incubateur *low cost* renseignent un taux d'incubation de 87%.

Un deuxième article développe avec précision la conception d'une couveuse *low cost* au Nigéria [8]. Un taux d'humidité de 60% est imposé pendant la première phase d'incubation et est augmenté jusqu'à 70% pour les trois derniers jours. Ces taux d'humidité sont atteints via le placement d'un petit réservoir d'eau à l'intérieur de la couveuse et mesurés par un hygromètre à bulbe humide artisanal. Ceci consiste à placer un tissu en coton humide (ou trempant dans de l'eau) autour d'un thermomètre classique et à mesurer la différence de température entre la température *sèche* et l'*humide*. Ces taux d'humidité, quoique élevés comparés aux couveuses commerciales, semblent mener à des résultats satisfaisants. En effet, le taux d'incubation avancé est de 84% pour cette couveuse d'une capacité de 540 œufs. Il est mentionné que les œufs devraient être placés « à l'envers », avec leur pointe dirigée vers le bas, pour assurer un bon développement de l'embryon. Notons que les matériaux et composants utilisés sont tant que possible *locaux*. Du simple bois a par exemple été utilisé comme paroi de la couveuse.

Un dernier article, moins récent, relate le développement d'une couveuse en Thaïlande. La principale différence par rapport à la couveuse développée au Cameroun est l'utilisation de lampes halogènes en guise de mécanisme de chauffage [10]. C'est ce qui a également été choisi pour la couveuse nigériane. La couveuse peut accueillir 30 œufs à la fois. Le taux d'incubation atteint 82%.

Les articles étudiés ne font pas mention d'un quelconque besoin de déshumidification ou de refroidissement de la couveuse, malgré le développement de ces couveuses dans des régions aux climats chauds et humides. En effet, ces couveuses sont destinées à être placées à l'intérieur, dans des pièces à température stable et modérée, c'est-à-dire inférieure à 30°C. Cette hypothèse n'est pas valable pour notre couveuse.

Il est intéressant de comparer les résultats de ces (prototypes de) couveuses en termes de taux d'incubation. Il n'est pas surprenant que ces taux d'incubation soient moins élevés que ceux renseignés pour les couveuses commerciales. En effet, ces dernières ne sont pas adaptées à être utilisées et construites dans des zones reculées, dans lesquelles l'accès aux matériaux adéquats est plus difficile. L'acquisition de matériaux importés est également limitée par le coût du transport international. De plus, aucun effort particulier n'est fourni pour réduire la consommation d'énergie. Par conséquent, les conditions d'incubation créées par ces couveuses commerciales sont visiblement meilleures, étant capables de maintenir des températures et taux d'humidité très stables. On remarque ainsi une diminution d'environ 10% du taux d'incubation avec les couveuses *low cost*.

3.3 Matériaux d'isolation

Le choix des matériaux composant les parois de la couveuse est primordial. Celle-ci doit simultanément consommer peu de puissance de chauffage, pour limiter la consommation énergétique, et également éviter les surchauffes, dues à des températures extérieures très élevées en journée. Il faut ajouter à cela les charges internes à la couveuse, décrites précédemment. Cette double mission est complexe étant donné que l'utilisation d'un système frigorifique doit être évitée pour réduire les coûts d'installation et de fonctionnement. Dans ce contexte, le choix de matériaux relativement classiques va être tout d'abord décrit. Ensuite, l'option d'utiliser des matériaux à changements de phase (PCM - Phase Change Materials) sera analysée.

3.3.1 Matériaux conventionnels

En reprenant les sources détaillées à la section précédente (section 3.2), on repère certaines bonnes pratiques en termes de constitution de parois. Celles-ci sont généralement composées de trois couches de matériaux distincts :

- *Couche métallique interne*, par exemple de l'aluminium ou du zinc. Cette couche permet une bonne isolation du reste de la paroi à l'humidité régnant dans la couveuse [10, 20]. De plus, cette couche de métal assure une certaine rigidité.
- *Couche extérieure en bois ou panneaux contreplaqués* [8, 20]. La couche extérieure doit pouvoir donner un aspect esthétique correct à l'installation, en plus d'être résistante aux contaminations extérieures. La vulnérabilité de ces panneaux à l'humidité doit être étudiée dans le cas où la couveuse devrait être placée à l'extérieur.
- *Couche d'isolation*. Celle-ci peut être de plusieurs types. De la laine de verre est envisagée, au même titre que des couches de polystyrène expansé (*frigolite*). Ces deux matériaux d'isolation ont globalement les mêmes caractéristiques physiques (conductivité thermique, capacité calorifique et masse volumique). La laine de verre présente un meilleur comportement face à l'humidité. Elle évacue en effet plus rapidement l'humidité que le polystyrène, qui est plus sujet à présenter des traces de moisissure [21].

Pour les couches interne et externe, une solution est l'utilisation de panneaux de type *betonplex* [22], aussi appelés *panneaux marins*. Ceux-ci sont des panneaux contreplaqués recouverts d'une couche de surface en époxy ou de bakélite, qui rend leur surface lisse et imperméable. Ces panneaux sont donc relativement résistants à l'humidité. Selon l'épaisseur choisie, une certaine rigidité est également garantie. Les panneaux en *betonplex* rendent alors inutile l'utilisation d'une couche de métal.

Il est possible d'ajouter une couche externe supplémentaire de *pare-vapeur* pour étanchéifier la couveuse. Cela devient utile lorsque la teneur en eau à l'extérieur est élevée, par exemple plus de 18 g d'eau/kg d'air sec pendant plusieurs jours. Le pare-vapeur peut être de plusieurs types comme une couche de peinture à l'huile ou un film de polyester.

3.3.2 Matériaux à changement de phase (PCM)

Les matériaux PCM sont des matériaux utilisés dans différents contextes pour leur capacité à stocker une grande quantité d'énergie thermique à une température relativement constante. Pour une même quantité de matériau, la chaleur latente dégagée lors d'un changement de phase est significativement plus élevée que la chaleur sensible dégagée à une température éloignée de la température de changement de phase [23]. Dans une certaine gamme de température, il est possible de créer un matériau changeant de phase à n'importe quelle température, en associant différents matériaux. Cependant, le changement de phase ne s'effectue pas exactement à une température précise. Il en résulte une certaine distribution du stockage de chaleur autour de la température de changement de phase. On peut parler de matériau PCM à *haute capacité* lorsque cette distribution est étroite autour de la température de changement de phase. Pour visualiser ce phénomène, comparer les fiches techniques disponibles en Annexe C.1.

Dans ce contexte, un matériau PCM pourrait être utilisé afin d'amortir les variations journalières de température extérieure. En choisissant judicieusement la température de changement de phase et la distribution du stockage de chaleur, le matériau PCM pourrait jouer le rôle de tampon thermique. L'intérieur de la couveuse évacuerait vers ses parois une quantité de chaleur relativement stable à toute heure de la journée. De ce fait, il ne serait alors pas nécessaire de fournir une grande quantité de chaleur lors des heures froides et les surchauffes seraient aisément évitées. Voir à ce propos les figures et résultats exposés à la section 6.2.3 relative aux approfondissements.

Entre 20 et 40°C, les matériaux PCM généralement utilisés sont soit des composés organiques (tels que les acides gras, les paraffines) soit des composés inorganiques (sels hydratés, eau, etc.), soit encore un mélange de différents composés : des matériaux eutectiques. Lors du choix du type de matériau PCM, il faut prendre en compte certaines autres caractéristiques telles que la variation de volume du PCM lors du changement de phase ou l'absence d'éléments toxiques ou inflammables [24, 25].

Les conductivités thermiques des deux phases (liquide et solide) d'un matériau PCM peuvent différer significativement ou bien être semblables. Dans le premier cas, la surface d'échange doit être maximisée pour favoriser des échanges thermiques efficaces. Dans le deuxième cas, seul le volume et donc la masse de PCM utilisée importent a

priori. Par la suite, nous n'irons pas plus loin dans la description du comportement du matériau PCM. En pratique, l'homogénéité en température d'un matériau PCM est rarement atteinte. Cela complexifie son utilisation et donc son efficacité.

3.3.3 Coût et accessibilité des matériaux

Dans le but d'orienter le choix final, il est nécessaire de faire une brève analyse économique des matériaux évoqués. L'accessibilité des matériaux dans la région visée par le projet est également à prendre en compte. Pour rappel, le prototype développé est amené à pouvoir être reproduit sur place.

Pour l'isolation de la couveuse, le polystyrène sera préféré à la laine de verre. Dans ce village proche des côtes togolaises, la présence de nombreux marchés aux poissons assure l'existence de grandes quantités de polystyrène gratuit (récupération). Dans l'hypothèse de construction d'une couveuse dans un endroit plus éloigné des côtes, le polystyrène reste indiqué au vu du coût très faible de ce matériau. Ensuite, les panneaux contreplaqués de type *betonplex* seront privilégiés pour la rigidité mécanique et la protection contre les intempéries, au vu de la surface du *betonplex* qui constitue un obstacle contre l'humidité. Il est possible de recréer globalement les propriétés de ce matériau en alliant un panneau de bois avec une couche supérieure de protection. De ce fait, cette solution est relativement accessible et bon marché.

La construction d'une couveuse directement dans un pays d'Afrique peut permettre d'utiliser du bois exotique local, difficilement accessible, ou coûteux, dans les pays d'Europe. Certaines espèces de bois présentent des caractéristiques intéressantes pour cette application, telle que leur imputrescibilité, c'est-à-dire leur excellente résistance à la putréfaction par excès d'humidité, par exemple.

Le choix des matériaux est motivé par le besoin de résistance à l'humidité, de solidité de la structure et, dans une moindre mesure, de l'aspect esthétique du caisson de la couveuse. C'est par contre au moyen de modélisations que les épaisseurs de ces matériaux peuvent être déterminées. L'introduction de matériaux PCM dans les parois en polystyrène sera également envisagée (chapitre 4). D'autre part, la disponibilité des matériaux et leur coût seront aussi pris en compte lors de la réalisation du prototype de la couveuse (chapitre 5) afin d'assurer une certaine rapidité d'approvisionnement et un moindre coût de développement du projet.

3.4 Équipements de contrôle thermique et hygrométrique

Dans cette section, nous décrirons les différentes options en termes de contrôle thermique et d'hygrométrie. Cela inclut le système de chauffage et de ventilation à choisir, ainsi que le moyen de contrôle de l'hygrométrie au sein de la couveuse.

Au niveau de l'alimentation, utiliser des systèmes fonctionnant à basse tension (12V) permet de se brancher plus facilement sur une installation photovoltaïque couplée à un système de batterie. Cependant, utiliser des systèmes se connectant au réseau électrique (230V) est également acceptable. Cela permet par exemple de réduire l'intensité du courant circulant dans les appareils, ce qui diminue les besoins de protection et de taille des câbles électriques utilisés. Lors du choix final des composants, il faut préconiser la simplicité globale de la solution. Cela implique d'utiliser des composants se branchant sur la même source de tension, en évitant de multiplier les intermédiaires tels que des transformateurs de puissance.

3.4.1 Chauffage

Techniquement, le système de chauffage choisi sera placé dans la partie inférieure de la couveuse, afin de réchauffer l'air froid s'y trouvant. Par convection naturelle, l'air chaud généré se dirigera vers la partie supérieure. Des ventilateurs sont nécessaires pour brasser l'air et homogénéiser la température.

En pratique, deux solutions préférentielles se présentent. Tout d'abord, il est possible d'utiliser des lampes halogènes qui diffusent une chaleur équivalente à leur puissance électrique. C'est la solution préconisée par les développeurs d'incubateurs au Nigeria et en Thaïlande [8, 10, 26]. Ensuite, il est possible de réchauffer l'air via un simple chauffage par résistance électrique, tel que celui décrit dans le récent article de l'incubateur au Cameroun [20]. Ces deux solutions sont intéressantes, car elles assurent que ces types de systèmes sont disponibles dans ces zones relativement reculées.

Une dernière solution est l'utilisation d'un câble chauffant. Ce type de câble est couramment utilisé dans des serres nécessitant une source de chaleur répartie sur la surface exploitée. Généralement, une puissance d'environ 10 à 20W par mètre de câble peut être fournie par ces systèmes. Ces câbles fonctionnent avec un thermostat et adaptent leur puissance de chauffage aux besoins. Cependant, l'utilisation de câble chauffant peut mener à des problèmes d'interface importants. Ce type de technologie est difficilement contrôlable électroniquement. Si un problème survient, par exemple une mauvaise régulation par le thermostat, l'utilisateur pourra difficilement réparer le système et devra remplacer l'entièreté du dispositif.

Le choix final s'oriente finalement vers l'utilisation d'*ampoules halogènes*. Elles offrent l'avantage d'être relativement bon marché, peuvent être trouvées localement et commandées simplement au moyen d'un microprocesseur. Rappelons que l'utilisation d'un groupe de froid pour refroidir l'air intérieur est écartée au vu du coût d'investissement et de fonctionnement.

3.4.2 Ventilation

Le système de ventilation vise principalement à homogénéiser la température via le brassage de l'air. Cette homogénéité doit cependant être vérifiée lors de phases de test sur le prototype final. Il aide également à faire circuler l'air frais introduit lors de l'aération de l'incubateur. L'utilisation d'un système de ventilation peu énergivore est primordiale. En effet, un système très efficace mais très consommateur dégagerait une quantité de chaleur importante à l'intérieur de la couveuse. Cependant, le volume intérieur de l'incubateur est de l'ordre de 1 m^3 , ce qui implique que les besoins de ventilation sont relativement modérés.

Le choix s'oriente vers l'utilisation de petits ventilateurs axiaux, fonctionnant à basse tension (12V). Leurs diamètres sont de 80 mm pour une puissance nominale de 1,92 W (voir fiche technique en Annexe B.1). C'est globalement ce type de simples ventilateurs qui est utilisé pour les applications de couveuses [8, 10, 20, 26].

Techniquement, l'air chaud sera généré dans la partie inférieure de la couveuse. Afin d'éviter les surchauffes dues à la proximité de la source de chaleur, une fine paroi interne est placée entre les plateaux contenant les œufs. Un ventilateur est placé à hauteur de chacun des plateaux afin de pulser l'air chaud. Cette technique est supposée suffisante pour garantir l'homogénéisation nécessaire de la température. Une figure illustrant ce système a été présentée à la section 3.2.2 (FIGURE 3.2).

3.4.3 (Dés)humidification

L'intérieur de la couveuse doit être maintenu à un certain niveau d'hygrométrie. Globalement, le taux d'humidité de l'air extérieur est élevé dans ces zones maritimes au climat tropical. Il dépasse fréquemment les 40% de RH à la température de consigne de la couveuse (37,5°C). En ajoutant à cela l'émission d'eau par les œufs, la limite de 55% de RH peut être dépassée. Les besoins d'humidification sont donc peu fréquents, mais peuvent, si besoin, être assouvis par le placement d'un réservoir d'eau dans la partie inférieure de la couveuse. Afin d'éviter le développement de germes, cette eau devra avoir été bouillie avant d'être introduite dans la couveuse. Des besoins de déshumidification de l'air peuvent par contre être rencontrés. Comme précisé précédemment, aucun moyen simple de déshumidifier l'air n'a été proposé dans les articles de littérature

consultés.

La solution la plus efficace serait alors d'utiliser un groupe de froid. En refroidissant l'air, les gouttelettes d'eau formées condensent et peuvent être évacuées. Ce système est cependant très énergivore et n'est donc pas adapté. D'autres solutions existent, mais impliquent une intervention manuelle à moins d'introduire un système automatisé contrôlable. En premier, une membrane absorbante pourrait être utilisée. En la plaçant à l'entrée de la bouche d'aération, elle absorberait une partie de l'eau s'introduisant dans la couveuse avec l'air humide. Celle-ci serait par contre inutile pour absorber une partie de l'eau émise par les oeufs. Ensuite, des matériaux dessiccants tels que du simple sel de cuisine ou du gel de silice peuvent permettre de réduire suffisamment le taux d'humidité. Finalement, du riz cru peut aussi absorber une quantité non négligeable d'humidité.

La solution retenue est l'utilisation de gel de silice à placer dans la partie inférieure de la couveuse. Plusieurs sachets peuvent y être placés simultanément et être remplacés dès que nécessaire. Par effet joule, le gel de silice peut être régénéré en évaporant l'eau absorbée. Une gestion journalière est supposée être suffisante pour maintenir les niveaux d'hygrométrie requis. Une description des hypothèses effectuées pour modéliser la déshumidification de l'air est présentée à la section 4.1.5, relative au bilan hygrométrique global.

3.4.4 Résumé

Un résumé des choix des équipements de contrôle thermique et hygrométrique est proposé à la TABLE 3.1. Les possibilités écartées sont également résumées dans ce tableau. La description de l'utilisation de ces équipements est plus amplement détaillée au Chapitre 4 (modélisation) et au Chapitre 5 relatif aux aspects pratiques de conception et construction.

	Choix	Raison	Possibilités écartées	Raison
Chauffage	Ampoules halogènes	Disponible localement, simple d'utilisation	Résistances électriques, câble chauffant	Moins accessible, problème d'interface
Refroidissement	/	Inutile	Groupe de froid	Inutile
Brassage de l'air	Ventilateurs axiaux 12 V	Simple, suffisant	/	/
Humidification	Manuelle, réservoir d'eau	Simple, gratuit	Humidificateur à ultrasons	Complexité inutile
Déshumidification	Manuelle, gel de silice	Bon marché	Groupe de froid, membrane absorbante, sel	Coûteux, moins efficace

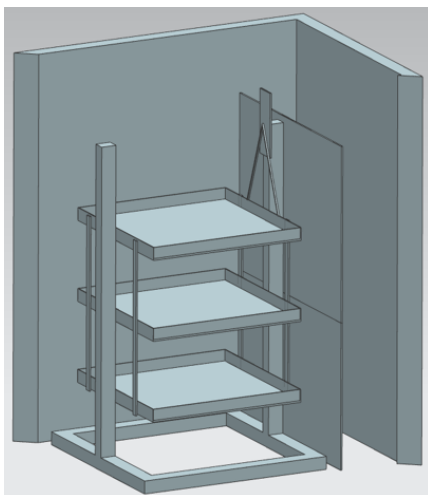
TABLE 3.1 – Résumé des choix en termes d'équipements de contrôle thermique et hygrométrique.

Chapitre 4

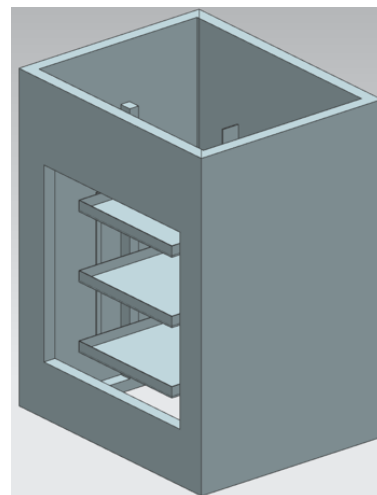
Modélisation

Dans ce chapitre, les détails de la modélisation théorique de la couveuse seront exposés, ainsi que les résultats obtenus. Cette modélisation a deux objectifs. Le premier est d'orienter le choix de composition des parois de la couveuse, en termes d'épaisseur d'isolant et d'utilisation de matériaux PCM. Ce choix s'appuiera sur plusieurs critères, qui seront détaillés dans la dernière partie de ce chapitre. Le deuxième objectif est d'estimer la puissance de chauffage nécessaire, afin de comprendre les besoins de la couveuse. Le programme *EES* [27] est utilisé pour mener à bien la modélisation globale. Ce programme est adapté pour modéliser les échanges thermiques et hygrométriques en simulation dynamique. Il est simple à utiliser et inclut un niveau de précision satisfaisant.

À l'aide du logiciel *Siemens NX 12.0* [28], spécialisé en modélisation et simulations dans les domaines de construction et d'aéronautique, une modélisation 3D de la couveuse a été effectuée. La FIGURE 4.1 permet de visualiser globalement le prototype.



(a) Mécanisme de retournement des œufs, paroi interne et parois du caisson.



(b) Parois du caisson et fenêtre d'observation.

FIGURE 4.1 – Modélisation 3D de la couveuse via *NX 12.0*.

4.1 Méthode

Dans cette section, nous présenterons les entrées du modèle, c'est-à-dire les données climatiques sur lesquelles est basée la modélisation. Ensuite, nous allons décrire les différents paramètres utilisés, principalement en termes de composition de parois de la couveuse. Par après, les échanges thermiques et hygrométriques seront détaillés, via l'utilisation de bilans de chaleur sensible et latent. Finalement, le choix des écarts de températures limites par rapport à la température de consigne sera exposé, en se basant sur la littérature scientifique.

Dans un premier temps, les calculs d'évolution de concentration en CO_2 au sein de la couveuse ne seront pas effectués. Il est difficile de décrire l'évolution de ces données. De plus, aucune information précise n'a pu être trouvée concernant le taux de CO_2 à maintenir à l'intérieur. De ce fait, l'évolution de cette concentration sera observée expérimentalement afin de ne pas dépasser 5000 ppm (valeur choisie par hypothèse, voir section 2.4).

4.1.1 Données climatiques

L'utilisation de données climatiques fiables est primordiale lors de la modélisation de la couveuse. Les données reconstituées *Typical Meteorological Year* (TMY) sont fréquemment utilisées pour des modélisations de ce type. Nous utiliserons alors des données issues du système *Photovoltaic Geographical Information* de la Commission Européenne [4]. Nous choisissons les années 2007-2016 comme années de référence, lesquelles sont les plus récentes disponibles. Le lieu choisi est le village de Tabligbo (latitude 6,588 et longitude 1,499). De là, différentes données horaires sont disponibles : la température et l'humidité relative extérieures, plusieurs données d'irradiation (globale, diffuse, directe), la vitesse et la direction du vent, ainsi que la pression de l'air. De ces données climatiques seront utilisées principalement les données de température et d'humidité relative de l'air extérieur.

Afin d'orienter au mieux le choix de composition des parois de la couveuse, il est nécessaire d'effectuer des simulations portant sur des périodes à *risque*. En termes de température, il est possible d'identifier trois types de périodes à risque. Le premier type représente les mois les plus chauds, avec des températures moyennes élevées et des pics de température importants en journée. Le mois de mars sera utilisé comme *mois type*, avec des températures oscillant entre 23 et 36°C. Ensuite, le mois de juillet sera utilisé comme deuxième *mois type*, pendant lequel des températures plus basses sont observées. Celles-ci varient en moyenne entre 21 et 30°C. Elles sont donc relativement peu variables, au contraire du mois de janvier qui est choisi comme mois représentant le mieux la variabilité des températures. Les températures atteignent fréquemment des

extrêmes, autant en chaleur qu'en fraîcheur, variant entre 16 et 38°C. Pour chacune de ces périodes à risque, le jour le plus extrême sera identifié, et artificiellement répété pendant 7 jours afin de simuler un contexte de *pire cas* possible pouvant raisonnablement arriver lors de l'utilisation de la couveuse. Ces données peuvent être visualisées aux FIGURES 4.2. On peut également y voir que la température moyenne de l'air extérieur est de plus de 28°C en mars, 26°C en janvier et 24°C en juillet.

Il apparaît de ces données climatiques que l'humidité extérieure reste relativement stable tout le long de l'année. Les mois de décembre et janvier sont des mois moins humides, avec une teneur en eau d'en moyenne 12 g d'eau par kg d'air sec. Pendant le reste de l'année, l'humidité spécifique de l'air monte à 17-18 g d'eau par kg d'air, ce qui est élevé. Ces données sont également présentées aux FIGURES 4.2.

La TABLE 4.1 résume les données climatiques obtenues pour les mois à risque. Les deux dernières colonnes indiquent les RH calculés sur base de la teneur en eau moyenne, ainsi que de la température moyenne d'abord, puis de la température de consigne dans la couveuse. Cela donne une idée globale de la quantité d'eau pouvant s'introduire dans la couveuse par ventilation, infiltration d'air ou simple ouverture de la porte.

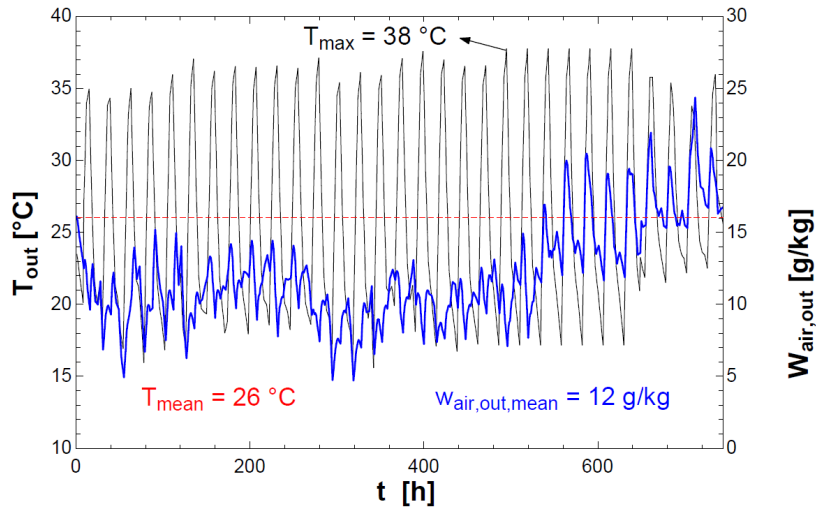
Mois	T moyenne [°C]	ω_{air} moyenne [g d'eau/kg d'air]	RH moyen @ T_{mean} [%]	RH @ $T_{set} = 37,5$ °C [%]
Janvier	26	12	57	30
Mars	28,25	18	74	44
Juillet	24,25	17	89	42

TABLE 4.1 – Résumé des données climatiques moyennes pour les mois simulés à Tabligbo, Togo.

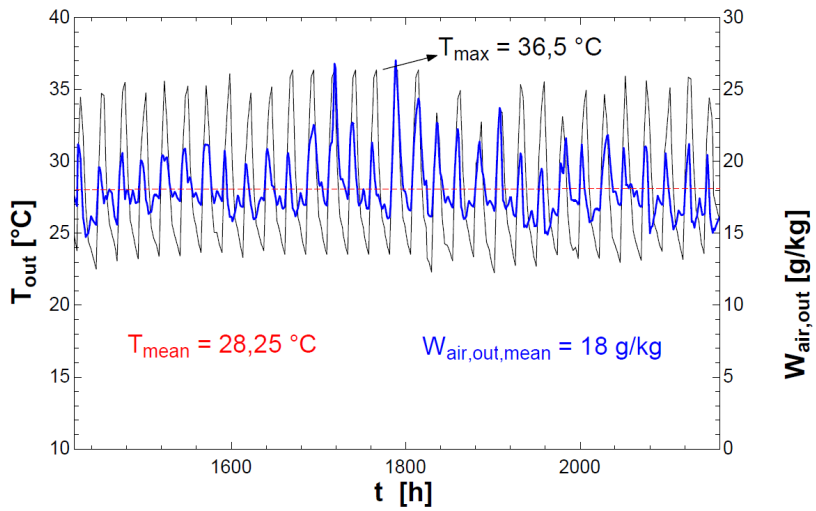
On peut également calculer les teneurs en eau de l'air intérieur qui sont nécessaires pour maintenir les niveaux de RH requis. Ces données sont synthétisées à la TABLE 4.2, pour une température de 37,5°C à la pression atmosphérique.

Période	RH nécessaire [%]	ω_{air} [g d'eau/kg d'air] [%]
1 - 18e jour	[40 - 55]	[16,3 - 22,6]
19 - 21e jour	[65 - 85]	[26,9 - 35,6]

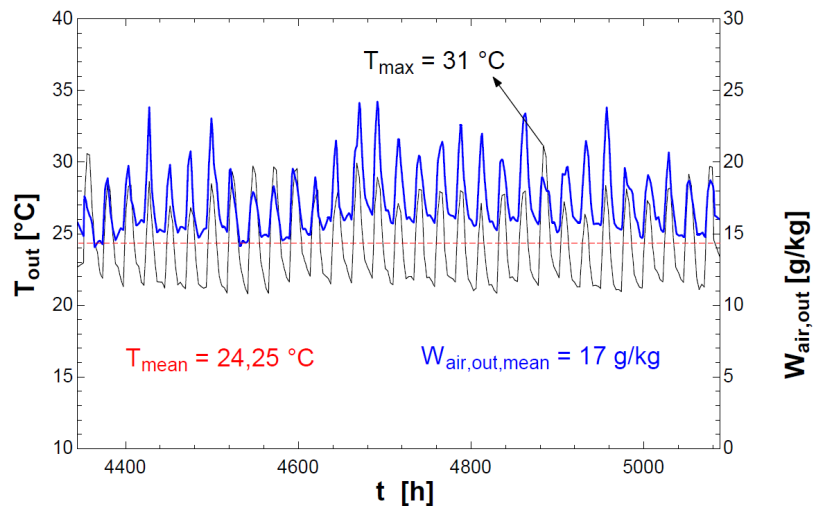
TABLE 4.2 – RH et teneur en eau nécessaires au cours de l'incubation, à 37,5°C et 1 atm.



(a) Janvier : températures variables, teneur en eau modérée.



(b) Mars : températures élevées, teneur en eau élevée.



(c) Juillet : températures modérées, teneur en eau élevée.

FIGURE 4.2 – Données climatiques TMY de la région de Tabligbo, Togo : Évolution de la température (T_{out} , noir) et de la teneur en eau ($w_{air,out}$, bleu) lors des trois mois à risque.

4.1.2 Paramètres

Géométrie

Le caisson de la couveuse doit pouvoir englober le mécanisme de retournement des œufs existant, ainsi que laisser suffisamment de place pour entreposer le dispositif électronique et le système de chauffage et ventilation. Les dimensions sont donc globalement imposées par la structure existante et les besoins de fonctionnement. Le caisson mesure 90 cm de largeur, 65 de profondeur et 116 cm de hauteur. Les détails géométriques peuvent être retrouvés en Annexe C.3.

Matériaux constituant le caisson

Tout d'abord, comme illustré à la FIGURE 4.1b, une fenêtre peut être placée dans le produit fini afin de pouvoir visualiser l'intérieur de la couveuse sans ouvrir la porte. Le coefficient de transmission thermique de cette fenêtre est fixé à $3 \text{ [W/m}^2\text{-K]}$, ce qui est général pour une fenêtre à simple vitrage.

Ensuite, le reste des parois, ainsi que le plafond de la couveuse sont modélisés de façon uniforme pour chaque simulation. La couche extérieure est constituée de contreplaqué de 18 mm d'épaisseur, avec une conductivité thermique de 0.14 [W/m-K] , une masse volumique de $600 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ et une chaleur massique de 1880 [J/kg-K] . Le choix de cette épaisseur se justifie d'abord par le besoin de rigidité et de solidité des parois. Une épaisseur plus importante rendrait le caisson lourd. Finalement, c'est une épaisseur standard et facilement accessible commercialement. Selon les simulations, la couche interne d'isolation est variée afin de choisir la composition idéale des parois. Les critères de choix seront exposés dans la dernière partie de ce chapitre.

Dans une première configuration, seul du polystyrène expansé est placé comme couche isolante. L'épaisseur optimale de polystyrène doit être déterminée. Les caractéristiques physiques du polystyrène sont une conductivité thermique de 0.05 [W/m-K] , une masse volumique de $20 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ et une chaleur massique de 900 [J/kg-K] . Dans la deuxième configuration, on modélise l'introduction d'une certaine quantité de matériaux PCM entre deux couches de polystyrène. Une couche interne, de 10 mm d'épaisseur, vise à rendre la modélisation la plus réaliste possible, en considérant que le PCM ne peut être placé en contact direct avec l'air. L'épaisseur de PCM ainsi que l'épaisseur de la couche externe de polystyrène sont à déterminer. Le type de PCM choisi pour les simulations est détaillé par la suite. Pour des raisons pratiques d'implémentation ainsi que pour assurer un échange de chaleur efficace, il peut être imaginé de placer des sachets de PCM à l'intérieur même de la couveuse (et non pas dans les parois). Cela assurerait également une meilleure flexibilité du système, en permettant de pouvoir facilement augmenter ou réduire la quantité de PCM utilisée.

Finalement, il est décidé d'implémenter un sol constitué de deux planches de contreplaqué entre lesquelles est placée une couche de polystyrène expansé. Les caractéristiques des matériaux décrites précédemment sont conservées. Par simplicité (théorique et pratique), l'épaisseur de la couche de polystyrène sera la même que celle des murs constituant les parois de la couveuse. Cette solution a été privilégiée, au détriment de placer une couche de polystyrène directement à l'intérieur de la couveuse et ainsi assurer la continuité de l'isolant. La raison vient de différentes contraintes pratiques en termes de dimensions du système ainsi que des plaques de contreplaqué disponibles.

4.1.3 Échanges thermiques

Plusieurs hypothèses ont été effectuées afin de modéliser les échanges thermiques impactant l'évolution de la température dans la couveuse. Tout d'abord, le calcul des échanges par radiation a été simplifié. La couveuse est supposée être placée à l'extérieur, à l'abri du rayonnement solaire. Dans ce contexte, seul le coefficient d'échange h_{air} inclura de façon globale ces échanges radiatifs. Les échanges de chaleur avec les masses internes de la couveuse sont également simplifiés, dont notamment les échanges avec les œufs et la structure du système de retournement d'œufs. Ensuite, nous utiliserons des températures *résultantes* (aussi appelées *opératives*) pour les simulations. Ces températures sont supposées homogènes par définition. Finalement, les délais dus à l'inertie inhérente au fonctionnement des ampoules halogènes chauffantes n'ont pas été modélisés.

Le pas de temps utilisé pour la modélisation est de 5 minutes, ce qui est supposé être suffisant en pratique pour le contrôle thermique de la couveuse [20]. Les différents capteurs envoient une valeur actualisée des données mesurées toutes les 5 minutes afin d'ajuster la demande de chaleur à injecter à l'intérieur de la couveuse.

La modélisation et ses résultats sont limités par ces différentes hypothèses. La phase de tests du prototype servira dès lors à ajuster certains paramètres de contrôle afin de rendre la couveuse suffisamment efficace. Cela implique notamment le contrôle de la réactivité du système de chauffage en fonction des données mesurées.

Bilan sensible

Les termes intervenant dans le bilan de chaleur *sensible* sont illustrés à la FIGURE 4.3. Ce bilan permet de calculer les variations de la température intérieure de la couveuse, en fonction des flux de chaleur. Il s'écrit comme suit :

$$\dot{Q}_{heater} + \dot{Q}_{gen} - \dot{Q}_{inf} - \dot{Q}_{window} - \dot{Q}_{ground} - \dot{Q}_{wall} = \frac{dU_{in}}{dt} \quad (4.1)$$

où \dot{Q}_{heater} est la chaleur générée par le système de chauffage, \dot{Q}_{gen} toute la chaleur générée par les composants électroniques, les ventilateurs et les œufs placés dans la couveuse, \dot{Q}_{inf} le flux de chaleur échangé par les infiltrations d'air, \dot{Q}_{window} les échanges à travers la fenêtre, \dot{Q}_{ground} le flux de chaleur échangé avec le sol, \dot{Q}_{wall} les échanges à travers les parois (latérales et supérieure) et $\frac{dU_{in}}{dt}$ représente la variation d'énergie interne contenue dans la couveuse, au cours du temps. La chaleur générée à l'intérieur sera définie positive, tandis que les autres flux de chaleur seront définis positifs lorsque de la chaleur s'échappe du caisson.

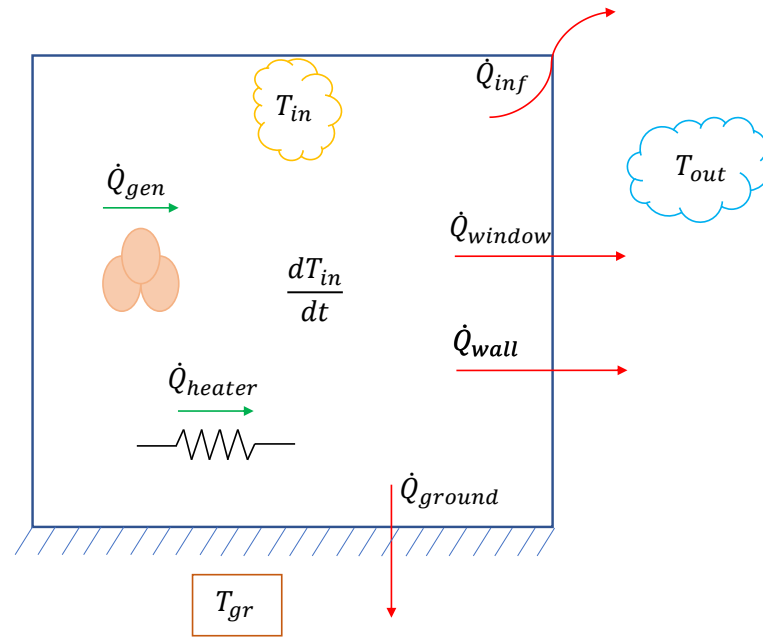


FIGURE 4.3 – Schéma simplifié du bilan sensible.

Détails de modélisation

La chaleur \dot{Q}_{heater} générée par les ampoules halogènes est modélisée comme un *on-off* idéal, par paliers. Le modèle suppose qu'un certain nombre de paliers de chauffe de 10 W soient disponibles, lesquels sont actifs ou inactifs en fonction des besoins. Ces paliers de chauffe sont alors ajustés lorsque la température diffère de 0,5°C par rapport à la température de consigne. Dans ce cas, cela signifie que lorsque la température passe sous 37°C, le chauffage est augmenté de 10 W. De même, lorsque la température dépasse 38°C, le chauffage est diminué de 10 W.

Le flux \dot{Q}_{gen} contient un premier terme constant basé sur une estimation globale d'émission de chaleur de différents éléments internes à la couveuse. Les trois ventilateurs utilisés consomment globalement 2 W de puissance électrique chacun. Le dispositif électronique consomme très peu d'énergie et est estimé à environ 2 W. Le moteur actionnant le retournement des œufs n'est utilisé que périodiquement pendant

des durées limitées. Par sécurité contre les surchauffes potentielles tout en ne surestimant pas cette chaleur interne, ce premier terme est fixé à 10 W. Ensuite, les œufs émettent une quantité variable et croissante de chaleur pendant l'incubation, comme décrit en détail à la section 3.1.1. Nous nous baserons sur les données observables à la FIGURE 3.1. Le deuxième terme du flux \dot{Q}_{gen} prend alors une valeur variable en fonction du nombre d'œufs supposé et de l'avancement de l'incubation. Notons que le nombre d'œufs dans la couveuse diminue légèrement pendant l'incubation. Cela se passe lorsque des œufs en mauvaise santé sont écartés pour éviter de contaminer les autres. En pratique, cela diminue les charges internes (de chaleur et d'humidité). Cela, comme nous le verrons par la suite, n'est pas problématique.

\dot{Q}_{inf} représente l'échange de chaleur entre l'extérieur et l'intérieur, dû aux infiltrations et exfiltrations d'air au travers des joints entre les parois de la couveuse, ainsi que la porte. Il est possible d'estimer le volume d'air échangé en supposant un taux d'infiltration $ACH = 0,3$ (Air Change per Hour). Ce choix est arbitraire et se base sur de bonnes pratiques à utiliser lors de modélisations de ce type [29]. En effet, les délais sont trop courts pour permettre d'évaluer avec précision l'étanchéité du caisson, via différents tests en laboratoire. Le paramètre ACH indique qu'en conditions standard, $\dot{V}_{in} = 0,3 \cdot V_{in} [m^3/h]$ s'infiltrer de l'extérieur vers l'intérieur de la couveuse, avec V_{in} le volume intérieur de la couveuse. Le transfert de chaleur s'écrit alors :

$$\dot{Q}_{inf} = \dot{V}_{tr} \cdot C_{p_{air}} \cdot \rho_{air} \cdot (T_{in} - T_{out}) [W] \quad (4.2)$$

où \dot{V}_{tr} est le volume transféré $[m^3/s]$, $C_{p_{air}}$ et ρ_{air} respectivement la chaleur massique $[J/kg \cdot K]$ et la masse volumique de l'air $[kg/m^3]$, supposés constants.

La chaleur échangée à travers une fenêtre, \dot{Q}_{window} est simplement modélisée au moyen de la surface de la fenêtre et son coefficient de transmission thermique. L'équation utilisée est la suivante :

$$\dot{Q}_{window} = S_{window} \cdot U_{window} \cdot (T_{in} - T_{out}) [W] \quad (4.3)$$

\dot{Q}_{ground} représente la chaleur échangée avec le sol. Il est difficile de connaître avec exactitude l'évolution de la température du sol. On supposera alors qu'elle est constante et égale à la température moyenne de l'air au cours de l'année (26°C). Une analyse de sensibilité sur la température du sol est proposée en Annexe C.2. Aucune introduction de matériaux PCM n'est supposée dans les parois du sol de la couveuse. La raison est que la variation de la température au cours de l'année est faible (et supposée nulle ici), ce qui ne justifierait pas l'utilisation de ces matériaux. Pour modéliser les échanges thermiques, nous introduisons une température fictive T_{ground} pour passer de la représentation de la FIGURE 4.4 à celle de la FIGURE 4.5. Cette méthode simplifie la modélisation en

regroupant les températures des couches de la paroi (contreplaqué $T_{ctpl,1}$, $T_{ctpl,2}$ et polystyrène T_{frig}) ainsi que les températures entre ces couches ($T_{ground,1}$, $T_{ground,2}$) en une seule température fictive de paroi T_{ground} . Les résistances et capacités de chacune des couches (FIGURE 4.4) sont également regroupées en des valeurs équivalentes R_{ground} et C_{ground} . Les paramètres θ et ϕ introduits permettent d'ajuster les paramètres de résistance et capacité thermique de la paroi. θ rend lieu de la position de la capacité C_{ground} sur la résistance totale de la paroi, afin de modéliser le type d'isolation : par l'intérieur ou par l'extérieur. ϕ rend lieu de l'*accessibilité* de la capacité thermique pour des sollicitations journalières (d'une période de 24h).

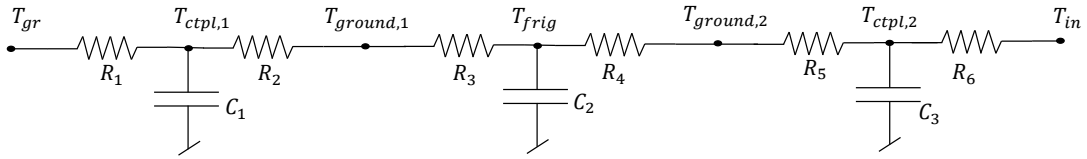


FIGURE 4.4 – Schéma électrique équivalent des échanges thermiques entre le sol et l'intérieur de la couveuse.

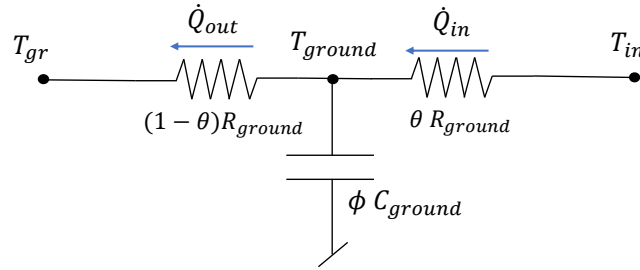


FIGURE 4.5 – Schéma électrique équivalent *simplifié* des échanges thermiques entre le sol et l'intérieur de la couveuse.

Finalement, comme on peut le voir à la FIGURE 4.5, de la chaleur est échangée entre l'intérieur (T_{in}) et le sol (T_{gr}), dont une partie peut être *stockée* ou *relâchée* par la paroi. Les équations dictant le comportement de la paroi sont les suivantes :

$$\dot{Q}_{out} = \frac{1}{(1 - \theta)R_{ground}} \cdot (T_{ground} - T_{gr}) \quad (4.4)$$

$$\dot{Q}_{in} = \frac{1}{\theta R_{ground}} \cdot (T_{in} - T_{ground}) \quad (4.5)$$

$$\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out} = \frac{dU_{ground}}{dt} \quad (4.6)$$

$$\Delta U_{ground} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{dU_{ground}}{dt} \cdot d\tau \quad (4.7)$$

$$\Delta U_{ground} = \phi C_{ground} \cdot (T_{ground}(\tau - 1) - T_{ground}(\tau)) \quad (4.8)$$

avec C_{ground} la capacité de stockage thermique [J/K]. Le terme général \dot{Q}_{in} représente ici le terme \dot{Q}_{ground} de l'équation 4.1 du bilan thermique.

La modélisation des échanges thermiques au travers des autres parois est semblable. Tout d'abord, sans l'utilisation de matériaux PCM dans les parois, la seule différence est l'introduction d'une certaine résistance de l'air à l'intérieur et à l'extérieur de la couveuse. Ces résistances sont modélisées comme suit :

$$R_{air} = \frac{1}{h_{air} \cdot A_{hex}} \quad [K/W] \quad (4.9)$$

où h_{air} [W/m²-K] est le coefficient d'échange thermique de l'air et A_{hex} [m²] la surface d'échange. Dans ce cas, celle-ci est la surface exposée à l'air. Une distinction sera faite entre les surfaces d'échange intérieure et extérieure, lesquelles diffèrent par l'épaisseur totale de la paroi. Le coefficient d'échange thermique de l'air à l'intérieur est fixé à 10 [W/m²-K]. Cette valeur est fréquemment choisie par simplification et avec l'utilisation d'une température résultante homogène [29]. Pour l'air extérieur, nous utiliserons une corrélation prenant en compte la vitesse du vent ($V_{air,out}$) à l'extérieur [29], tel que :

$$h_{air,out} = 5,7 + 3,8 \cdot V_{air,out} \quad [W/m^2 - K] \quad (4.10)$$

où le premier terme constant tient compte des échanges par convection naturelle, le deuxième terme introduit les échanges par convection forcée.

Finalement, la FIGURE 4.6 permet de visualiser la modélisation obtenue. Les évolutions des échanges thermiques et de la température *fictive* de paroi T_{wall} sont évaluées via la même méthode que celle présentée aux équations 4.4- 4.8. La seule différence est présentée à l'équation 4.11, dans laquelle la résistance à l'air, $R_{air,in}$ est introduite. \dot{Q}_{in} représente ici le terme \dot{Q}_{wall} de l'équation 4.1 du bilan thermique.

$$\dot{Q}_{in,wall} = \frac{1}{\theta R_{ground} + R_{air,in}} \cdot (T_{in} - T_{wall}) \quad (4.11)$$

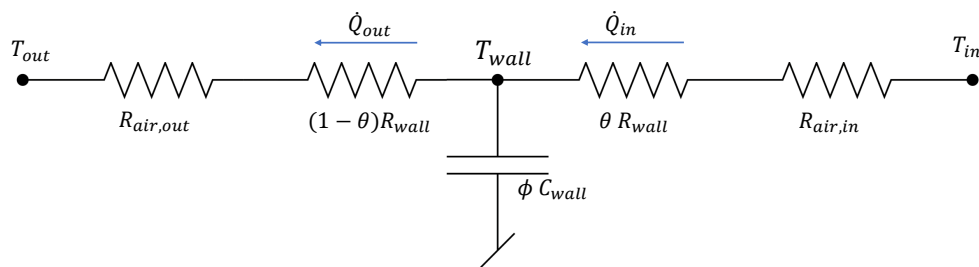


FIGURE 4.6 – Schéma électrique équivalent *simplifié* des échanges thermiques entre l'extérieur et l'intérieur de la couveuse, *sans* matériau PCM.

L'introduction des matériaux PCM dans les parois de la couveuse entraîne une différence dans la modélisation. La modélisation proposée par *Dechesne* [30] dans le cadre d'un échangeur air-PCM se prête bien au cas étudié. Grâce aux fiches techniques disponibles [31] (Annexe C.1), le comportement du matériau PCM a pu être introduit. Les équations utilisées sont semblables au cas précédent, en utilisant le schéma disponible à la FIGURE 4.7. Les matériaux PCM étant des matériaux qui stockent de la chaleur latente, l'évolution de l'énergie interne stockée dans le matériau peut être exprimée de façon suivante :

$$\Delta U = m_{PCM} \cdot (h_{PCM}(\tau - 1) - h_{PCM}(\tau)) \quad (4.12)$$

où $h_{PCM}(\tau)$ est l'enthalpie du PCM au temps τ . La masse de PCM m_{PCM} est déterminée par le volume de PCM placé dans les parois qui est directement lié à l'épaisseur utilisée, ainsi qu'à la masse volumique (environ 800 kg/m^3 , voir Annexe C.1).

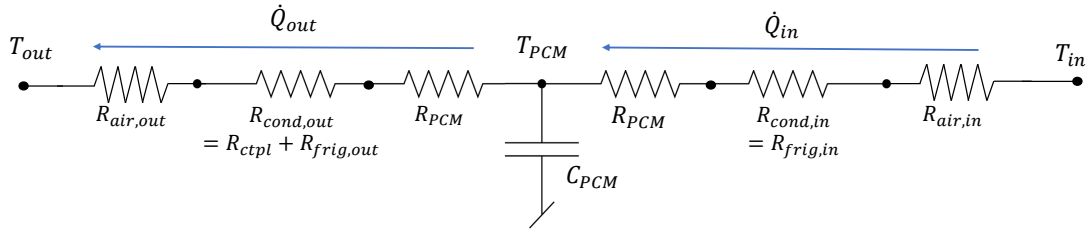


FIGURE 4.7 – Schéma électrique équivalent des échanges thermiques entre l'extérieur et l'intérieur de la couveuse avec matériau PCM.

Pour terminer, l'évolution globale de la température interne de la couveuse peut se calculer sur base de l'équation de bilan (équation 4.1) et reprenant le modèle décrit aux équations 4.6 et 4.7. On a alors l'équation suivante :

$$\Delta U_{in} = C_{in} \cdot (T_{in}(\tau - 1) - T_{in}(\tau)) \quad (4.13)$$

Avec C_{in} [J/K] tel que :

$$C_{in} = C_{air,in} + C_{m,int} \quad (4.14)$$

$$C_{air,in} = V_{in} \cdot \rho_{air} \cdot C_{p,air} \quad (4.15)$$

$$C_{m,int} = m_{int} \cdot C_{p,m,int} \quad (4.16)$$

où $C_{air,in}$ est la capacité thermique de l'air intérieur [J/K] avec V_{in} le volume d'air dans la couveuse [m^3] et $C_{m,int}$ est la capacité thermique du mécanisme de retournement des œufs [J/K] avec m_{int} sa masse (estimée à 10 kg) et $C_{p,m,int}$ la chaleur massique du dispositif [J/kg-K] (supposée égale à celle de l'aluminium, composant principal). Le paramètre C_{in} utilisé est donc approximatif, car il néglige certaines masses internes à la couveuse, par exemple les œufs et la fine paroi interne.

4.1.4 Limites de température

En termes de température, les résultats qui nous intéressent sont les écarts de température par rapport à la température de consigne. Un des buts de la modélisation est de choisir la meilleure option en termes d'isolation, afin d'éviter au mieux les surchauffes ou sous-refroidissements. Pour cela, certaines limites inférieures et supérieures doivent être choisies. Beaucoup de recommandations sont disponibles dans la littérature. Nous reprendrons un mélange de ces recommandations, tout en y ajoutant un coefficient de sécurité. Cela est nécessaire au vu des multiples hypothèses effectuées, en particulier de l'inertie du système de chauffage qui n'a pas été modélisée. Cela permet de s'octroyer une certaine marge sur les résultats obtenus. Cette marge est également nécessaire en cas de variations plus fortes de la température extérieure lors de l'utilisation de la couveuse ou de dysfonctionnements momentanés du système.

Selon King'ori [7], la température devrait être en tout temps stabilisée entre 36 et 38,9°C, avec une température de consigne de 37,5°C. Un écart de 1,4-1,5°C par rapport à la température de consigne est acceptable. De plus, le taux de mortalité des embryons augmente significativement si la température passe sous 35,6°C ou au-delà de 39,4°C pendant plusieurs heures [7]. À défaut d'avoir des informations plus détaillées, nous considérons la condition la plus sécuritaire, à savoir un dépassement d'une durée maximale de 2h. Au vu de ces recommandations, les limites imposées sont les suivantes :

- La température doit se situer en permanence entre 35,6 et 39,4°C, qui sont les minimum et maximum absolus choisis.
- La température de consigne est de 37,5°C. Un écart de 0,7°C par rapport à la consigne est toléré, ce qui signifie que la température doit être stabilisée entre 36,8 et 38,2°C, contre les 1,5°C précédemment évoqués.
- Toute configuration qui mène à un écart de température de plus de 0,7°C (inférieur ou supérieur) pendant plus de 2h doit être écartée, tout en restant dans l'intervalle des extrema absolus renseignés ci-dessus.

Ces limites sont restrictives, mais assureront que le choix de composition des parois soit suffisamment sécuritaire pour fonctionner correctement en pratique.

4.1.5 Échanges hygrométriques

La modélisation des échanges hygrométriques au sein de la couveuse se base sur différentes hypothèses contraignantes. De ce fait, cette modélisation ne donnera probablement pas de résultats très fiables, mais les tendances et le comportement global pourront être analysés. Des tests en laboratoire permettront dans un deuxième temps d'ajuster les paramètres de modélisation.

Tout d'abord, il est difficile d'estimer l'émission d'eau d'un œuf au long de l'incubation. Nous fixerons cette émission à 0,4 g d'eau par œuf et par jour, comme décrit à la section 3.1.1 (et la FIGURE 3.1). La deuxième hypothèse concerne le système de déshumidification. Comme précisé à la section 3.4.3, des sachets de gel de silice seront utilisés afin d'adsorber l'humidité excédentaire. Des suppositions seront faites sur l'efficacité d'absorption des sachets, en termes de quantité et de durée.

Bilan latent

Le bilan de chaleur latent se base sur un bilan de masse d'eau transitant dans la couveuse. Un schéma simplifié des échanges est présenté à la FIGURE 4.8. Il peut s'écrire comme suit :

$$\dot{m}_{water,eggs} + \dot{m}_{water,out} - \dot{m}_{water,gel} = \frac{dm_{water,in}}{dt} \quad (4.17)$$

où $\dot{m}_{water,eggs}$ est l'émission d'eau par les œufs, $\dot{m}_{water,out}$ est l'eau s'introduisant dans la couveuse via les échanges avec l'air extérieur, $\dot{m}_{water,gel}$ est la masse d'eau absorbée par les sachets de gel de silice et $\frac{dm_{water,in}}{dt}$ représente la variation de la masse d'eau contenue dans la couveuse au cours du temps [kg/s].

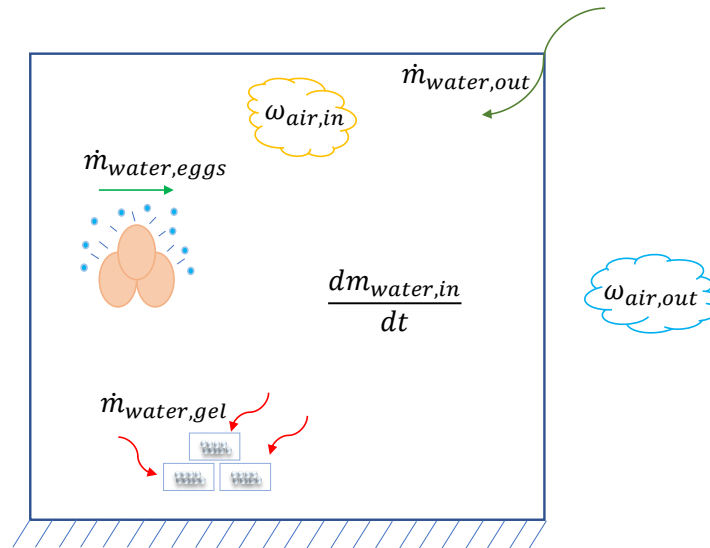


FIGURE 4.8 – Schéma simplifié du bilan latent.

Détails de modélisation

Le terme $\dot{m}_{water,eggs}$ est calculé sur base de l'hypothèse d'émission de 0,4 g d'eau émise par œuf et par jour, converti en [kg/s]. Ce facteur est multiplié par le nombre d'œufs placés dans la couveuse. Pour étudier un cas limite, celui-ci est fixé à 150, ce qui est la capacité maximale de la couveuse.

$\dot{m}_{water,out}$ représente le débit d'eau transitant entre l'extérieur et l'intérieur de la couveuse. Il peut s'exprimer comme suit :

$$\dot{m}_{water,out} = (\omega_{air,out} - \omega_{air,in}) \cdot \frac{\dot{V}_{tr}}{v_{air}} \quad (4.18)$$

où ω_{air} est la teneur en eau de l'air [kg d'eau/kg d'air sec], \dot{V}_{tr} est le volume d'air transitant par infiltration [m^3 d'air humide /s] et v_{air} est le volume massique de l'air [m^3 d'air humide /kg d'air sec].

$\dot{m}_{water,gel}$ représente la masse d'eau absorbée par les sachets de gel de silice au cours du temps. Ces sachets sont supposés être régénérés par séchage après utilisation. Théoriquement, un sachet peut absorber 40% de son poids en eau. Cette hypothèse a pu être vérifiée par test sur des sachets de 5 g, absorbant 2 g d'eau en quelques heures. Une deuxième hypothèse est faite sur le temps d'absorption, qui n'a pu être défini de manière précise. Nous fixerons cette durée à 12 h. De plus, nous supposons qu'un certain nombre de sachets sont placés dans la couveuse et sont remplacés tous les 2 jours, pour assurer un certain confort de l'utilisateur. Les résultats permettront de définir le nombre de sachets nécessaires, en fonction des conditions climatiques.

Finalement, la variation de la masse d'eau au sein de la couveuse au cours du temps est modélisée comme suit :

$$\Delta m_{water,in} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{dm_{water,in}}{dt} \cdot d\tau \quad (4.19)$$

$$\Delta m_{water,in} = m_{air,in} \cdot (\omega_{air,in}(\tau - 1) - \omega_{air,in}(\tau)) \quad (4.20)$$

où $m_{air,in}$ est la masse d'air présente dans la couveuse.

4.2 Résultats

Dans cette section, nous présenterons en premier les résultats relatifs au bilan thermique. Pour ce faire, les différentes configurations simulées seront d'abord décrites. Celles-ci varient en fonction des matériaux disponibles et accessibles, ainsi que de la faisabilité des configurations. Ensuite, les résultats relatifs au bilan hygrométrique seront présentés. Quelques figures seront utilisées pour illustrer les propos.

4.2.1 Résultats - température

Configurations simulées

Les deux principaux types de simulation diffèrent par l'utilisation ou non de matériau PCM. Les matériaux composant le caisson de la couveuse incluent du contreplaqué ainsi que du polystyrène expansé. Afin de rendre les simulations réalistes et les résultats plausibles, des types de matériaux commercialement disponibles sont choisis. Rappelons que la couche de contreplaqué (de type *betonplex*) placée à l'extérieur a été fixée à 18 mm (voir section 4.1.2).

Les types de polystyrène expansé facilement accessibles ont les caractéristiques présentées à la TABLE 4.3. En pratique, il n'est pas plus aisé d'utiliser des panneaux de grande dimension, car des découpes sont nécessaires afin de construire les parois de la couveuse avec l'isolant. De plus, le coût n'étant pas attrayant, les panneaux de plus faible dimension sont préférés. Ainsi, les panneaux de type 1 et 2, respectivement de 30 et 50 mm d'épaisseur seront testés lors des simulations.

Type de polystyrène	Dimensions [cm x cm]	Épaisseur [mm]	Résistance thermique [m ² -K/W]	Coût [€/m ²]
1	100 x 50	30	0,75	2,7
2	100 x 50	50	1,1	4,6
3	200 x 100	30	0,65	4
4	200 x 100	50	1,1	6,75

TABLE 4.3 – Types de polystyrène expansé disponibles commercialement [32].

Comme nous le verrons par la suite, les matériaux PCM ne sont pas indispensables pour cette application. De ce fait, certains résultats obtenus sont présentés dans la section 6.2 relative aux perspectives et approfondissements. Les détails des configurations simulées y sont également présentés.

Résultats - Sans matériau PCM

Globalement, les résultats de simulation sont satisfaisants : aucune surchauffe n'est à signaler dans aucune configuration. De plus, pour peu qu'une source de chaleur suffisante soit disponible, aucun sous-refroidissement ne se produit. Différents résultats sont proposés à la TABLE 4.4. Comme attendu, tant la demande de chaleur maximale (\dot{Q}_{max}) que la demande de chaleur moyenne (\dot{Q}_{mean}) sont bien moins importantes lorsque l'épaisseur d'isolant est supérieure. La dernière colonne montre la diminution relative des besoins de chaleur lors de la transition de l'utilisation d'une épaisseur de 30 mm d'isolant à 50 mm. On peut alors observer une diminution de la demande de chaleur de 36-39%, selon le mois observé.

Mois simulé	Épaisseur d'isolant [mm]	Surchauffe	\dot{Q}_{max} [W]	\dot{Q}_{mean} [W]	$\dot{Q}_{mean_{variation}}$ [%]
Janvier	30	/	90	47	100
	50	/	60	29,8	63,4
Mars	30	/	60	36,9	100
	50	/	40	22,7	61,5
Juillet	30	/	70	56,8	100
	50	/	50	36,1	63,5

TABLE 4.4 – Résultats globaux de simulation sans matériau PCM.

Pour visualiser l'évolution de la température intérieure au long de journées à *risque*, les FIGURES 4.9, 4.10 et 4.11 sont présentées. Ces simulations portent sur 48h, s'étalant de minuit à minuit. Les droites horizontales rouges représentent les températures limites - 36,8 et 38,2 °C - à ne pas dépasser pendant plus de 2h (voir section 4.1.4). On peut voir que ces limites ne sont jamais franchies. Pour rappel, le chauffage a été modélisé sous forme de *paliers* de chauffe, par pas de 10 W, ajustés lors d'un écart de 0,5°C par rapport à la température de consigne (T_{set}). Cela explique les sursauts de température visibles sur les différentes figures, dûs à ces ajustements. La puissance électrique de chauffage consommée en moyenne est également indiquée. Comme attendu, celle-ci est plus faible lorsque la température extérieure est élevée.

On peut également observer sur ces figures que la température intérieure est plus stable lorsque les variations de température extérieure sont plus faibles. Cette différence se marque fortement entre les mois de janvier (fortes variations) et de juillet (faibles variations), en comparant les FIGURES 4.9 et 4.11, tandis que le mois de mars (FIGURE 4.10) est intermédiaire aux deux autres. Globalement, ce résultat est intéressant, car il montre clairement que les mois plus variables nécessitent une fiabilité plus grande dans le système électronique. Le *contrôle* nécessaire pour stabiliser la température, ou du moins la maintenir entre les températures limites, est crucial.

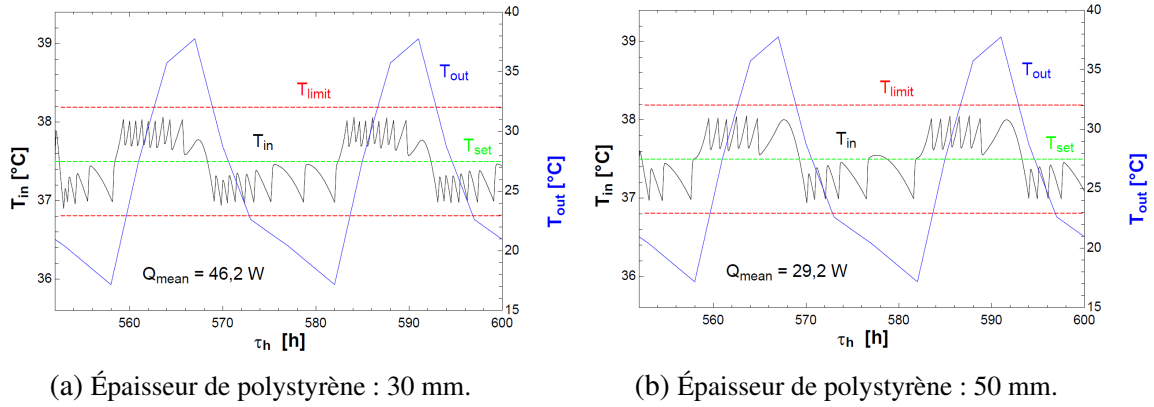


FIGURE 4.9 – Évolution de la température extérieure (T_{out} , bleu) et intérieure (T_{in} , noir) sans utilisation de matériau PCM lors d’une journée type *variable* - 24-25 janvier pour deux épaisseurs d’isolant. On peut voir que T_{in} est maintenue proche de la consigne T_{set} entre les limites T_{limit} (droites pointillées rouges), malgré la variabilité de la température extérieure.

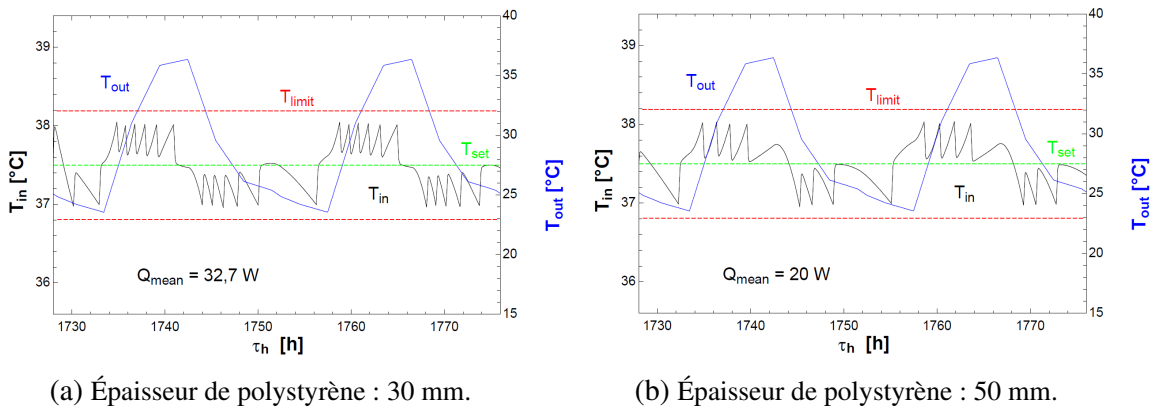


FIGURE 4.10 – Évolution de la température extérieure (T_{out} , bleu) et intérieure (T_{in} , noir) sans PCM lors d’une journée type *chaude* - 13-14 mars pour deux épaisseurs d’isolant. T_{in} est maintenue proche de la consigne T_{set} entre les limites T_{limit} (droites pointillées rouges), malgré des températures extérieures élevées en moyenne.

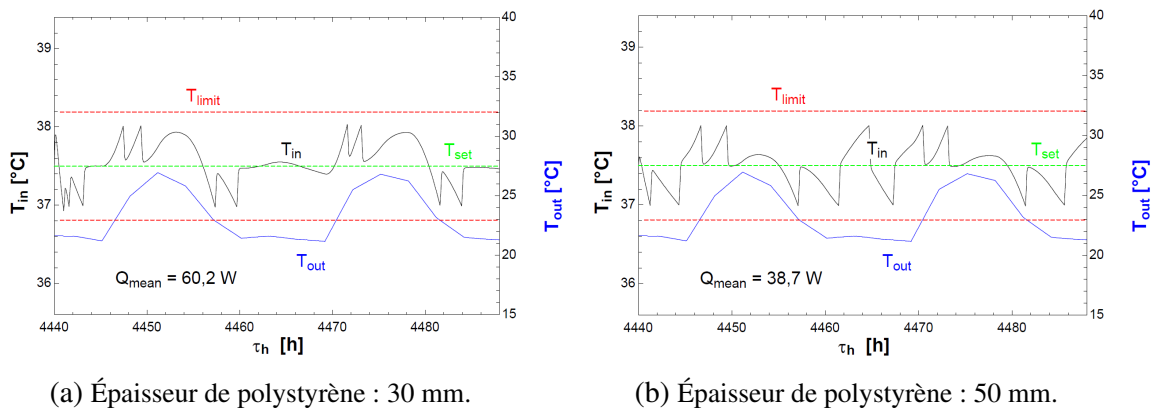


FIGURE 4.11 – Évolution de la température extérieure (T_{out} , bleu) et intérieure (T_{in} , noir) sans matériau PCM lors d’une journée type *fraîche* - 4-5 juillet pour deux épaisseurs d’isolant. T_{in} est facilement maintenue proche de la consigne T_{set} entre les limites T_{limit} (droites pointillées rouges), au moyen d’une consommation importante de chauffage électrique.

D'autres résultats sont présentés à la FIGURE 4.12. On peut y voir l'évolution des pertes de chaleur au travers des parois de la couveuse pour deux périodes distinctes de l'année, en fonction de l'épaisseur d'isolant utilisée. Les déperditions à travers les parois (latérales et supérieure) représentent entre 85 et 89% des pertes globales. Les autres déperditions incluent les pertes par exfiltrations d'air et les pertes par le sol, dont la température a été supposée constante. L'évolution de la température extérieure est ajoutée à titre indicatif. Comme attendu, les pertes sont fortement diminuées lorsque l'épaisseur d'isolant est supérieure. Elles sont également plus stables lorsque les températures extérieures sont stables (FIGURE 4.12b). Naturellement, ces pertes sont importantes pendant la nuit et réduites en journée. Comme précédemment, les discontinuités observables sont dues à la modélisation de la source de chaleur par palier.

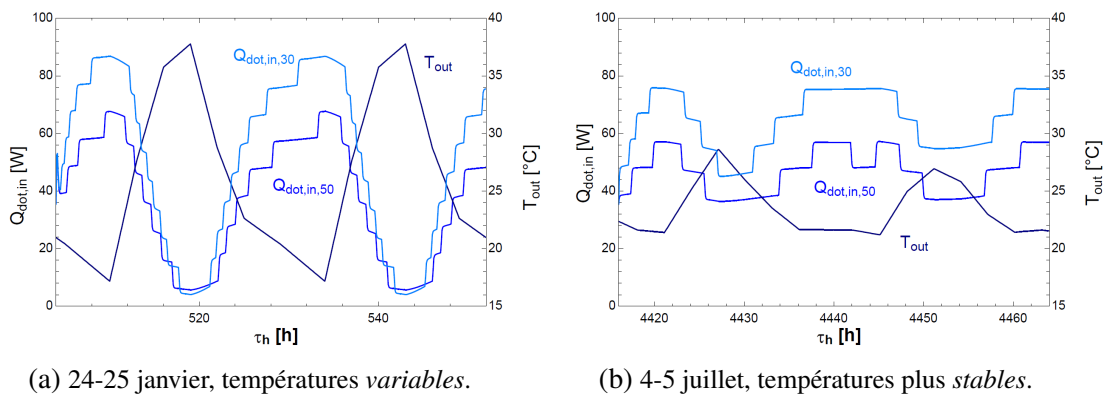


FIGURE 4.12 – Évolution des déperditions de chaleur par les parois de la couveuse en fonction de l'épaisseur d'isolant ($\dot{Q}_{in,30}$ clair - 30 mm, $\dot{Q}_{in,50}$ foncé - 50 mm) pour deux mois différant fortement en termes de températures extérieures (T_{out} , bleu très foncé). On peut voir que les pertes varient avec la température extérieure et sont plus faibles avec une épaisseur d'isolant plus importante.

Ensuite, on peut observer que le modèle dynamique prend en compte l'effet capacitif des parois. Une certaine quantité de chaleur est donc stockée dans la paroi. Celle-ci est d'autant plus grande que l'épaisseur d'isolant est importante. Cela justifie le fait que les évacuations de chaleur soient plus stables, donc moins variables, avec une plus grande épaisseur d'isolant, comme on peut le voir à la FIGURE 4.12a.

À la FIGURE 4.12a, les pertes lors des pics de chaleur en journée sont presque nulles, s'élevant à environ 5 W. Cela implique différentes observations. Lors de ces pics, la température extérieure est légèrement supérieure à la température de consigne. Dès lors, il semblerait logique qu'un certain gain de chaleur se manifeste en se traduisant par une valeur négative de \dot{Q}_{in} . Cependant, cette faible perte de chaleur est possible grâce à la latence capacitive de la température de paroi (*modélisée fictivement*), qui reste inférieure à la température intérieure malgré l'augmentation de la température extérieure. Cette perte de chaleur est également nécessaire, car elle correspond en partie au gain de chaleur interne généré en tout temps par les œufs ainsi que par le dispositif électronique.

S'il ne pouvait être évacué, la température intérieure augmenterait rapidement.

Notons cependant que des températures encore plus élevées mèneraient à une augmentation excessive de la température intérieure et donc des surchauffes. En effet, lors de journées chaudes, les résultats de simulation nous montrent qu'aucun chauffage n'est nécessaire pendant plusieurs heures et que la température intérieure se maintient aux alentours de 37,5-38°C. Cela représente donc un cas relativement risqué de l'utilisation de la couveuse sans matériau PCM. En effet, aucun refroidissement n'est prévu, malgré ces températures naturellement élevées.

Résultats - Avec matériau PCM

Dans le cadre du développement d'une couveuse à destination de Tabligbo, Togo, l'utilisation de matériaux PCM ne se justifie pas. En effet, ce type de matériau est relativement coûteux et potentiellement non accessible sur place, du moins sans livraison longue distance. Comme on a pu le voir, les maxima de température dans cette région sont tels que la température intérieure limite de 38,2°C est approchée, mais jamais atteinte. Cependant, le développement du prototype s'inscrit dans un projet de plus grande envergure, visant à pouvoir être adapté à des régions proches (voir section 1.3, Chapitre 1). Par exemple, au nord de Tabligbo, dans des zones plus éloignées de l'océan, les températures sont légèrement plus élevées. On peut ajouter à cela les dérèglements causés par le réchauffement climatique. Dès lors, les matériaux PCM pourraient avoir une utilité primordiale ! De plus, si la couveuse ne pouvait être placée à l'abri du rayonnement solaire, la température intérieure augmenterait significativement. Les résultats détaillés de l'utilisation des matériaux PCM pour un climat critique sont présentés à la section 6.2.3.

4.2.2 Résultats - humidité

Pour présenter les résultats relatifs au bilan sensible, nous n'utiliserons que des simulations portant sur les mois de *janvier* et *mars*. Le premier est un exemple de mois sec, pendant lequel un léger besoin d'humidification pourrait survenir. Le deuxième est un mois humide pendant lequel le besoin de déshumidification sera analysé. La FIGURE 4.2 présentée à la section 4.1.1 synthétise les données climatiques utiles. Rappelons qu'il est nécessaire de maintenir le RH intérieur entre 40 et 55% pendant les 18 premiers jours de l'incubation et entre 65 et 85% pendant les trois derniers jours. Afin de faciliter la visualisation de ces données, nous présenterons les résultats en termes de RH. Étant donné que la température intérieure varie uniquement entre 37 et 38°C, elle n'a pas une influence importante sur la variation du RH. Ainsi, il n'est pas problématique d'exposer les résultats en fonction de données *relatives* plutôt que de données *absolues* (ne variant pas avec la température) telles que la teneur en eau $\omega_{air,in}$.

En prenant l'hypothèse d'une étanchéité à l'air suffisante, l'émission d'eau par les œufs est la principale source d'augmentation de l'humidité au sein de la couveuse. Par conséquent, nous supposons que le nombre d'œufs en cours d'incubation est réduit pendant le mois sec et maximal pendant le mois humide, c'est-à-dire respectivement 75 et 150 œufs. Ainsi, nous pourrions étudier l'évolution de l'humidité intérieure pendant des périodes à *risque*.

Résultats - mois de janvier (*sec*)

Sans œufs dans la couveuse, un RH intérieur de moins de 30% est attendu au début du mois de janvier (voir TABLE 4.1). En y ajoutant 75 œufs, l'humidité augmente, comme on peut le voir à la FIGURE 4.13. Lors d'une période particulièrement sèche comme celle illustrée, le RH n'atteint pas la valeur minimale de 40%. Il est dès lors indiqué de placer un récipient d'eau à l'intérieur de la couveuse afin d'humidifier l'air ambiant. Pendant les trois derniers jours, il est nécessaire de placer des récipients supplémentaires ou bien d'augmenter la surface d'échange entre l'eau du récipient et l'air ambiant, afin d'atteindre les 65% de RH au minimum.

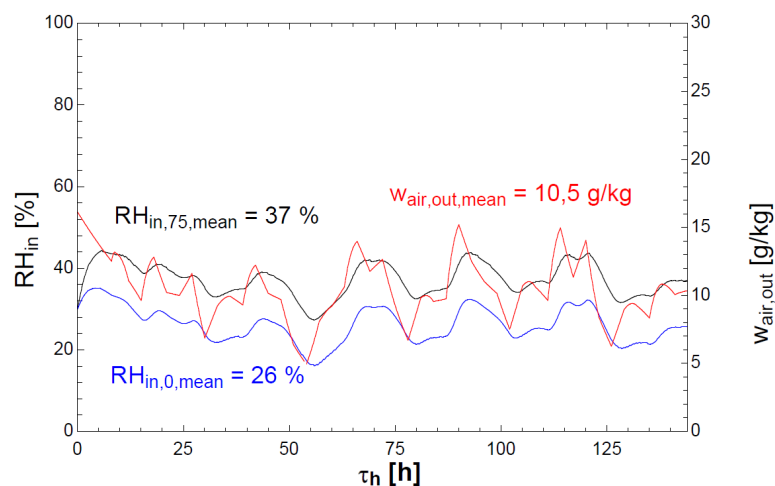


FIGURE 4.13 – Évolution du RH intérieur sans œufs ($RH_{in,0}$, bleu) et avec 75 œufs ($RH_{in,75}$, noir), en comparaison avec la teneur en eau extérieure ($w_{air,out}$, rouge) du 1 au 6 janvier, période sèche. On peut voir que le RH est inférieur à 40% lorsqu'un faible nombre d'œufs (ou aucun) est placé dans la couveuse. Une certaine humidification est nécessaire.

Résultats - mois de mars (*humide*)

Durant le mois de mars, on peut voir à la FIGURE 4.14 que le RH intérieur est acceptable (44%) lorsqu'aucun œuf n'est placé dans la couveuse. Cela signifie qu'il est nécessaire d'absorber la quasi-totalité de l'eau émise par les œufs, c'est-à-dire 0,4 g par œuf et par jour. Cela représente une émission de 60 g d'eau lorsque la couveuse est remplie à pleine capacité. On peut voir qu'en ajoutant 150 œufs dans la couveuse, le RH dépasse de 10% (avec 65%) la valeur maximale acceptable lors des 18 premiers jours

d'incubation. Par contre, on note que le besoin d'humidification en fin d'incubation est faible, voire nul, car il suffit de maintenir les œufs dans une ambiance au RH supérieur à 65%.

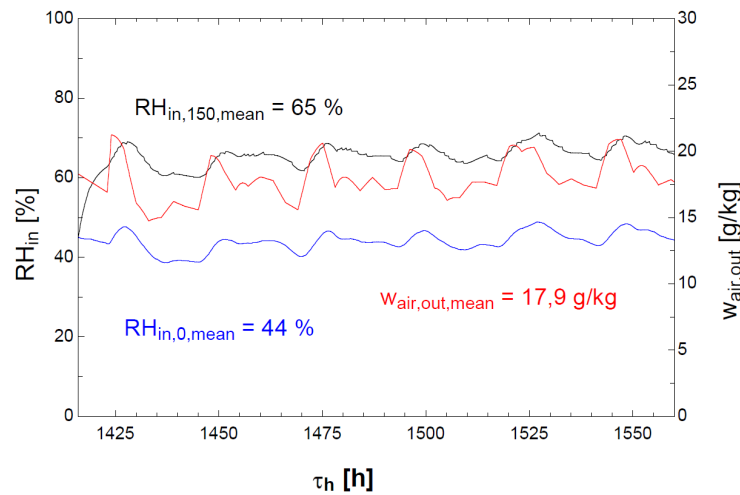


FIGURE 4.14 – Évolution du RH intérieur sans œufs ($RH_{in,0}$, bleu) et avec 150 œufs ($RH_{in,150}$, noir), en comparaison avec la teneur en eau extérieure ($w_{air,out}$, rouge) du 1 au 6 mars, période humide. On peut voir qu'avec un nombre important d'œufs dans la couveuse, le RH dépasse la 1ère limite de 55%. Lors des 18 premiers jours d'incubation, une certaine déshumidification est donc nécessaire, tandis qu'un besoin d'humidification survient pendant les trois derniers jours, si le seuil de 65% n'est pas atteint.

4.2.3 Introduction de gel de silice

Nous modélisons alors l'ajout de gel de silice lors d'une simulation portant sur le mois de mars, humide, avec 150 œufs placés dans la couveuse. Le gel est introduit et renouvelé toutes les 48h par sachets de 5 g, pouvant absorber 2 g d'eau sur une durée de 12h. La FIGURE 4.15 illustre les résultats obtenus. On peut y voir que le seuil limite de 55% n'est respecté que lorsque 30 sachets de gel de silice sont utilisés. En pratique, cela peut être contraignant de devoir placer un nombre important de sachets dans la couveuse. La FIGURE 4.16 montre que placer 15 sachets de gel de silice toutes les 24h donne le même effet global et permet de réduire la variabilité du RH intérieur. Cette variabilité n'est pas supposée particulièrement problématique, mais maintenir un environnement stable est préférable.

En résumé, une grande partie de l'eau émise par les œufs lors des périodes humides doit être absorbée. Cela représente au minimum 30 g par jour (15 sachets de gel de silice) selon les simulations étudiées.

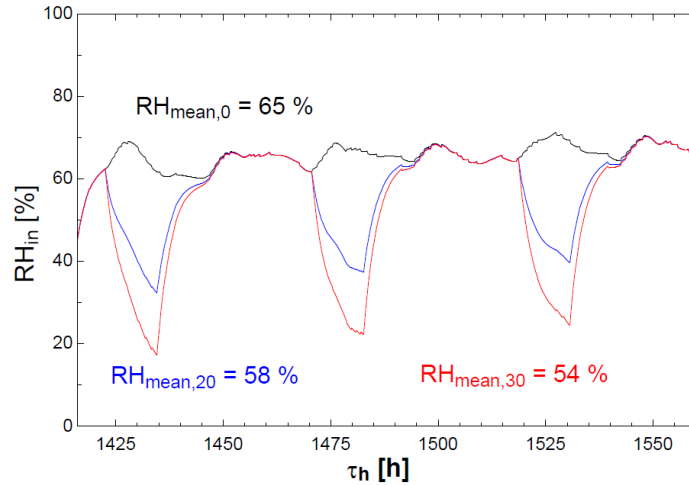


FIGURE 4.15 – Évolution du RH intérieur sans déshumidification (RH_0 , noir) et avec 20 (RH_{20} , bleu) et 30 (RH_{30} , rouge) sachets de gel de silice, du 1 au 6 mars, période humide avec 150 œufs placés dans la couveuse. Le gel est introduit toutes les 48h avec une période d'absorption de 12h. On peut voir qu'il est nécessaire de placer un grand nombre de sachets (près de 30) afin d'obtenir un RH acceptable, c'est-à-dire de moins de 55% en moyenne.

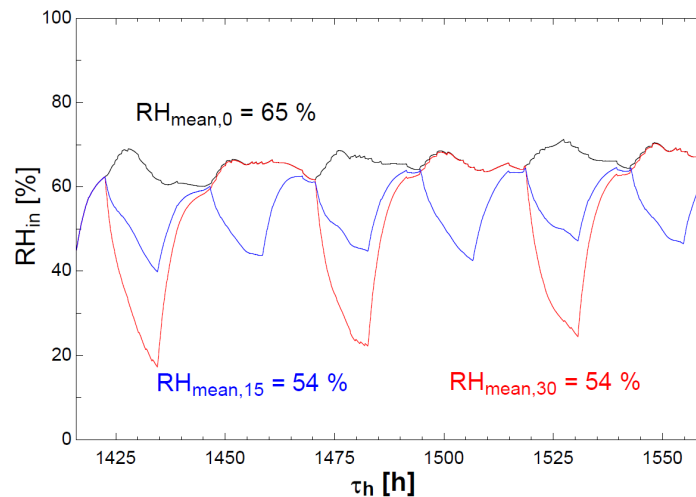


FIGURE 4.16 – Évolution du RH intérieur sans déshumidification (RH_0 , noir), avec 15 sachets introduits toutes les 24h (RH_{15} , bleu) et 30 sachets toutes les 48h (RH_{30} , rouge), pendant la période humide du 1 au 6 mars. Le gel a une période d'absorption supposée de 12h. On peut voir que placer un nombre réduit de sachets de gel de silice sur une plus courte période a le même effet moyen mais permet de réduire la variabilité du RH intérieur.

4.3 Conclusion

Comme avancé à la section précédente, l'utilisation de matériaux PCM a été écartée pour la construction de la couveuse destinée à Tabligbo. Concernant le contrôle thermique, il ne reste alors qu'à déterminer l'épaisseur d'isolant nécessaire au bon fonctionnement. On se rappelle que le premier objectif est d'éviter les surchauffes excessives, ce qui est assuré au vu des résultats. Un deuxième objectif est de réduire au maximum les coûts de fonctionnement de la couveuse en vue de, à terme, la rendre

autosuffisante via l'utilisation d'énergie solaire. Ensuite, le coût de construction, fortement lié à l'accessibilité des matériaux, est à prendre en compte. Finalement, la facilité de construction de la couveuse est à garder en tête lors du choix final.

Au vu de ces objectifs et critères de choix, l'utilisation de polystyrène expansé de 50 mm d'épaisseur est l'option retenue. La raison principale est l'importante économie d'énergie réalisée en utilisant cette option, plutôt que 30 mm d'épaisseur d'isolant (TABLE 4.4). Le coût d'achat est plus élevé, mais le polystyrène est un matériau extrêmement bon marché, ce qui implique que ce critère a peu d'impact dans ce cas. De plus, la difficulté de construction ne se voit pas augmentée par l'utilisation d'une épaisseur plus importante d'isolant. Le seul potentiel désavantage est l'accessibilité du matériau au Togo. Il est a priori plus aisé de se fournir en polystyrène de moindre épaisseur via de la récupération. En effet, il est plus simple de découper dans des morceaux trop épais plutôt que d'assembler des morceaux trop fins et risquer de diminuer les performances du système à cause de discontinuités dans l'isolant.

Avec cette composition de parois, la consommation moyenne d'électricité pour le chauffage s'élève à 23 W lors des mois chauds (mars), et monte jusqu'à 36 W en moyenne lors des mois plus frais (juillet). Le résumé des résultats peut être retrouvé à la TABLE 4.4. La demande de chaleur maximale est de 60 W en toute saison. 10 W supplémentaires sont nécessaires pour contrôler les ventilateurs et le dispositif électronique global, ainsi que 14 W périodiquement pour le mécanisme de retournement des œufs. Le dispositif a donc besoin d'une puissance moyenne d'approximativement 40 W et d'une puissance maximale d'environ 90 W. En pratique, il est nécessaire de s'octroyer une certaine marge de sécurité sur ces données et donc de prévoir une installation légèrement plus puissante afin de garantir le bon fonctionnement du système.

Au niveau de l'humidité relative, les simulations ont démontré le besoin de déshumidification pendant les périodes humides de l'année. La solution proposée a été d'introduire dans la couveuse des sachets de gel de silice, toutes les 24 ou 48h. Par régénération, ces sachets peuvent être réutilisés. L'efficacité théorique de ce système a été démontrée numériquement, sur base de nombreuses hypothèses. Des tests en laboratoire doivent être réalisés pour prouver l'efficacité réelle. En pratique, d'autres matières absorbantes (sel de cuisine, riz cru) peuvent être ajoutées afin de réduire plus fortement l'humidité.

Chapitre 5

Conception et construction

Dans ce chapitre, nous passerons en revue les différentes étapes de construction de la couveuse. Celles-ci impliquent la construction du caisson en lui-même et le développement du dispositif de contrôle électronique. Plusieurs photos seront jointes aux descriptions.

5.1 Construction du caisson

Lors de la construction, l'accent a été mis sur le besoin de reproduction facile ainsi que le démontage et transport aisés le prototype. Ainsi, aucun clou, colle ou autre élément rendant la construction difficilement démontable, n'a été utilisé. De plus, différents aspects pratiques ont été pris en compte et seront détaillés ci-dessous.

Pour rappel, les dimensions précises du caisson sont présentées en Annexe C.3 sous la forme de plans dérivés d'une modélisation via le logiciel *Siemens NX 12.0*. Globalement, du contreplaqué de type *betonplex* de 18 mm d'épaisseur est utilisé comme couche extérieure des parois latérales et supérieure de la couveuse. Du polystyrène expansé de 50 mm d'épaisseur est utilisé comme couche d'isolant et placé à l'intérieur de la couveuse. Le sol est constitué de deux couches de contreplaqué entre lesquelles est disposée une couche de polystyrène.

En premier, la structure en contreplaqué a été érigée en commençant par fixer les parois latérales à une plaque inférieure de contreplaqué constituant le sol de la couveuse. Pour ce faire, un cadre de contreplaqué a été construit en guise d'encadrement pour la porte, ce qui a permis de soutenir les parois latérales (FIGURE 5.1a). Les dimensions de ce cadre de porte ont été choisies de sorte à pouvoir introduire sans difficulté le mécanisme de retournement des œufs (visible aux FIGURES 5.2 et 5.3). Les parois de gauche et de droite ont également été recoupées de sorte à permettre une certaine inclinaison du toit. Dans l'hypothèse où la couveuse pourrait être placée à l'extérieur, la

pluie ruissellerait alors vers l'arrière de la couveuse. Le toit est constitué d'une plaque de contreplaqué de dimension supérieure à la surface de la couveuse pour reproduire une toiture débordante et ainsi protéger les parois latérales de la couveuse contre la moisissure (FIGURES 5.1b et 5.3b). Par simplicité, ce toit, pesant près de 15 kg, n'est actuellement pas fixé, mais est destiné à être posé sur le dessus de la couveuse.



(a)



(b)

FIGURE 5.1 – *Conception de la couveuse.* (a) Structure du caisson en contreplaqué. (b) Placement du toit, poignées, charnières de porte et de l'isolation via rondelles métalliques.

En deuxième, une porte en contreplaqué a été placée au moyen de charnières robustes (FIGURE 5.3a). Celles-ci permettent de retirer la porte lors d'un déplacement éventuel de la couveuse ou pour toute autre raison, à la convenance de l'utilisateur. En effet, la porte pesant plus de 10 kg, il peut être pratique de s'en débarrasser. Un simple verrou permet de maintenir cette porte en position fermée. Des poignées ont également été fixées sur deux côtés latéraux de la couveuse, permettant à deux personnes de la transporter sans difficulté.

Ensuite, du polystyrène a été placé sur les parois latérales, sur la porte et sur le toit (voir FIGURES suivantes). Des rondelles d'isolation en métal ont ainsi été vissées à travers le polystyrène et jusque dans le contreplaqué, afin d'éviter l'utilisation de colle. Cette étape a également été réfléchie dans le but d'assurer au maximum la continuité de l'isolant à chaque endroit. L'idée est de reproduire l'effet d'écrasement du joint d'une porte de réfrigérateur en profitant de la légère élasticité du polystyrène en compression (et ainsi, limiter les aires de fuite). Un avantage supplémentaire est l'apport de rigidité de la structure induit par le toit, via l'utilisation de ce dimensionnement du polystyrène. Ce dernier aspect est visible à la FIGURE 5.3b où l'on peut voir que le toit est destiné à s'imbriquer dans le cadre formé par les parois latérales.

Finalement, certains détails d'utilisation ont été considérés :

- Un boîtier destiné à contenir le dispositif électronique a été fixé à l'extérieur du caisson (FIGURES 5.2 et 5.3). La paroi du caisson a été trouée afin de laisser passer les différents câbles électriques.
- Deux petites plaques de contreplaqué de faible épaisseur ont été placées sur la paroi gauche du caisson (FIGURE 5.2a). Celles-ci servent à placer les deux capteurs de température et d'humidité. Comme on peut le voir, des câbles ont été tirés du boîtier jusqu'à ces plaques.
- Une fine paroi en contreplaqué a été placée à proximité du boîtier. Trois ventilateurs sont fixés à hauteur de chacune des plateaux (FIGURE 5.2). Ceux-ci ont le rôle de brasser l'air et surtout de diffuser l'air chaud généré par les lampes halogènes, qui doivent être placées dans la partie inférieure droite de la couveuse. On peut voir que le dessous de la paroi a été découpée afin de permettre le passage de l'air plus frais destiné à être réchauffé par les lampes.



(a)



(b)

FIGURE 5.2 – *Conception de la couveuse*. Placement d'une fine paroi en contreplaqué sur laquelle sont fixés des ventilateurs utilisés pour diffuser de l'air chaud à hauteur des plateaux. Sur la paroi gauche, des plaques de contreplaqué sont utilisés pour fixer les capteurs de température et d'humidité. Un boîtier électronique est fixé sur la paroi extérieure droite. Des câbles sont tirés à l'intérieur de la couveuse via un trou percé dans la paroi. Le dispositif de retournement des œufs est introduit dans la couveuse.



(a)



(b)

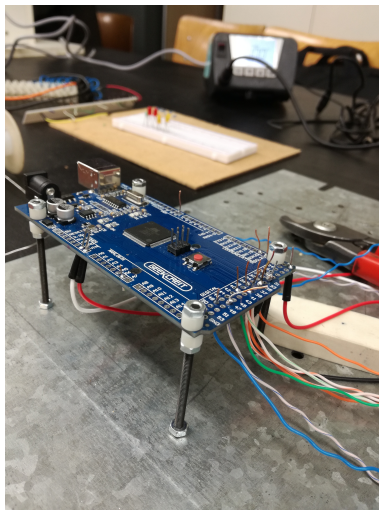
FIGURE 5.3 – *Conception de la couveuse*. Placement de la porte et du toit amovibles, isolés par du polystyrène. À l'exception du sol, la continuité de l'isolant est assurée par le recouvrement du polystyrène lors de la fermeture de la porte et le placement du toit. Le dispositif de retournement des œufs est aisément introduit dans le caisson grâce à la latte de contreplaqué amovible (visible en observant l'ajout de cette latte inférieure entre (a) et (b)).

5.2 Dispositif électronique

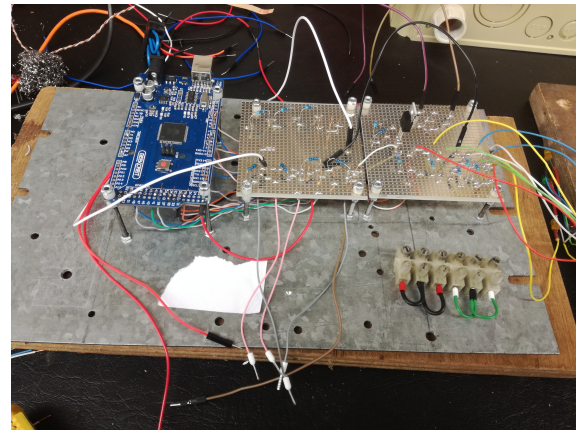
Dans cette section, le montage du dispositif électronique sera entièrement décrit. Ainsi, les composants utilisés seront détaillés, de même que l'interface du système et le fonctionnement global. Quelques photos sont jointes afin de visualiser le résultat final.

Carte électronique de contrôle

Le dispositif électronique est contrôlé dans son ensemble par une carte ELEGOO Mega 2560 (modèle équivalent à l'Arduino Mega 2560). Celle-ci a été choisie pour son prix attractif et ses bonnes performances pour les fonctionnalités recherchées. Les soudures nécessaires ont été réalisées afin de connecter cette carte aux différents composants électroniques. De plus, deux *boards* ont été ajoutées pour des soucis de simplification et de propreté du montage.



(a) Carte Arduino Mega 2560.



(b) Connexion de la carte électronique à deux boards.

FIGURE 5.4 – *Dispositif électronique*. Plusieurs câbles doivent être reliés aux boutons-poussoirs, sélecteurs et écran LCD. De même, cinq lampes LEDs sont connectées et prêtes à être fixées dans le boîtier lors du fonctionnement.

Chauffage et ventilation

Le chauffage est contrôlé au moyen d'une modulation précise du courant qui alimente des lampes halogènes placées dans la couveuse. Ces lampes sont alimentées en 12 V par une alimentation extérieure. Le circuit de contrôle consiste en un transistor de type MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*). Celui-ci permet de contrôler l'alimentation 12 V au moyen de la tension d'alimentation 5 V de la carte électronique. En sortie de l'Arduino, un signal PWM (*Pulse Width Modulation* ou modulation de largeur d'impulsion) dicte alors la puissance à fournir aux lampes. La puissance maximale des lampes est de 35 W. Le courant électrique avoisine les 3 A en

fonctionnement nominal, ce qui est élevé. Des transistors robustes sont donc nécessaires afin de ne pas endommager la carte électronique. Ce système permet de réchauffer graduellement l'air intérieur en contrôlant la puissance consommée par les lampes.

Les ventilateurs sont utilisés pour pulser l'air chaud à hauteur des plateaux d'œufs. La fiche technique de ces ventilateurs axiaux est disponible en Annexe B.1. Le système de contrôle est identique à celui des lampes. Cependant, le signal *PWM* est dans ce cas fixé de sorte que les ventilateurs tournent à la moitié de leur vitesse nominale. La puissance nominale de ces ventilateurs est de 1,92 W, ce qui induit un courant maximum de 0,16 A pour chaque ventilateur. Différents tests devraient permettre de choisir s'il y a lieu de moduler le signal ou de le garder à une valeur fixe.

Capteurs de température, d'humidité et de concentration en CO_2

Les données de température et d'humidité sont acquises via des capteurs numériques de type *DTH22*. Nous utilisons deux capteurs, placés contre la paroi gauche de la couveuse, à hauteur des plateaux. Ils sont alimentés par la carte électronique, en 5V. Ils transmettent la température et l'humidité relative avec une précision de respectivement 0,1°C et 0,1% de RH. Un troisième capteur, de type *MQ135* est utilisé de la même manière afin de mesurer la concentration en CO_2 . Celle-ci est mesurée en [ppm].

Retournement des œufs

Le moteur utilisé pour actionner le retournement des œufs est celui récupéré avec le dispositif global (voir Annexe A.3 pour les détails techniques). Il est prévu de le piloter via un relais-inverseur qui permet en outre d'isoler les tensions d'alimentation, 230V, et de sortie de la carte électronique, 5V. Un capteur de position doit être utilisé pour déterminer la position du dispositif, au cas où un déséquilibre surviendrait. Cette étape de contrôle n'a pas encore été finalisée.

Interface du système

Le système électronique global est intégré dans un boîtier placé à l'extérieur de la couveuse. Celui-ci est proposé à la FIGURE 5.5 pour une meilleure visualisation. Des lampes, de type *LEDs*, servent de système d'alerte. De gauche à droite (sur la photo), les LEDs indiquent :

- Une température excessive (LED rouge). Elle clignote lorsque le seuil limite de 0,7°C (38,2°C) est dépassé et s'allume en continu lorsque la limite absolue de 39,4°C est franchie.
- Une température insuffisante (LED jaune). Elle clignote lorsque le seuil limite de 0,7°C (36,8°C) est dépassé et s'allume en continu lorsque la limite absolue de 35,6°C est franchie.

- *Un dépassement des limites d'humidité* (LED verte). Elle clignote lorsque la limite inférieure (40% ou 65%) est franchie et s'allume en continu lorsque la limite supérieure est dépassée (55% ou 85%).
- *Un dépassement des limites de concentration en CO_2* (LED jaune). Elle s'allume en continu lorsque les valeurs dépassent 5000 ppm.
- *Signal de fonctionnement des lampes* (LED rouge). Elle clignote lorsque les lampes de chauffage fonctionnent partiellement et s'allume lorsqu'elles fonctionnent à plein régime.

Un écran LCD (*Liquid Crystal Display*) est utilisé pour afficher les données de température, de taux d'humidité et de concentration en CO_2 . Les sélecteurs permettent de choisir les modes de fonctionnement. Ces derniers sont détaillés au point suivant décrivant le fonctionnement global du système. Un premier bouton-poussoir permet de faire défiler les informations affichées à l'écran LCD. Le deuxième bouton est utilisé pour enclencher le retournement des œufs, comme décrit au point suivant. Finalement, deux orifices permettent de faire passer les câbles depuis l'intérieur du boîtier jusque dans la couveuse.

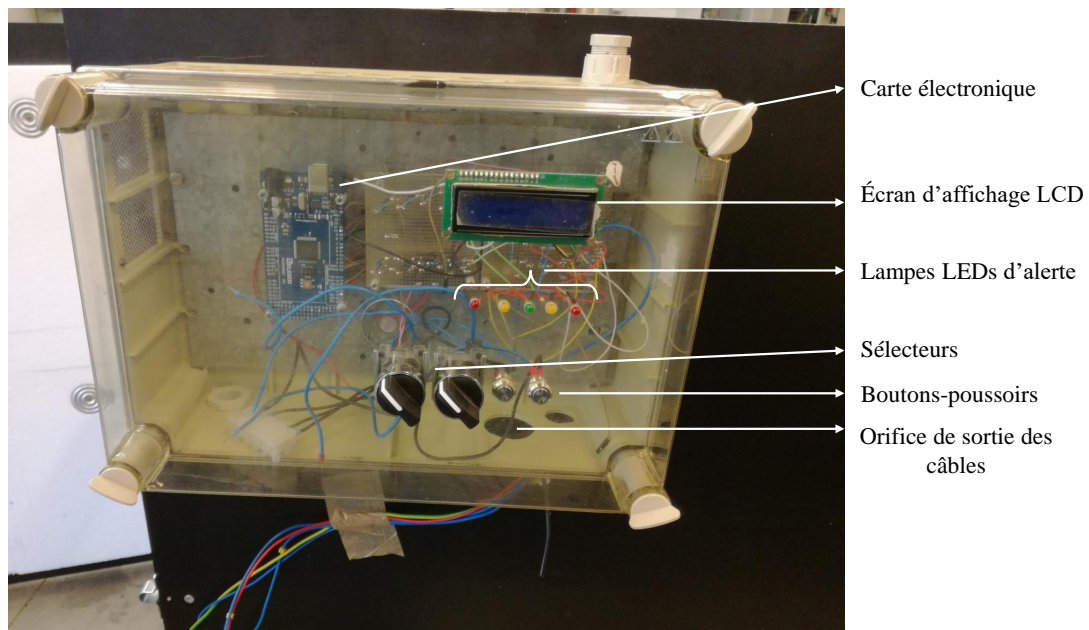


FIGURE 5.5 – *Boîtier de contrôle électronique*. On peut voir la présence de la carte électronique, de l'écran d'affichage LCD, des cinq lampes LEDs servant d'alertes (températures, humidité, $[CO_2]$, fonctionnement des lampes chauffantes), des sélecteurs et boutons-poussoirs. Un orifice est utilisé pour tirer les câbles des capteurs, ventilateurs, lampes et moteur depuis le boîtier jusque dans la couveuse.

Fonctionnement global

Tout d'abord, des modes *automatique* et *manuel* sont prévus :

- *Mode automatique*. Il implique un retournement des œufs toutes les heures, sans intervention humaine. En pratique, le dispositif de retournement des œufs imposera une rotation de 90° aux œufs afin de les orienter à $\pm 45^\circ$.
- *Mode manuel*. Le système reste fixe, en position horizontale, mais le retournement peut être activé au moyen d'un des deux bouton-poussoirs. Ce mode est utile principalement lors des trois derniers jours d'incubation, lorsque les œufs ne nécessitent plus de retournement, ou alors lorsque l'utilisateur aimerait accéder facilement aux œufs. Ce mode implique également que la consigne de RH passe de 40-55% à 65-85%, caractéristique de la deuxième phase d'incubation.

Ensuite, deux modes de gestion de chauffage sont implémentés :

- *Mode démarrage*. Les lampes s'allument petit à petit et chauffent ensuite à pleine puissance jusqu'à atteindre la température de consigne. Cette gestion permet d'éviter les courants excessifs, qui seraient causés par une montée trop rapide dans la demande de puissance.
- *Mode normal*. La puissance consommée par les lampes dépend des données de température mesurées par les capteurs *DTH22*. Cette puissance est ajustée toutes les 5 minutes, dans le cas où la température intérieure s'écarte de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ de la température de consigne.

En pratique, le taux d'humidité et la qualité de l'air (CO_2) ne sont pas contrôlés automatiquement. Le système d'alerte permet à l'utilisateur d'ajuster le taux d'humidité, au moyen d'un récipient d'eau ou de gel de silice, et d'aérer la couveuse si le besoin s'en fait ressentir.

Le code Arduino utilisé est fourni en annexe du document. La partie de code relative au retournement des œufs est à l'heure actuelle incomplète, tandis que l'implémentation du chauffage par paliers de chauffe doit être améliorée lors de phases de test du dispositif complet.

Chapitre 6

Conclusion et perspectives

6.1 Conclusion générale

L'objectif de ce travail était la conception d'une couveuse d'œufs de poule qui puisse être aisément reproduite dans des pays en voie de développement. En particulier, celle-ci est destinée au village de Tabligbo, situé dans la région maritime du Togo en Afrique de l'Ouest. L'ASBL Ingénieurs sans Frontières s'est portée garante du projet qui se veut adapté aux besoins émis par la population locale. Cette région du globe est caractérisée par un climat globalement humide, aux températures élevées. Les couveuses commerciales existantes ne répondent pas entièrement aux défis rencontrés par cette demande. De plus, celles qui sont bon marché ne sont pas conçues pour résister à ce type de climat.

Ainsi, les besoins de cette couveuse ont été définis. Ceux-ci incluent :

- Le contrôle de la température autour de $37,5^{\circ}\text{C}$;
- Le contrôle de l'humidité entre 40 et 55% d'humidité relative (RH) pendant les 18 premiers jours d'incubation et entre 65 et 85% de RH lors des 3 derniers jours ;
- Le retournement périodique des œufs, nécessaire à leur développement ;
- Le brassage de l'air par ventilation.

Une modélisation globale reprenant les bilans de chaleur sensible et latent entre l'air intérieur et l'extérieur a été effectuée.

À l'aide des résultats obtenus, le dimensionnement en chauffage et la composition des parois du caisson ont été déterminés. Du polystyrène expansé de 50 mm d'épaisseur constitue la couche d'isolant, tandis que du contreplaqué de 18 mm d'épaisseur est utilisé pour combler les besoins de rigidité et de résistance à l'humidité extérieure. Les modélisations ont montré qu'une puissance de pointe de 90 W était nécessaire, ainsi qu'une puissance moyenne d'environ 40 W. Cette dernière varie de maximum 10 W en fonction de la saison. L'étude de l'introduction de matériaux à changement de phase dans les parois de la couveuse a permis d'écarter cette solution, mais son utilité

potentielle est développée dans les approfondissements (section 6.2.3). Le caisson de la couveuse a été construit en mettant en avant plusieurs aspects pratiques tels que la création d'une toiture à débordement et le placement de la porte sur charnières amovibles. Un mécanisme de retournement d'une capacité de près de 150 œufs peut aisément être introduit dans le caisson.

Ensuite, la conception du dispositif de contrôle électronique a été réalisée. La phase de tests finaux doit encore être effectuée sur le prototype. À terme, la couveuse sera semi-autonome. Elle sera capable de maintenir la température intérieure aux niveaux souhaités, de retourner périodiquement les œufs, ainsi que d'alerter l'utilisateur lorsque les niveaux d'humidité ou de concentration en CO_2 requis ne sont pas satisfaits. Manuellement, l'utilisateur devra prendre soin du taux d'humidité et du renouvellement de l'air, ainsi que de la détection d'œufs malsains à écarter.

Le caisson remplit les objectifs de facilité de construction et de reproductibilité. Il est, de plus, bon marché au vu des matériaux de construction utilisés. Au niveau de l'électronique, les composants devraient être facilement accessibles sur place, selon les informations obtenues par une revue de la littérature.

Pour terminer, rappelons que le projet réalisé a pour objectif d'être adaptable à d'autres régions proches de Tabligbo. Cela implique d'abord que le climat peut potentiellement être plus rude. L'introduction de matériaux à changement de phase (PCM) est alors envisagée pour éviter les surchauffes. Les développements relatifs à cet aspect sont présentés à la section 6.2.3. Finalement, une nouvelle couveuse pourrait être placée dans des régions non connectées à un réseau électrique, ou dans lesquelles celui-ci est défaillant. C'est pourquoi une deuxième phase du projet vise à rendre la couveuse autonome (autosuffisante énergétiquement) en la connectant à un système de panneaux photovoltaïques et de stockage. Cet aspect a également été pris en compte lors du développement du prototype, principalement en termes d'adaptabilité du système de contrôle de la température.

6.2 Limitations et perspectives

Dans cette section, les limitations du prototype développé seront exposées. Simultanément, différentes pistes d'améliorations seront détaillées dans le but de rendre le produit fini pratique et simple à utiliser, en plus d'être fonctionnel. Ces aspects concernent la conception et la construction du caisson et de l'électronique. Nous nous attarderons ensuite sur quelques approfondissements du système global. L'introduction de matériaux PCM dans les parois de la couveuse sera présentée, ainsi que certains résultats de simulations. De plus, la sensibilité des résultats à l'ajout d'une fenêtre dans le caisson sera évaluée en fin de section.

6.2.1 Conception du caisson

Vérification d'hypothèses de modélisation

En quatre mois, les délais furent trop courts pour performer certains tests qui auraient permis de vérifier plusieurs hypothèses de modélisation. En voici des exemples :

- *Évaluation de l'étanchéité du caisson, à l'air et à l'humidité.* Le test d'étanchéité à l'air peut par exemple se faire de façon globale en pulsant du gaz coloré en direction de la couveuse et en observant la quantité s'y introduisant. Des tests plus avancés seraient plus difficiles à mettre en œuvre, mais seraient bénéfiques. En effet, il en découlerait la possibilité de mieux modéliser les infiltrations d'air et les besoins de ventilation. Il est également possible d'estimer le volume d'air s'engouffrant dans la couveuse lors de l'ouverture de la porte.
- *Étude de l'homogénéité de la température et de l'humidité.* Cela impliquerait le placement de multiples capteurs et l'étude des données obtenues en fonction de différents régimes de chauffage et ventilation.
- *Modélisation de la température interne à l'œuf.* Il aurait d'abord été nécessaire de rechercher plus d'informations précises dans la littérature. Ensuite, placer des thermocouples dans de simples coquilles d'œuf ou des balles de tennis de table aurait aidé à évaluer cette température.

Aspect pratique d'utilisation du caisson

Au niveau pratique, plusieurs limitations et idées d'améliorations sont à développer :

- *Ajout de roulettes.* Grâce aux poignées intégrées et à la possibilité de retirer la porte ainsi que le dispositif de retournement des œufs, la facilité de transport du caisson serait alors assurée.
- *Intégration d'une fenêtre, utile pendant les phases de fonctionnement ou de tests.* Certains impacts de cette modification sont étudiés dans la section 6.2.3 relative aux approfondissements. Il est toutefois difficile d'étudier l'entièreté des échanges

thermiques et l'hétérogénéité des températures de paroi induites par l'ajout d'une fenêtre. Ces données dépendent beaucoup du lieu de placement de la couveuse, par exemple dans des zones peu ou fortement exposées au vent ou au soleil. Les impacts sur le développement des œufs sont donc difficiles à évaluer.

Imperfections de l'isolation et de l'étanchéité

Une autre limitation du prototype est la discontinuité de l'isolant au niveau du sol. Tout le caisson est isolé par l'intérieur à l'exception du sol, comme on peut le voir à la FIGURE 5.2. Cela découle de contraintes sur les dimensions des planches de contreplaqué et sur la hauteur du dispositif de retournement des œufs. Notons que cet assemblage a également un avantage : la latte de contreplaqué inférieure formant l'encadrement de la porte est amovible. De ce fait, il est aisé d'introduire le dispositif en le glissant dans le caisson. Un rebord fixe empêcherait cette action. En réalisant quelques modifications sur le système de retournement des œufs, le polystyrène constituant l'isolation du sol pourrait alors être placé à l'intérieur du caisson. En le protégeant par une fine couche de contreplaqué, par exemple, le dispositif de retournement des œufs pourrait être placé par-dessus. La continuité de l'isolant serait dans ce cas assurée.

Pour parfaire la conception du caisson, des joints d'étanchéité auraient pu être utilisés pour assurer la continuité lors l'imbrication des planches de contreplaqué. D'autres joints pourraient être placés dans l'encadrement de la porte. Le système de fermeture devrait alors être revu afin de permettre l'écrasement de ces joints.

Incertitudes sur le fonctionnement

Une dernière limitation du système concerne son fonctionnement pratique. À ce jour, aucun test de longue durée n'a pu être effectué. La résistance de la couveuse à de fortes chaleurs n'a donc pas pu être évaluée. Rappelons cependant que certaines marges de sécurité ont été prises afin d'éviter les problèmes liés au contrôle de la température intérieure. Il serait tout de même possible que des surchauffes importantes surviennent, que ce soit à Tabligbo, lors d'un jour anormalement chaud, ou dans une région voisine, par exemple au microclimat sévère. Une potentielle solution de secours serait l'introduction d'un bloc de matériau inertiel au fond de la couveuse. Cela pourrait être en pratique un bloc de béton (un *parpaing*) ou alors éventuellement un seau rempli de matériau PCM. La chaleur intérieure excédentaire pourrait en partie se stocker dans le matériau afin d'éviter les surchauffes néfastes au développement des œufs.

6.2.2 Conception du système électronique

Limitations du système

Une limitation du système électronique est l'utilisation d'accessoires fonctionnant à basse tension. Cela est nécessaire dans le but de pouvoir connecter simplement la couveuse à un système de panneaux photovoltaïques. Le désavantage est la manipulation de courants importants qui en résulte. Cela implique d'utiliser des composants électroniques robustes afin de ne pas endommager d'autres composants fragiles, tels que la carte électronique.

L'utilisation d'une carte électronique de type *Arduino* est nécessaire au vu du besoin de créer un système global peu coûteux. L'utilisation d'autres cartes plus robustes augmenterait le coût de développement et de construction de la couveuse. Pour améliorer la robustesse et la propreté du dispositif électronique, un circuit imprimé (PCB - Printed Circuit Board) pourrait être conçu. Un PCB est un circuit électrique dont les composants électroniques (par exemple les résistances) et les fils conducteurs sont intégrés à une structure mécanique. Le tout est recouvert d'une couche d'isolant. Son utilisation a de nombreux avantages dont ceux de simplifier l'assemblage global et réduire les risques de faux contacts. Ces circuits peuvent être conçus puis commandés à coûts réduits. Toute modification ultérieure du système est par contre impossible avec l'utilisation d'un PCB.

Améliorations du système

Une première amélioration du système lui-même serait l'introduction d'une aération actionnée électroniquement. L'ouverture d'une trappe au moyen d'un petit moteur permettrait de contrôler plus précisément le débit d'air circulant dans la couveuse. En plaçant un capteur de température et d'humidité à l'extérieur, l'ouverture pourrait être activée en fonction des conditions extérieures. Par exemple, si le taux d'humidité est trop important à l'intérieur et réduit à l'extérieur, une simple aération peut permettre de stabiliser ce taux d'humidité intérieur. Une deuxième amélioration concerne le système de déshumidification qui nécessite une gestion journalière, ce qui peut être limitant. Il serait possible d'automatiser ce système. Une idée réalisable est le placement d'une membrane absorbante sur une deuxième bouche d'aération. L'air pulsé dans la couveuse à travers cette ouverture aurait une teneur en eau moins élevée. Le système électronique permettrait d'ouvrir l'une ou l'autre bouche d'aération afin de stabiliser le taux d'humidité.

6.2.3 Approfondissements

Utilisation de matériaux PCM

Comme exposé à la section 4.2 relative à la présentation des résultats, les périodes caractérisées par des températures élevées représentent des périodes à risque pour le développement des œufs. Malgré un pic de température extérieure de 38°C (maxima de température absolu en janvier, voir FIGURE 4.2), on a pu prouver que la plage de température autour de $37,5^{\circ}\text{C}$ au sein de la couveuse pouvait être maintenue sans difficulté. Cette section traite alors de l'hypothèse d'un climat plus rude, avec des extrema de température plus critiques que ceux rencontrés à Tabligbo. Cela pourrait arriver dans des régions plus éloignées de l'océan ou si un microclimat se développait dans une zone proche.

Les simulations présentées porteront sur 5 jours du mois de janvier, mois aux températures extrêmes. Ces températures sont artificiellement augmentées de 2°C en journée et diminuées de 2°C pendant la nuit. La FIGURE 6.1 illustre la comparaison entre les données initiales et les données modifiées (*bis*) utilisées dans cette section.

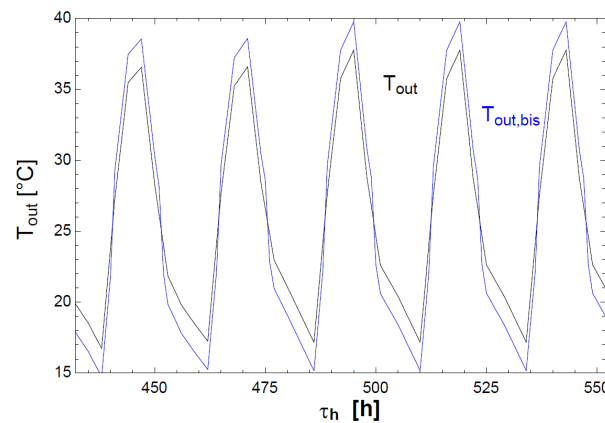


FIGURE 6.1 – Données de températures TMY initiales (T_{out} , noir) de Tabligbo et celles modifiées ($T_{out,bis}$, bleu), augmentées de 2°C en journée et diminuées de 2°C pendant la nuit, entre le 18 et le 23 janvier (τ_h), mois le plus à risque en termes d'extrema de température.

Les résultats obtenus sans matériaux PCM sont présentés à la FIGURE 6.2. On peut y voir que la température limite de $38,2^{\circ}\text{C}$ (dépassement de $0,7^{\circ}\text{C}$ de la température de consigne) est dépassée pendant 3 à 5h lors de chaque jour de simulation. Cela représente un dépassement des températures limites pendant une durée excessive. Une solution pour remédier à ce problème est l'introduction de matériaux PCM dans les parois de la couveuse. Nous allons décrire les différentes configurations simulées.

Généralement, les matériaux PCM peuvent être fournis sous la forme de petits sachets à placer dans les parois des murs. L'épaisseur standard de ces sachets est de 5 à 7 mm. Autrement, le PCM est fourni sous forme d'un volume et son placement

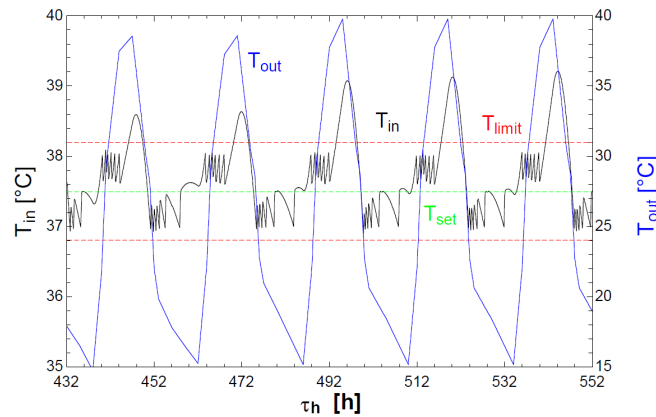


FIGURE 6.2 – *Sans matériaux PCM* - Évolution de la température intérieure (T_{in} , noir) entre le 18 et 23 janvier (τ_h), en supposant des températures extérieures (T_{out} , bleu) extrêmes, c'est-à-dire augmentées de 2°C en journée et diminuées de 2°C pendant la nuit comparativement aux données climatiques de Tabligbo. T_{in} dépasse la limite supérieure de température (droite pointillée rouge) pendant une durée excessive (3-5h) lors de chaque jour de simulation.

dans les parois s'avère plus complexe. Nous suivrons l'hypothèse qu'il est possible techniquement de placer le PCM dans les parois de la couveuse. Afin d'étudier l'impact de son utilisation, nous étudierons les résultats obtenus en plaçant une couche continue de 5 ou 7 mm de PCM. Nous ferons l'hypothèse que le PCM peut être placé entre deux couches d'un panneau de polystyrène de 50 mm d'épaisseur totale.

Deux types de matériaux PCM seront étudiés. Le PCM *RT35* se caractérise par un pic de capacité de stockage situé entre 31 et 34 °C. Le PCM *RT35HC* (haute capacité) est caractérisé par une distribution d'enthalpie partielle plus étroite, avec un pic principal à 35°C. Les fiches techniques associées à ces PCM sont disponibles en Annexe C.1. Les distributions d'enthalpie partielle renseignées sont utilisées pour modéliser le comportement de ces matériaux.

Le coût du PCM à haute capacité *RT35HC* a pu être obtenu et est de 12,6€/kg [31]. En plaçant 5 ou 7 mm de PCM dans les parois latérales et supérieure, la masse de PCM nécessaire s'élève à respectivement 18 et 25 kg, pour un total de 230 et 315€. Le PCM *RT35* étant moins évolué, il est supposé que celui-ci est légèrement moins coûteux. Globalement, il est plus intéressant de placer une épaisseur plus faible de PCM dans les parois afin de réduire les coûts d'investissement. Notons cependant qu'une épaisseur faible pourrait mener en pratique à plus de discontinuités et de manque d'homogénéité du matériau. Cette possibilité et ses conséquences n'ont pas pu être vérifiées en laboratoire.

Tout d'abord, nous évaluerons l'intérêt d'utiliser une grande épaisseur de PCM. Ensuite, nous comparerons les deux types de PCM afin de mesurer l'avantage potentiel d'utiliser du PCM à *haute capacité*.

Les FIGURES 6.3 et 6.4 présentent les résultats obtenus avec des épaisseurs de respectivement 5 et 7 mm de PCM *RT35*. Les figures de gauche (6.3a et 6.4a) présentent les résultats globaux, avec les températures extérieure, intérieure, ainsi que l'évolution de la température du matériau PCM. Les figures de droite (6.3b et 6.4b) présentent uniquement les évolutions des températures intérieures, pour plus de lisibilité.

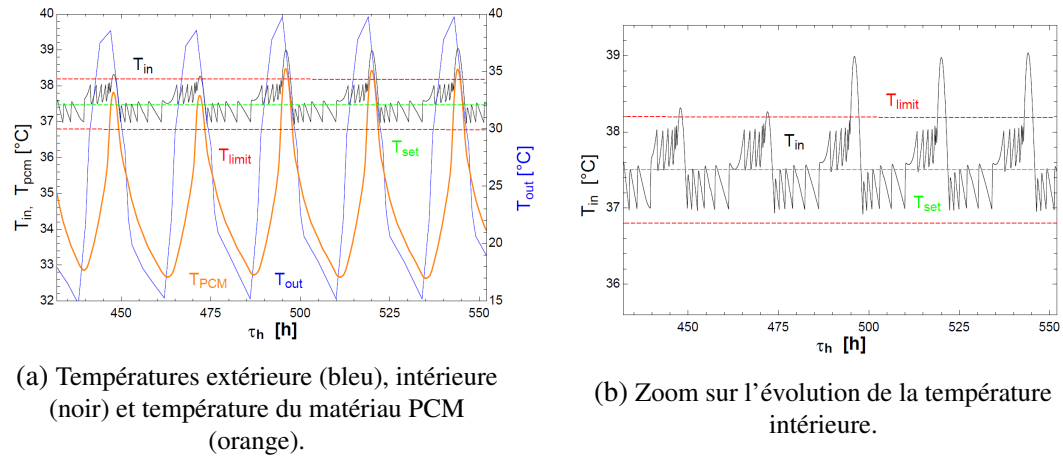


FIGURE 6.3 – Évolution des températures entre le 18 et 23 janvier pour un climat *critique* avec une épaisseur de PCM *RT35* de 5 mm. On peut voir (a) que la température de PCM est très sensible aux variations de température extérieure. La température intérieure, dont un zoom est visible en (b), dépasse la limite supérieure de température de façon significative lorsque la température extérieure approche les 40 °C.

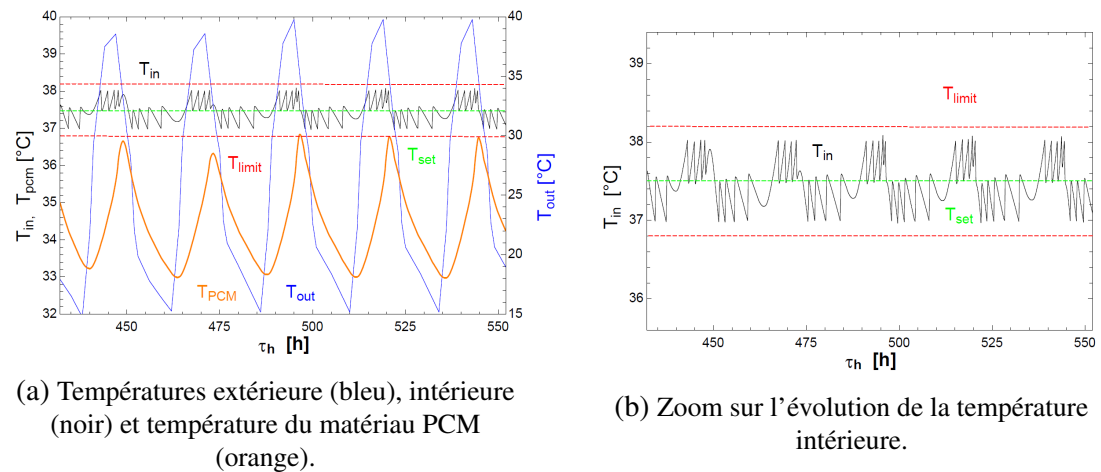


FIGURE 6.4 – Évolution des températures entre le 18 et 23 janvier pour un climat *critique* avec une épaisseur de PCM *RT35* de 7 mm. On peut voir (a) que la température de PCM est moins sensible aux variations de température extérieure grâce à l'épaisseur accrue de PCM. La température intérieure, dont un zoom est visible en (b), est stabilisée entre les limites de température (droites pointillées rouges).

On peut voir qu'il est nécessaire de placer 7 mm d'épaisseur de PCM afin de garder la température intérieure dans la plage de températures acceptable. En effet, avec 5 mm de PCM, lors des grosses chaleurs, la température intérieure dépasse la limite de

38,2°C pendant plusieurs heures (FIGURE 6.3b). Accroître l'épaisseur de PCM rend la température de paroi (c'est-à-dire de PCM inclut dans la paroi) moins variable (comparaison entre les FIGURES 6.3a et 6.4a). Celui-ci absorbe plus facilement les variations de température extérieure et permet dès lors de mieux stabiliser la température intérieure.

Les FIGURES 6.5 et 6.6 présentent les résultats obtenus en utilisant du PCM à *haute capacité*, le RT35HC. Comme précédemment les FIGURES 6.5a et 6.6a présentent les résultats globaux, tandis que les FIGURES 6.5b et 6.6b se focalisent uniquement sur l'évolution de la température intérieure. Avec ce matériau, on peut voir que la température intérieure est plus stable et ne dépasse en aucun cas les limites supérieure ou inférieure. De même, la température du PCM est sensiblement plus stable, en comparaison avec le RT35 et ce d'autant plus avec une épaisseur de PCM plus élevée.

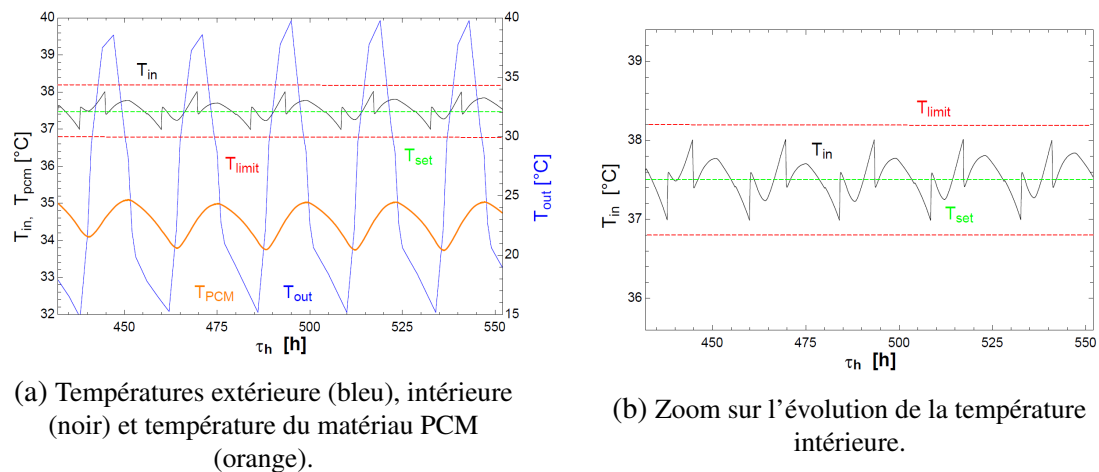


FIGURE 6.5 – Évolution des températures entre le 18 et 23 janvier pour un climat *critique* avec une épaisseur de PCM RT35HC (haute capacité) de 5 mm. On peut voir (a) que la température de PCM est relativement stable dû à la capacité du matériau à stocker beaucoup de chaleur aux environs de 35°C. La température intérieure, dont un zoom est visible en (b), est stabilisée entre les limites de température (droites pointillées rouges).

Un autre résultat important est exposé à la FIGURE 6.7. Les pertes de chaleur à travers les parois y sont représentées. L'épaisseur de polystyrène et de PCM sont de respectivement 50 mm et 7 mm. On peut voir que l'ajout de matériaux PCM dans les parois permet d'éviter une grande variabilité de ces pertes. L'effet est d'autant plus grand avec le PCM à *haute capacité* (bleu clair). Celui-ci stabilise avec succès les déperditions et donc la température intérieure. Il semble dès lors plus simple de contrôler la température au sein d'une couveuse équipée de matériaux PCM. En effet, un équipement demandant une puissance électrique moins variable, voire presque stable, est plus facile à piloter.

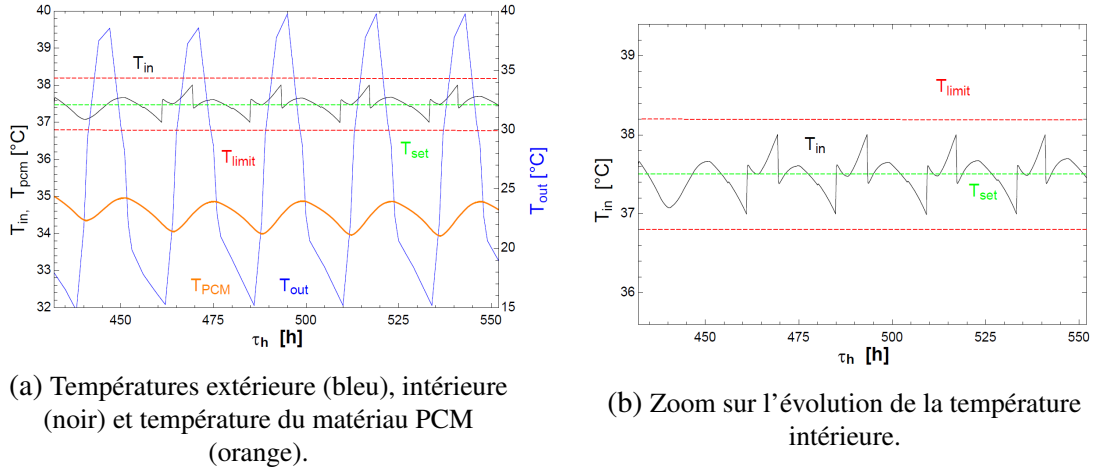


FIGURE 6.6 – Évolution des températures entre le 18 et 23 janvier pour un climat *critique* avec une épaisseur de PCM RT35HC (haute capacité) de 7 mm. On peut voir que les températures de PCM (a) et intérieure, zoom en (b), sont relativement stables tout au long de la simulation.

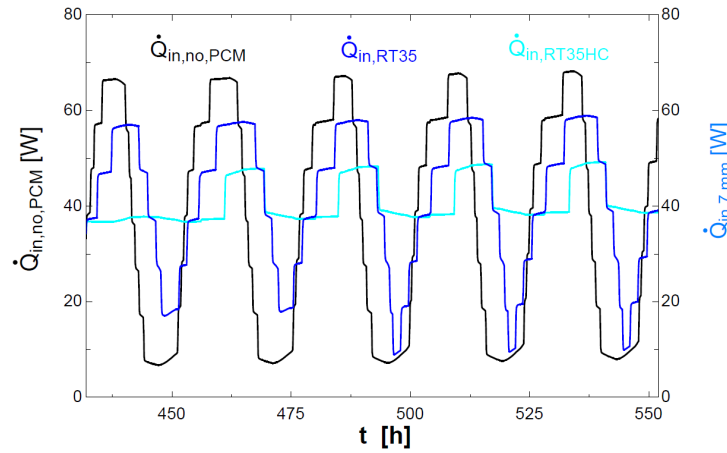


FIGURE 6.7 – Évolution des pertes de chaleur entre le 18 et 23 janvier pour un climat *critique* sans PCM (noir) et avec du PCM RT35 (bleu foncé) ou RT35HC (bleu clair). L'épaisseur de polystyrène et de PCM sont de respectivement 50 et 7 mm. On peut voir que l'ajout de matériaux PCM permet de réduire la variabilité des pertes et ce d'autant plus en utilisant du PCM à *haute capacité*, RT35HC.

En résumé, l'utilité d'ajouter des matériaux PCM dans les parois a été prouvée. Rappelons que cette modélisation est sérieusement limitée par l'hypothèse d'homogénéité du PCM, en termes d'épaisseur, de transmission de chaleur et de température. Des tests plus avancés en laboratoire seraient nécessaires afin de tirer des conclusions plus fiables, sur lesquelles bâtir un nouveau projet.

Sensibilité des résultats à l'ajout d'une fenêtre

Introduire une fenêtre, par exemple dans la porte de la couveuse, entraîne une plus grande variabilité des déperditions de chaleur. Le coefficient de transmission thermique U d'une vitre, en verre ou en plexiglas, est plus élevé que celui des parois. En effet,

pour cette application, nous avons $U_{wall} = 0,78$ [W/m²-K], tandis que $U_{window} = 3$ pour du double vitrage classique et plus de 5 [W/m²-K] pour du plexiglas.

Deux principales problématiques liées à l'ajout d'une vitre se présentent. Tout d'abord, les échanges radiatifs à travers cette vitre sont potentiellement importants. Si la couveuse est placée à l'extérieur, le rayonnement solaire peut avoir un effet considérable sur l'homogénéisation de la température intérieure. Ceci n'est donc pas recommandé afin de limiter l'impact, en particulier sur les œufs placés proches de la vitre. Ensuite, le dimensionnement du système de chauffage doit être adapté. Pour de basses températures locales (c'est-à-dire moins de 20 °C) et une vitre placée dans la paroi de la porte (telle que présenté à la FIGURE 6.8), les déperditions supplémentaires montent jusqu'à 10 W. Cela représente près de 20% de la puissance de chauffage à installer, qui est théoriquement de 60 W selon les résultats obtenus.

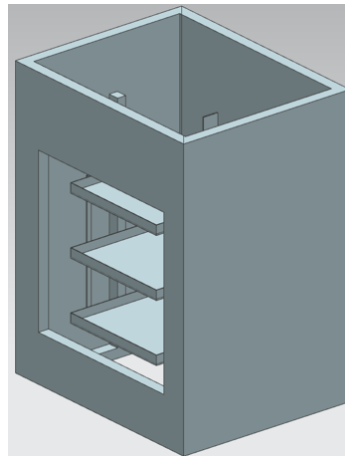


FIGURE 6.8 – Modélisation 3D du système de retournement des œufs et du caisson de la couveuse via *Siemens NX 12.0*, avec une large fenêtre d'observation d'une surface équivalente à un carré de 70 cm de côté.

Afin de limiter ces effets, une vitre de petite surface doit être préférée. Elle pourra alors être utilisée par exemple pour observer le bon fonctionnement du système de retournement des œufs, mais ne permettra pas d'observer chaque œuf et de détecter facilement des anomalies.

6.3 Sur la route de Tabligbo

À court terme, le montage du dispositif électronique doit être validé. Des phases de test en chambre climatique sont prévus afin d'évaluer l'efficacité du prototype et d'ajuster certains paramètres de contrôle. En particulier, le code électronique doit être adapté en fonction des résultats obtenus.

La reproduction du prototype au Togo est planifiée pour le mois d'août. Accompagnée de Martin Scohier, récemment diplômé de l'UMons en Ingénierie électronique, je prendrai la direction des opérations en tant que bénévole chez Ingénieurs sans Frontières. Avant le départ, une budgétisation du système global doit être effectuée. Cela implique de dresser une liste complète du matériel, matériaux de construction et composants électroniques nécessaires. Sur place, notre « client » togolais prendra en charge la récolte de fonds et veillera à ce que tout soit disponible dans les délais.

À Tabligbo, plusieurs personnes prendront part à la construction. Afin de respecter les valeurs d'ISF, qui sont également miennes, l'objectif ultime du projet est de former ces personnes afin qu'elles puissent, au besoin, reproduire elles-mêmes une couveuse. Par conséquent, l'élaboration d'un fascicule reprenant tous les détails nécessaires à une potentielle reproduction est incontournable. Celui-ci comprendra l'estimation du budget, des plans de construction et de montage, ainsi qu'un manuel d'utilisation de la couveuse. L'accent doit également être mis sur l'adaptabilité d'une nouvelle couveuse aux besoins, principalement en termes de capacité d'œufs.

Comme abordé précédemment, la dernière phase du projet vise à rendre la couveuse autonome, au moyen de panneaux photovoltaïques et d'un système de batteries. Le dimensionnement du système de stockage de l'énergie solaire sera donc étudié par la suite.

Bibliographie

- [1] “Ingénieurs sans frontières - belgique.” Disponible sur : <https://www.isfbelgique.org/>. Consulté le 25 Février 2021.
- [2] “Drapeau du togo.” Disponible sur : <https://touslesdrapeaux.xyz/togo.html>. Consulté le 03 Mars 2021.
- [3] “Carte du togo, république togolaise.” Disponible sur : https://d-maps.com/carte.php?num_car=27304&lang=fr. Consulté le 03 Mars 2021.
- [4] E. Commission, “Photovoltaic geographical information system.” Disponible sur : https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/fr/#TMY. Consulté le 4 Février 2021.
- [5] “Tabligbo climat (togo).” Disponible sur : <https://fr.climate-data.org/afrique/togo/region-maritime/tabligbo-765516/>. Consulté le 4 Février 2021.
- [6] “Fondation heidelberg cement – togo.” Disponible sur : <https://www.heidelbergcement.tg/fr/fondation-heidelbergcement>. Consulté le 15 Février 2021.
- [7] A. M. King’ori, “Review of the Factors That Influence Egg Fertility and Hatchability in Poultry,” *International Journal of Poultry Science*, vol. 10, no. 6, pp. 483–492, 2011.
- [8] A. T. A, A. A. O, and F. O. G, “Development of an Automatic Electric Egg Incubator,” *International Journal of Scientific Engineering Research*, vol. 4, no. 9, 2013.
- [9] N. A. French, “Modeling Incubation Temperature : The Effects of Incubator Design, Embryonic Development, and Egg Size,” *Poultry Science*, vol. 76, no. 1, pp. 124–133, 1997.
- [10] S. Sansomboonsuk, C. Phonhan, and G. Phonhan, “An Automatic Incubator,” *Energy Research Journal*, vol. 2, no. 2, pp. 51–56, 2011.
- [11] “Borotto.” Disponible sur : https://www.borotto.com/page_principale. Consulté le 2 Février 2021.
- [12] “Brinsea - incubation specialists.” Disponible sur : <https://www.brinsea.com/>. Consulté le 2 Février 2021.

- [13] “Janoel - incubator warehouse.” Disponible sur : <https://incubatorwarehouse.com/egg-incubators.html>. Consulté le 2 Février 2021.
- [14] “Miller - manufacturing company.” Disponible sur : <https://www.miller-mfg.com/>. Consulté le 2 Février 2021.
- [15] “Novital.” Disponible sur : <https://novital.it/en/>. Consulté le 2 Février 2021.
- [16] “River.” Disponible sur : <https://www.riversystems.it/en/>. Consulté le 2 Février 2021.
- [17] “Autodesk inventor software.” Disponible sur : <https://www.autodesk.com/products/inventor/overview?term=1-YEAR>. Utilisé entre novembre et décembre 2020.
- [18] A. H. Fundamental, “Chapter 8,” 1993.
- [19] C. Romijn and W. Lokhorst, “Foetal heat production in the fowl,” *The Journal of physiology*, vol. 150, no. 1, pp. 239–249, 1960.
- [20] P. Tiam Kapen, M. Youssoufa, M. Foutse, H. Manfouo, and F. O. Njotchui Mbakop, “Design and prototyping of a low-cost, energy efficient eggs incubator in developing countries : A case study of Cameroon,” *Scientific African*, vol. 10, p. e00618, 2020.
- [21] R. Joosep, “Moisture and thermal conductivity of lightweight block walls,” in *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*, vol. 96, p. 012033, IOP Publishing, 2015.
- [22] “Hubo betonplex.” Disponible sur : <https://www.hubo.be/fr/p/betonplex-244x122-cm-18mm-basic/481588.html>. Consulté le 12 Mars 2021.
- [23] J. Hirschey, K. R. Gluesenkamp, A. Mallow, and S. Graham, “Purdue e-Pubs Review of Inorganic Salt Hydrates with Phase Change Temperature in Range of 5 to 60°C and Material Cost Comparison with Common Waxes,” tech. rep., 2018.
- [24] F. Agyenim, N. Hewitt, P. Eames, and M. Smyth, “A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS),” feb 2010.
- [25] N. Kumar, S. K. Gupta, and V. K. Sharma, “Application of phase change material for thermal energy storage : An overview of recent advances,” *Materials Today : Proceedings*, nov 2020.
- [26] P. E. . Okpagu and A. W. Nwosu, “Development and temperature control of smart egg incubator system for various types of egg,” *European Journal of Engineering and Technology*, vol. 4, no. 2, 2016.

- [27] “Ees software.” Disponible sur : <http://fchartsoftware.com/ees/>. Utilisé entre février et mai 2021.
- [28] “Siemens nx 12.0 software.” Disponible sur : <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/nx/>. Utilisé entre mars et avril 2021.
- [29] I. ASHRAE, *2009 ASHRAE handbook : fundamentals*. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, 2009.
- [30] B. Dechesne, S. Gendebien, J. Martens, and J. Gilbert, “Designing and testing an air-PCM heat exchanger for building ventilation application coupled to energy storage University of Liège , Aerospace and Mechanical Engineering Department , Thermodynamics Laboratory , * Corresponding Author :,” pp. 1–10, 2014.
- [31] “Rubitherm.” Disponible sur : <https://www.rubitherm.eu/en/index.php/productcategory/organische-pcm-rt>. Consulté le 15 Mars 2021.
- [32] “Hubo polystyrène expansé.” Disponible sur : <https://www.hubo.be/fr/p/panneau-isolant-100x50x5-cm-r1-1-2-5m/883071.html>. Consulté le 12 Avril 2021.
- [33] “Grandeurs hygrométriques.” Disponible sur : <https://energieplus-lesite.be/theories/enveloppe9/proprietes-materiaux/grandeurs-hygrometriques/>. Consulté le 1er Mars 2021.

Annexes

A Contextualisation

A.1 Fonctionnement d'Ingénieurs Sans Frontières

Un diagramme explicatif du fonctionnement de l'association ISF est disponible à la FIGURE A.1. Plus d'informations ont été proposées en introduction (section 1.2.1).

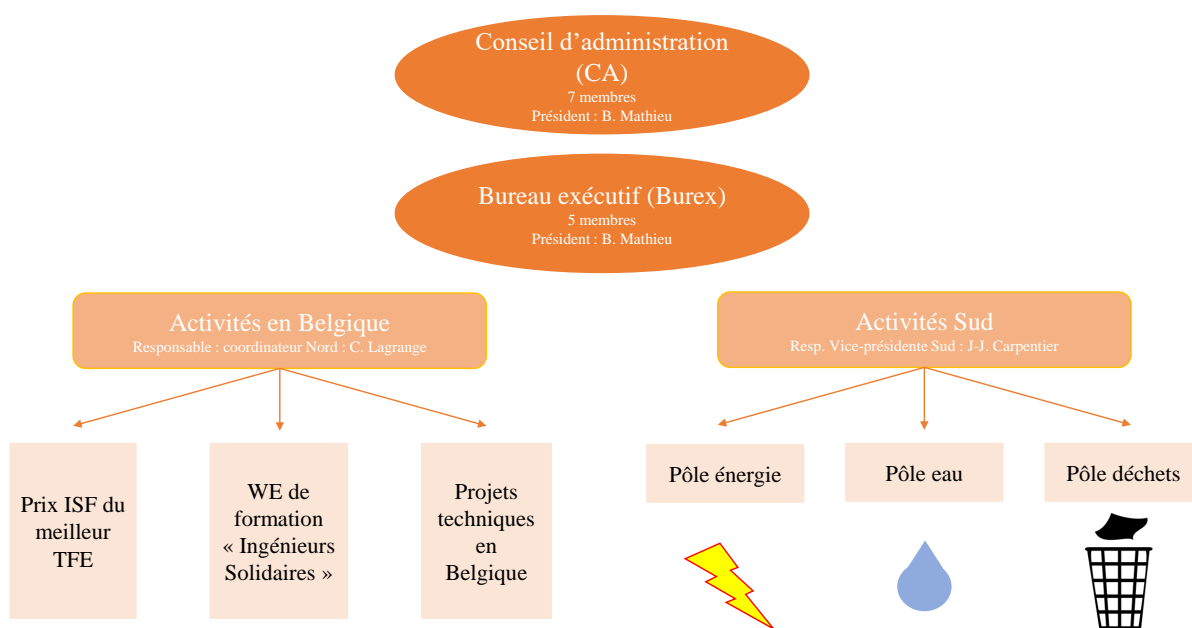


FIGURE A.1 – Diagramme résumant le fonctionnement et les actions d'Ingénieurs Sans Frontières Belgique.

A.2 Rappels théoriques sur la mesure du taux d'humidité

Il est nécessaire de redéfinir la notion d'humidité relative afin de comprendre au mieux les données qui seront manipulées dans ce travail. Elle se définit comme le rapport de la pression partielle de la vapeur d'eau sur la pression de vapeur saturante, à une température T donnée. Elle est usuellement exprimée en pourcentage :

$$RH = \frac{P_{vap}}{P_{sat}(T)} [\%]$$

Autrement dit, c'est une mesure de la teneur en vapeur d'eau dans l'air. Une humidité relative de 100% indique que la quantité d'eau contenue dans l'air a atteint sa capacité maximale, des gouttelettes d'eau liquide commencent alors à se former [33]. Notons que la pression de vapeur saturante augmente avec la température. C'est pourquoi il est possible de diminuer l'humidité relative contenue dans de l'air simplement en le réchauffant.

A.3 Mécanisme de retournement des œufs

Le moteur 60KTYZ utilisé pour le retournement des œufs a les caractéristiques suivantes :

- Type : À courant alternatif synchrone 220V 50Hz,
- Vitesse de rotation : 2,5 tours par minute,
- Puissance : 14W,
- Couple nominal : 50 kg.cm,
- Capacité : 0,47μF,
- Diamètre du corps : 60 mm,
- Hauteur totale : 83 mm,
- Diamètre de l'arbre : 7 mm,
- Taille du trou de montage : 5,5 mm,
- Distance du trou de montage : 50 mm,
- Matériel : Métal, plastique
- Poids : 600g.

B État de l'art

B.1 Fiche technique ventilateurs

DC Brushless Cooling Fan **multicomp** PRO

Structure and Form

Structure	: Axial Motor Fan
Housing	: Black PBT UL94V-0
Blade	: Black PBT UL94V-0
Bearing	: Sleeve Bearing
Lead	: 24AWG/L= 150mm

Rated and Operating Condition

Rated Voltage (V DC)	: 12V
Rated current (A)	: 0.16A ±0.03A
Startup Voltage (V DC)	: 7V (On/Off)
Rated Input Power (W)	: 1.92 W ±10%
Operating Voltage (V DC)	: 10.2 to 13.8V
Operating Temperature (°C)	: -10°C to +70°C
Storage Temperature (°C)	: -40°C to +80°C
Speed	: 3000 RPM ±10%

Standard Environmental Condition

Environment Temperature	: 5°C to 35°C
Relative Humidity	: 45% to 85%

Air Flow-Air Pressure Characteristic

Applicable Conditions: Shall be applied in the state when the standard, environmental conditions and voltage are fixed.

Item	Conditions	Standard
Max. Air Flow	Air pressure = 0	38.6 CFM
Max. Air Pressure	Air flow = 0	3.02mm H ₂ O

Performance

Applicable Conditions: Shall be applied under the standard environmental condition and rated conditions.

Item	Conditions	Standard
Noise	Shall be measure in around isolated room of background noise 20DB or Less, in a distance of 1m from intake direction	33.03dBa
Insulation Resistance	When test Voltage of DC 250V is impressed between terminal (+) and housing	Min 10mΩ
Dielectrics Withstand Voltage	When voltage of AC 500V is impressed between terminal (+) and housing	Shall be free of abnormality

Newark.com/multicomp-pro
Farnell.com/multicomp-pro
Element14.com/multicomp-pro

multicomp PRO

FIGURE B.1 – Fiche technique des ventilateurs axiaux.

C Modélisation

C.1 Fiches techniques PCM

Data sheet



RT35



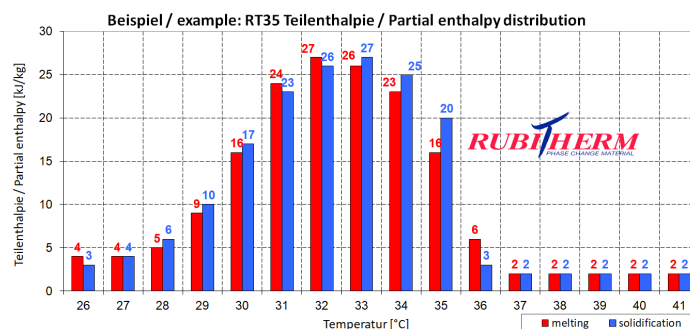
RUBITHERM® RT is a pure PCM, this heat storage material utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature. The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low differences in operating temperature are applicable.

Properties for RT-line:

- high thermal energy storage capacity
- heat storage and release take place at relatively constant temperatures
- no supercooling effect, chemically inert
- long life product, with stable performance through the phase change cycles
- melting temperature range between -9 °C and 100 °C available

The most important data:

Melting area	29-36	[°C]
	main peak: 33	
Congeeing area	36-31	[°C]
	main peak: 35	
Heat storage capacity ± 7,5%	160	[kJ/kg]*
Combination of latent and sensible heat in a temperature range of 26°C to 41 °C.	45	[Wh/kg]*
Specific heat capacity	2	[kJ/kg·K]
Density solid at 15°C	0,86	[kg/l]
Density liquid at 45°C	0,77	[kg/l]
Heat conductivity (both phases)	0,2	[W/(m·K)]
Volume expansion	12,5	[%]
Flash point	167	[°C]
Max. operation temperature	65	[°C]



Rubitherm Technologies GmbH
Imhoffweg 6
D-12307 Berlin
phone: +49 (30) 7109622-0
E-Mail: info@rubitherm.com
Web: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice.
Version: 09.10.2020

*Measured with 3-layer-calorimeter.

FIGURE C.1 – Fiche technique PCM RT35 société Rubitherm [31].

Data sheet



RT35HC



RUBITHERM® RT is a pure PCM, this heat storage material utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature. The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low differences in operating temperature are applicable.

Properties for RT-line:

- high thermal energy storage capacity
- heat storage and release take place at relatively constant temperatures
- no supercooling effect, chemically inert
- long life product, with stable performance through the phase change cycles
- melting temperature range between -9 °C and 100 °C available

The most important data:

Melting area

Typical Values

34-36 [°C]

main peak: 35

Congealing area

36-34 [°C]

main peak: 35

Heat storage capacity $\pm 7,5\%$

Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of 27°C to 42 °C.

240 [kJ/kg]*

67 [Wh/kg]*

Specific heat capacity

2 [kJ/kg·K]

Density solid

at 25°C

0,88 [kg/l]

Density liquid

at 40°C

0,77 [kg/l]

Heat conductivity (both phases)

0,2 [W/(m·K)]

Volume expansion

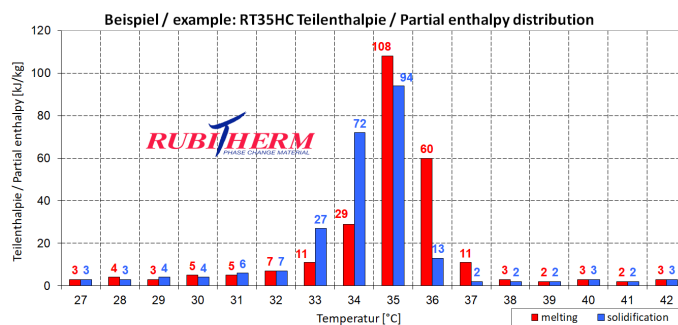
12 [%]

Flash point

177 [°C]

Max. operation temperature

70 [°C]



Rubitherm Technologies GmbH
Imhoffweg 6
D-12307 Berlin
phone: +49 (30) 7109622-0
E-Mail: info@rubitherm.com
Web: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice.
Version: 09.10.2020

*Measured with 3-layer-calorimeter.

FIGURE C.2 – Fiche technique PCM RT35HC société Rubitherm [31].

C.2 Résultats

Sensibilité du modèle à la température du sol

Lors des simulations, la température du sol a été fixée à la température moyenne de l'air (26°C). Nous allons analyser la sensibilité des résultats à cette hypothèse. Une autre possibilité aurait été de fixer la température du sol à la température de l'air extérieur. Cela aurait du sens si la couveuse était légèrement surélevée, par exemple si elle était placée sur des roulettes.

Un suivant l'une ou l'autre des deux hypothèses, les pertes sont logiquement égales en moyenne et s'élèvent à 4,4 W. Dans le premier cas, les déperditions par le sol sont peu variables, étant donné que la température du sol est constante et la température intérieure de la couveuse maintenue très stable. Les pertes ne varient qu'entre 3,5 et 5,5 W (FIGURE C.3a). Dans le deuxième cas, les pertes sont plus variables et ont la même allure que les pertes par les parois latérales. Elles varient entre 1 et 8 W (FIGURE C.3b). La FIGURE C.3 illustre ces propos en présentant les résultats relatifs à la période du 18 et 19 janvier, mois aux températures les plus variables.

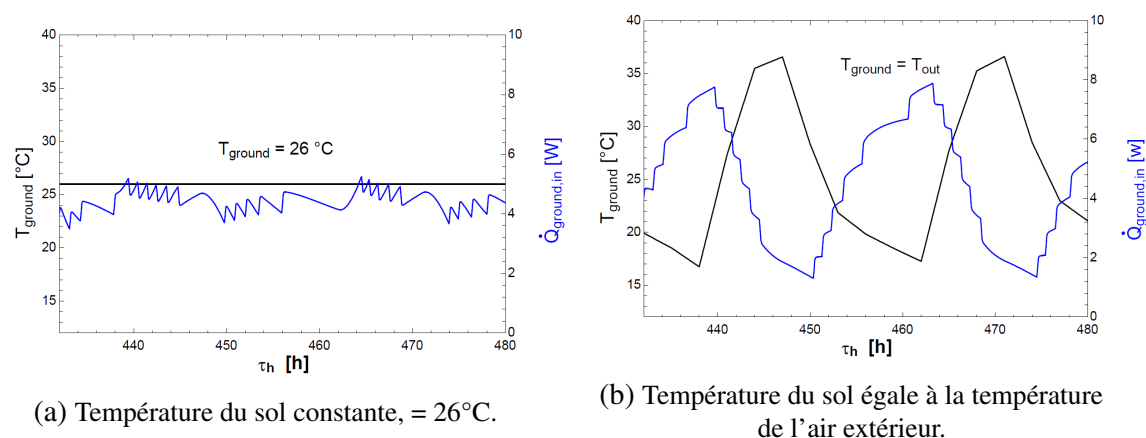


FIGURE C.3 – Évolution de la température du sol (noir) et des déperditions de l'intérieur de la couveuse vers le sol (bleu) les 18 et 19 janvier, mois aux températures variables. On peut voir que lorsque la température du sol est supposée constante (C.3a), les pertes sont relativement stables. Quand elle est supposée égale à la température extérieure (C.3b), les pertes sont plus variables et deviennent significatives pendant la nuit.

La conclusion est que l'hypothèse utilisée dans les modélisations induit une erreur d'au maximum 2,5 W sur les pertes par le sol. Les pertes sont plus importantes la nuit et diminuées en journée. Sachant que les déperditions totales de la couveuse s'élèvent à environ 30 W pendant cette période de l'année, cela représente moins de 10% d'erreur sur le bilan thermique global.

C.3 Dimensions caisson

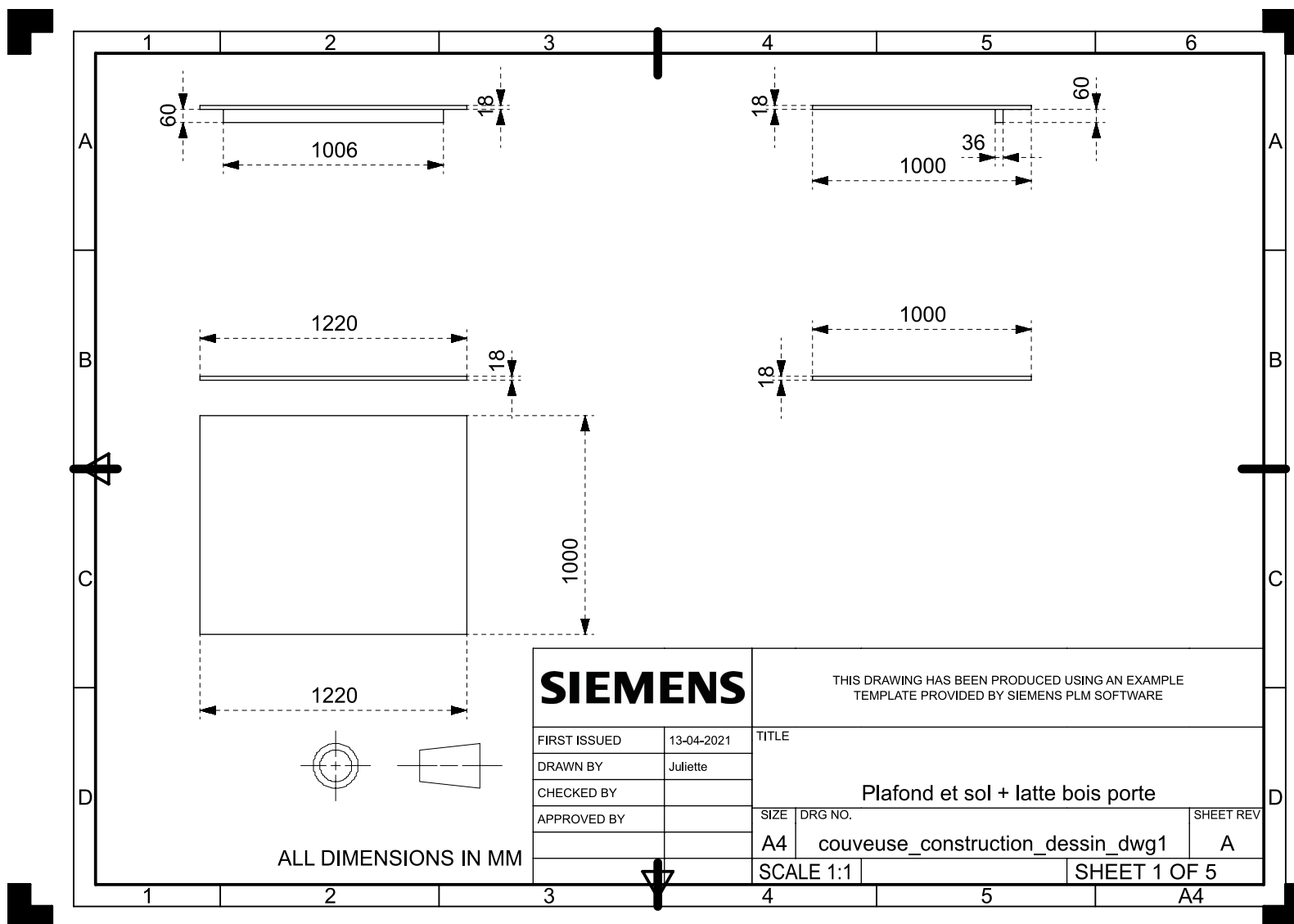


FIGURE C.4 – Modélisation via *NX 12.0* des planches de *betonplex* du plafond et du sol.

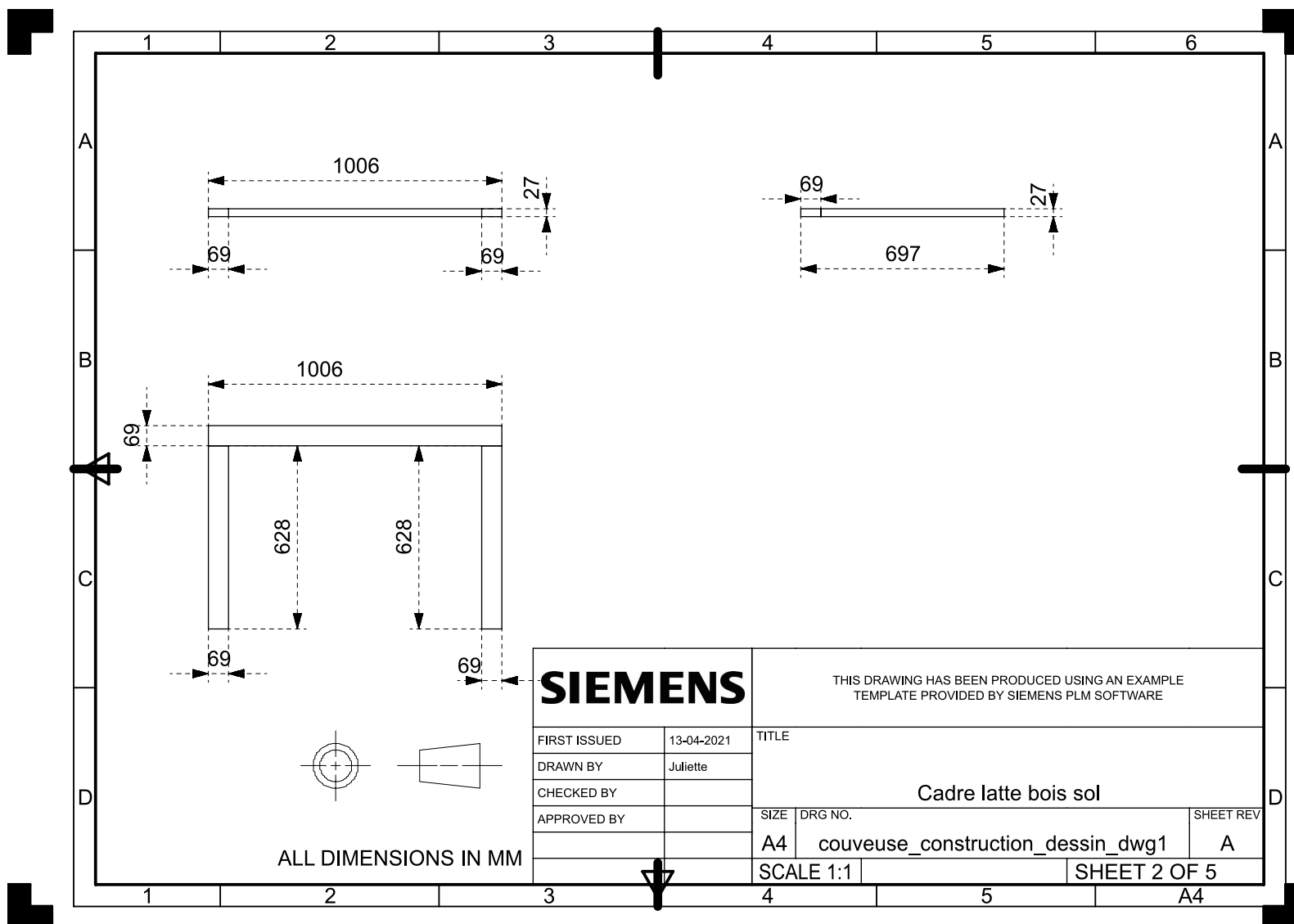


FIGURE C.5 – Modélisation via *NX 12.0* du cadre au sol en lattes de bois, servant à fixer les planches latérales.

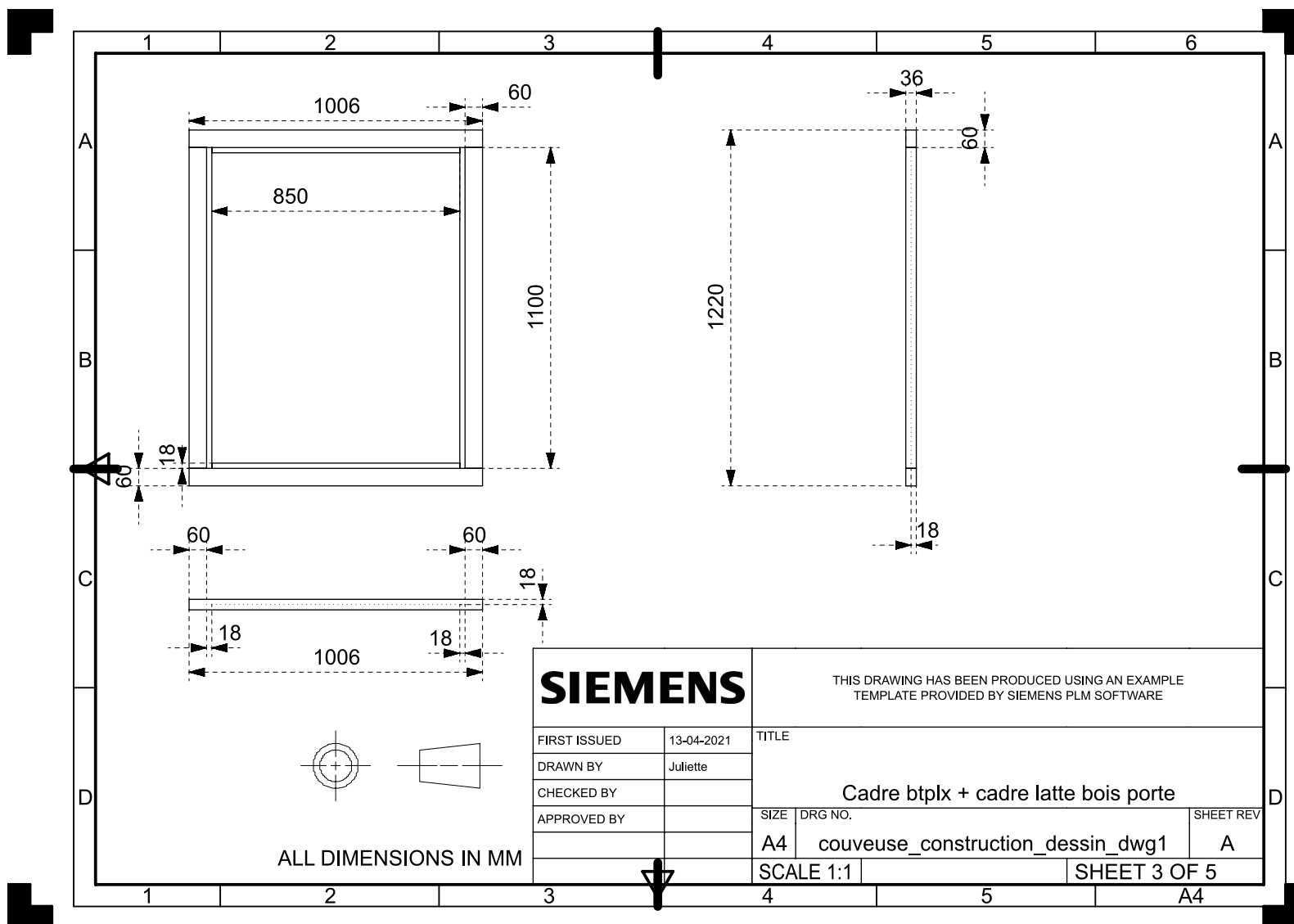
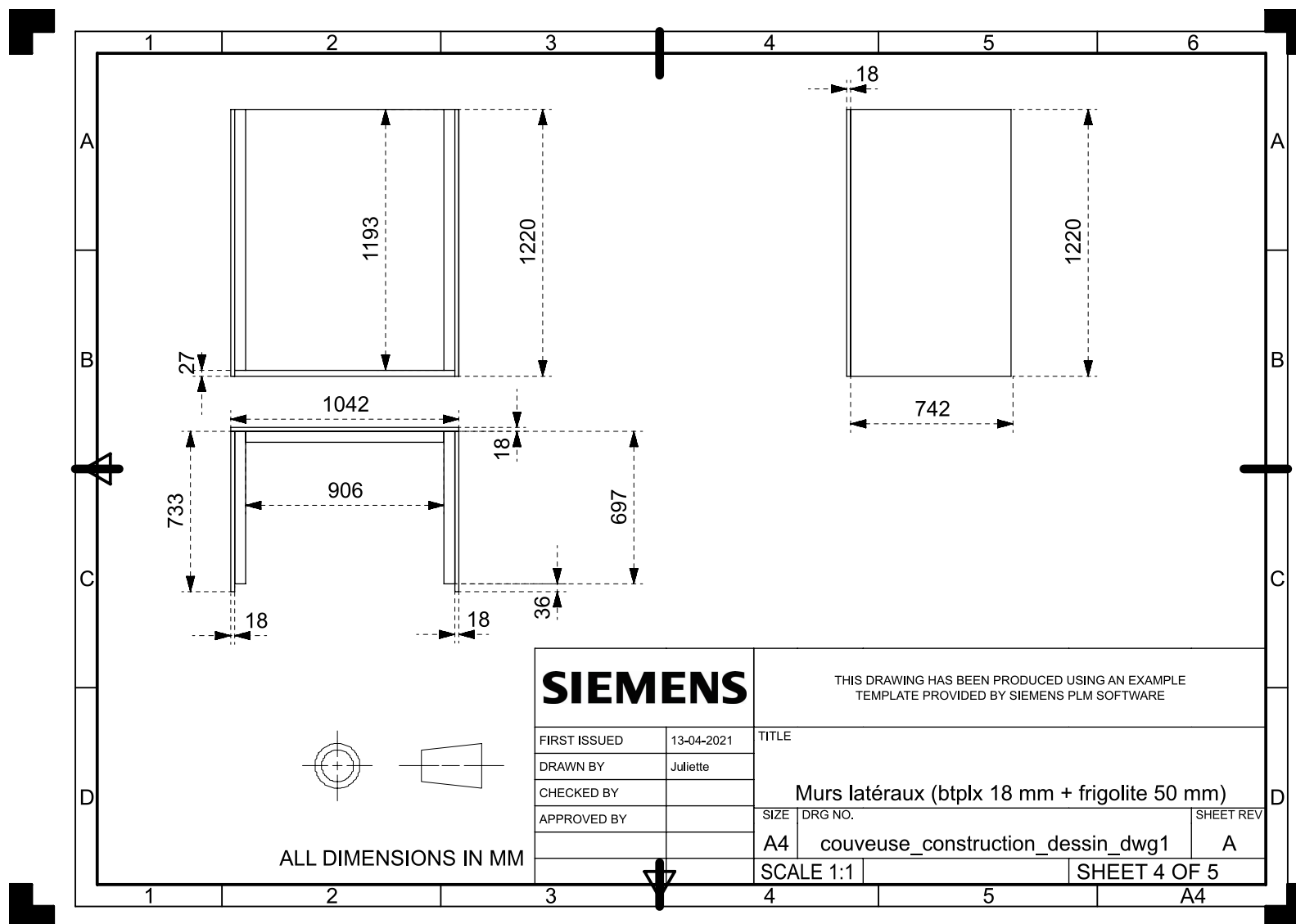


FIGURE C.6 – Modélisation via *NX 12.0* du cadre de porte en *betonplex*.

FIGURE C.7 – Modélisation via *NX 12.0* des murs latéraux composés de planche de contreplaqué *betonplex* de 18 mm et de polystyrène de 50 mm.

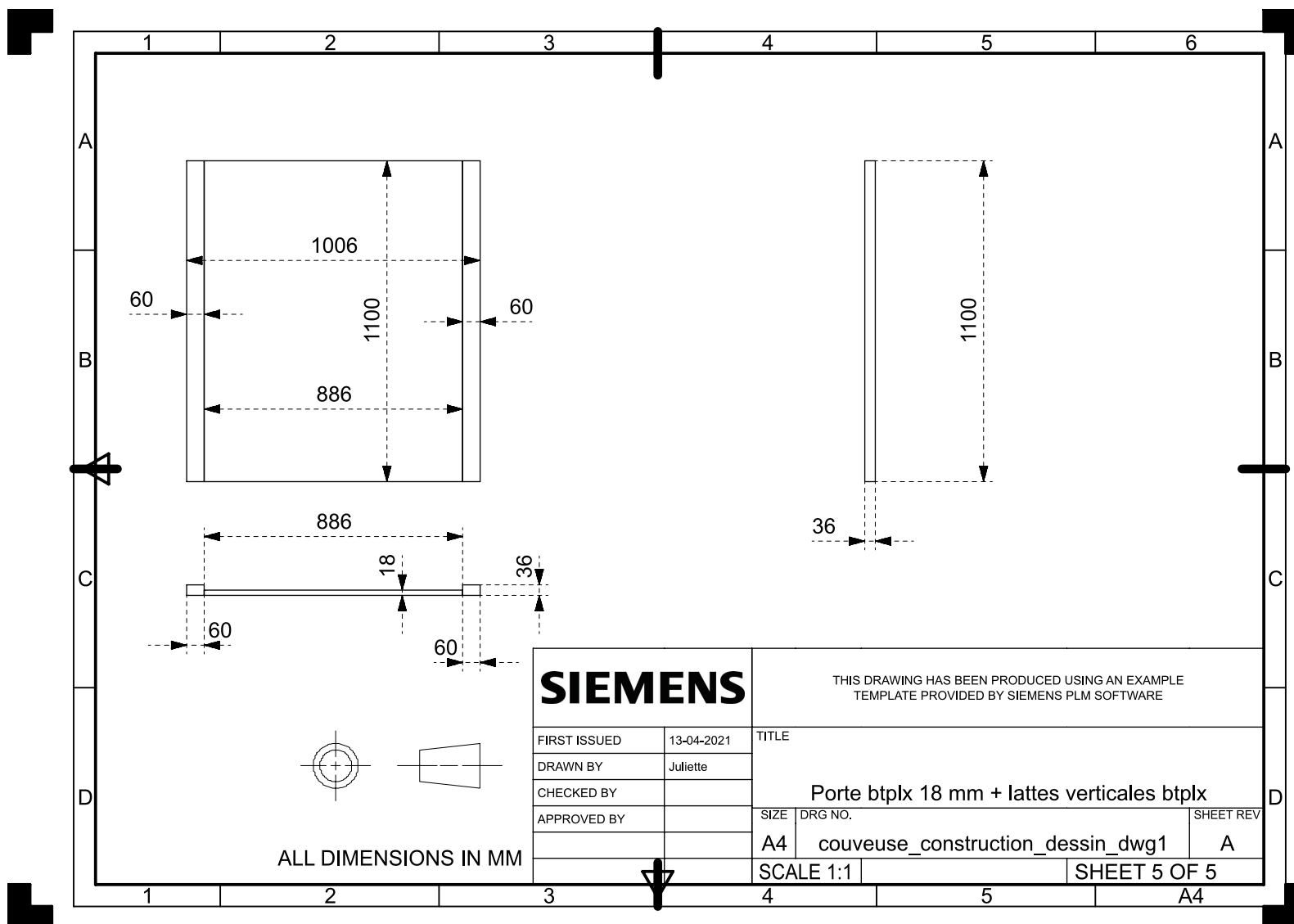


FIGURE C.8 – Modélisation via NX 12.0 de la porte à fixer au cadre de bois ajouté à l’encadrement de la porte.