

République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de
l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

Mémoire de Fin d'Études

MASTER professionnel

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electronique

Spécialité : Electronique industrielle

Thème :

Conception de la commande d'une chambre blanche
d'un bloc opératoire

Présenté par :

❖ BOUSSAFEUR M'HANI
❖ OUYED AMAYAS

Dirigé par :

Mr M. LAGHROUCHE

Année universitaire 2023/2024

REMERCIEMENT

Nous remercions au terme de ce modeste travail le Bon Dieu de nous avoir insufflé le courage, la persévérance et la ténacité.

Nous remercions vivement notre promoteur Mr M. LAGHROUCHE pour tous ses conseils et orientations. Nous voudrions exprimer également notre profonde gratitude à Mr CHAREF pour sa gentillesse et ses précieux conseils.

Nous tenons aussi à exprimer notre gratitude nos familles pour leurs encouragements et leurs soutiens.

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce modeste travail.

DÉDICACE

M'hani,

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents qui ont tout donné pour que je réussisse, ma sœur Kaïssa et à mes grands-parents maternelle et à tous mes proches.

Je voudrais dédier aussi ce travail spécialement à la mémoire de ma grand-mère paternelle, que son âme repose en paix. À tous mes amis, merci pour votre soutien inconditionnel tout au long de mon parcours.

Amayas,

À mes chers parents, à mon frère Belkacem, et à toute ma famille, Je vous dédie ce mémoire en signe de reconnaissance pour votre amour, votre soutien et vos encouragements constants tout au long de mon parcours académique

Votre présence et vos sacrifices ont été la clé de ma réussite, et c'est grâce à vous que j'ai pu arriver jusqu'ici.

Papa, Maman, vos conseils avisés et votre foi en mes capacités m'ont toujours poussé à donner le meilleur de. À toute ma famille, votre amour et vos encouragements ont été une source inestimable de force et de motivation.

Du fond du cœur, merci.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	1
NOMENCLATURE.....	4
ABREVIATIONS UTILISEES	5
TABLE DES FIGURES.....	6
INTRODUCTION GENERAL	8
Chapitre I	13
Notion de Thermique	13
I INTRODUCTION	13
II DEFINITIONS DE BASE.....	13
II.1 Conduction	14
II.2 Convection.....	14
II.3 Rayonnement	15
II.4 EQUATION FONDAMENTALE DE LA TRANSMISSION DE CHALEUR	16
III DONNEES DE BASE	18
III.1 Situation géographique	18
III.2 Conditions extérieures	19
III.3 Conditions intérieures.....	19
IV DIAGRAMME DE L’AIR	22
.....	25
I Installation.....	26
Chapitre II	30
GENERALITE SUR LA COMMANDE DES CHAMBRES BLANCHES D’OPERATION..	30
I Présentation de la chambre blanche d'opération	30
II Définition des chambres blanches d'opération.....	30
III Les principaux paramètres environnementaux contrôlés dans une salle blanche d'opération	32
IV TECHNOLOGIES DE CONTROLE ET D'AUTOMATISATION LES PLUS COURAMMENT UTILISEES DANS LES SALLES BLANCHES D'OPERATION	35
IV.1 Systèmes de surveillance environnementale	35
IV.2 Systèmes de ventilation et de filtration d'air	36
IV.3 Systèmes de contrôle du flux d'air	37
IV.4 Systèmes de contrôle et d'automatisation	37

V	CAPTEURS	38
V.1	Introduction.....	38
V.2	Les capteurs analogiques	39
V.2.1	Types de capteurs analogiques	40
V.2.2	Fonctionnement des capteurs analogiques	42
V.2.3	Avantages des capteurs analogiques	43
V.2.4	Inconvénients des capteurs analogiques	43
V.3	Capteurs numériques :	43
V.3.1	Types de capteurs numériques	44
V.3.2	Fonctionnement des capteurs numériques	45
V.3.3	Avantages des capteurs numériques	46
V.3.4	Inconvénients des capteurs numériques	46
V.4	Capteur logique ou tout ou rien (TOR)	47
V.5	Les actionneurs.....	47
V.5.1	Fonctionnement des Actionneurs	48
V.6	La relation capteurs et actionneurs.....	49
VI	Conclusion :	50
Chapitre III		51
Conception matérielle et logiciel.....		51
I	Introduction.....	51
II	La conception d'une chambre blanche	51
III	Equipements de la centrale.....	56
IV	Les différents composant constituant notre système	57
IV.1	Description de la carte à microcontrôleur	58
V	Fonctionnement de la carte ESP32	60
V.1	Architecture et Processeur	60
V.2	Connectivité.....	60
V.3	Interfaces et Périphériques	60
VI	Configuration de l'ESP32 avec l'IDE Arduino	61
VI.1	Installation de l'IDE Arduino	61
VI.2	Configuration de l'IDE pour l'ESP32.....	61
VI.3	Connexion de l'ESP32	61
VII	Présentation du module de capteur BME280	62
VIII	Description du capteur BME280	63
➤	Spécification des paramètres d'humidité :.....	63

IX	Présentation du module de Capteur PMS5003.....	65
X	La Centrale de Traitement d'Air (CTA).....	66
XI	La régulation PID	69
	XI.1 Action proportionnelle(P) :.....	70
	XI.2 Action intégrale(I) :.....	70
	XI.3 Action dérivée (D) :.....	70
XII	Principe de la régulation PID :	70
XIII	Les différents types d'implémentation :	71
	XIII.1 Structure PID Série :	71
	XIII.2 Structure PID parallèle :.....	71
	XIII.3 Structure PID Mixte :	72
XIV	Régulation des PID par rapport aux moteurs	72
XV	Asservir des moteurs à courant continu avec un PID et Arduino :.....	73
XVI	Description de la partie logicielle	74
	XVI.1 Arduino ide	74
	XVI.2 Présentations de Arduino ide	74
	XVI.3 Logiciel de commande sur pc	74
XVII	Schéma ESP32 et PMS5003	75
XVIII	Schéma – ESP32 avec BME280 utilisant I2C.....	75
XIX	Installation de la bibliothèque BME280	76
XX	- les lectures affichées sur le moniteur série :.....	81
XXI	Conclusion	81
	Conclusion générale	82
	Bibliographie	83

NOMENCLATURE

E : épaisseur du mur	$m.$
$f_{1/2}$: facteur de vue de la surface 2 par rapport à 1	
h : coefficient d'échange superficielle par convection	$kcal / hm^2 \text{ } ^\circ C$
h_r : coefficient de rayonnement	$kcal / h m^2 \text{ } ^\circ C$
h_i : Enthalpie de l'air intérieur	$kcal/h$
h_s : Enthalpie de l'air soufflé	$kcal/h$
K : la conductibilité thermique du mur e	$kcal / hm^\circ C$
L_s : débit de soufflage	kg/h
Q : Quantité de chaleur échangée	$Kcal/hK$
S : surface d'échange de chaleur en	m^2
T_F : Température intérieur	$^\circ C$
X_i : Teneur en eau de l'air intérieur	$\frac{kg \text{ d'eau}}{kg \text{ d'airsec}}$
X_s : Teneur en eau de l'air soufflé	$\frac{kg \text{ d'eau}}{kg \text{ d'airsec}}$
Y_F : Humidité relative Intérieure	$\%$

ABREVIATIONS UTILISEES

ADC : analog-to-digital converter

BLE: Bluetooth Low Energy

BMS : building management system

CTA : Centrale de ventilation d'air

GPIO : General Purpose Input/Output

HEPA : Haute Efficacité pour les Particules Aériennes

PLC : programmable logic controller

SAS : Système d'accès sécurisé

SPI : Serial Peripheral interface

ULPA : ultra-low penetration air.

UV : Ultra violet

TABLE DES FIGURES

Fig.1	Différentes couches d'un mur	16
Fig.2	Diagramme de l'air	24
Fig.3	Evolution de l'air dans l'installation en hiver	25
Fig.4	Evolution de l'air dans l'installation en été	25
Fig.5	Installation de traitement d'air	26
Fig.6	Schéma de la régulation	29
Fig.7	Flux unidirectionnel (laminaire)	36
Fig.8	Schéma fonctionnel d'un capteur	38
Fig.9	Signal d'un capteur analogique	39
Fig.10	Signal d'un capteur numérique	44
Fig.11	Système de diffusion d'air	52
Fig.12	Les cascades de pression	54
Fig.13	Schéma synoptique du système	57
Fig.14	carte ESP32	58
Fig.15	Différentes pièces de la carte ESP32	59
Fig.16	Les ports de la carte ESP32	60
Fig.17	plage de fonctionnement du capteur d'humidité	64
Fig.18	Capteur PMS5003	65

Fig.19	Ventilateur	66
Fig.20	Filtre HEPA	67
Fig.21	Humidificateur/Déshumidificateur	67
Fig.22	Batterie Electrique et à eau	68
Fig.23	Ecran Tactile LCD	69
Fig.24	Structure PID Série	71
Fig.25	Structure PID parallèle	72
Fig.26	Structure PID mixte	72
Fig.27	Schéma PID	73
Fig.28	Schéma ESP32 Et PMS5003	75
Fig.29	Schéma ESP32 avec capteur BME280	76

INTRODUCTION
GENERALE

INTRODUCTION GENERAL

Né au sein des hôpitaux, le concept de salle blanche n'a pas vu le jour « aujourd'hui ». Elle est apparue il y a des siècles, avec des chirurgiens qui étaient en grande partie responsables.

Lorsque la présence des bactéries était constatée et que leur responsabilité dans les infections a été avérée, il était devenu évident de chercher à développer des solutions pour lutter contre elles. C'est dans ce cadre que furent introduits les produits aseptisant. La solution à base d'acide phénique apparaît comme la clé efficace dans la stérilisation des instruments d'opération, la désinfection des mains et la pulvérisation de l'environnement.

L'histoire de la chambre blanche est riche en événements. Voici quelques dates importantes qui ont jalonné son évolution.

1946 – Bourdillon et Clobrook mettent en place l'utilisation de locaux à pression positive par rapport aux locaux adjacents, dans le but d'empêcher l'air extérieur vicié de pénétrer à l'intérieur. C'est ainsi que sont apparues les premières chambres dites pression positive.

1961 à 1962 – Le système à sens unique est créé. Autrement dit, il s'agit du concept de ventilation avec filtres à flux sous régime seuil. Des projets ont été utilisés dans lesquels les humains étaient considérés comme une source de bactéries et un disperseur de particules cutanées et d'autres sources, telle que la respiration.

1964 – Utilisation du flux d'air comme moyen d'éliminer les contaminants dans les hôpitaux. John Charnley décide d'introduire la technique du joint artificiel de type bassin. La méthode n'a pas été bénéfique pour les patients (en opération) et au fil du temps, la jonction artificielle a dû être retirée.

INTRODUCTION

1966 – Utilisation du flux laminaire. Réduction des infections pendant les opérations de 9% à 1,3%.

1980 – « Ultraclean » est créé avec un système à flux laminaire. Pour la première fois, les environnements de production ont été nettoyés pour la fabrication de systèmes de précision. Dès lors, le concept « Bacteria-Free » est né.

La salle d'opération est le lieu le plus angoissant qu'ait connu la plupart des patients qui y sont accueillis. Elle doit être conçue de manière à limiter au maximum les risques qu'ils encourent, tout en permettant à l'équipe chirurgicale de travailler le plus efficacement possible. La Conception d'une pareille salle commence avec celle de l'hôpital lui-même, et sa situation doit faire l'objet de discussions entre les architectes, les spécialistes en climatisation, les autorités hospitalières et les chirurgiens. La salle d'opération doit être parfaitement aseptique (à l'abri des microbes), proche des chambres du service de chirurgie, mais pourtant assez isolée pour n'être point troublée par le mouvement journalier de l'hôpital. Entre cette salle et l'ensemble de l'hôpital doit être ménagée une zone intermédiaire pour permettre le passage des malades du milieu ordinaire septique à la salle aseptique sans risque d'introduction de germes aseptique dans cette dernière. Après une opération, le malade sera d'abord mené dans la salle de réanimation puis dans sa chambre en passant par cette zone de transfert.

La commande électronique joue un rôle crucial dans la maintenance de conditions optimales à l'intérieur de ces salles, en particulier en ce qui concerne la qualité de l'air, sa pression, son humidité et sa température. Voici quelques points clés sur l'importance de la commande électronique dans les salles d'opération :

INTRODUCTION

- ✓ **Contrôle de la qualité de l'air** : Les salles d'opération doivent maintenir un niveau élevé de propreté et de pureté de l'air pour réduire le risque d'infections nosocomiales. La commande électronique permet de surveiller en temps réel la qualité de l'air et de déclencher des actions correctives en cas de détection de contaminants.

- ✓ **Maintien de la pression différentielle** : Les salles d'opération sont souvent maintenues à une pression plus élevée que les zones environnantes pour empêcher la contamination extérieure d'entrer. La commande électronique assure le maintien de cette pression différentielle critique pour la sécurité des patients.

- ✓ **Contrôle de l'humidité et de la température** : Des niveaux adéquats d'humidité et de température sont essentiels pour le confort des patients et du personnel médical, ainsi que pour le bon fonctionnement des équipements médicaux sensibles. La commande électronique permet de réguler ces paramètres en fonction des besoins spécifiques de chaque salle d'opération.

- ✓ **Surveillance continue et réactivité rapide** : Grâce à la commande électronique, les systèmes de gestion des salles d'opération peuvent surveiller en continu les conditions environnementales et détecter rapidement tout écart par rapport aux paramètres prédéfinis. Cela permet une intervention rapide pour corriger les problèmes potentiels avant qu'ils ne compromettent la sécurité des patients ou le bon déroulement des interventions chirurgicales.

- ✓ **Conformité aux normes et réglementations** : Les autorités sanitaires imposent des normes strictes en matière de contrôle environnemental dans les salles d'opération pour garantir la sécurité des patients et du personnel médical. La commande électronique permet de se conformer à ces normes et de documenter les données environnementales pour les audits de conformité.

La commande électronique d'une salle blanche trouve son utilité dans une variété de domaines où la contamination peut compromettre la qualité des produits ou des processus. Dans l'industrie électronique, elle est cruciale pour la fabrication de semi-conducteurs et de composants électroniques, garantissant des performances optimales. De même, dans l'industrie pharmaceutique et des sciences de la vie, ces environnements contrôlés sont essentiels pour maintenir des normes strictes de propreté et de sécurité dans la production de médicaments et de produits biologiques. Les secteurs de l'aérospatiale, de l'alimentaire et de la recherche scientifique bénéficient également des salles blanches pour des raisons similaires, assurant la qualité, la sécurité et la précision des produits et des expériences réalisées.

Dans le contexte de la chirurgie moderne où la maîtrise des conditions environnementales revêt une importance capitale pour la sécurité et le succès des interventions, cette étude s'engage à évaluer méticuleusement l'efficacité des systèmes de commande électronique existants dans les salles d'opération, tout en explorant les voies potentielles d'amélioration afin d'optimiser ces dispositifs pour un environnement médical toujours plus sécurisé et efficace.

Notre travail s'articule autour de trois chapitres. Dans le premier chapitre, nous rappellerons les notions de base de la thermique nécessaires à la compréhension des phénomènes d'échange de chaleur. La conduction, la convection et le rayonnement sont les trois formes principales de propagation de la chaleur. Ce

INTRODUCTION

chapitre expliquera également l'installation qui assure les conditions requises dans la chambre blanche. Le diagramme de l'air sera utilisé comme guide pour mieux comprendre le fonctionnement de cette installation.

Dans le second chapitre, nous mettrons en lumière les caractéristiques des chambres blanches en général, avec un focus particulier sur la salle d'opération.

Le troisième chapitre détaillera le matériel utilisé pour garantir les conditions exigées dans l'enceinte de la salle d'opération.

Notre travail se termine par une conclusion générale.

CHAPITRE I
NOTION DE
THERMIQUE

Chapitre I

Notion de Thermique

I INTRODUCTION

La thermique est une branche de la physique qui traite des phénomènes liés aux transferts d'énergie sous forme de chaleur. Elle est fondamentale pour mieux saisir les mécanismes naturels et les processus industriels où l'échange thermique joue un rôle crucial. Que ce soit en mécanique, dans le bâtiment, en métallurgie, en climatologie etc. la thermique est souvent un élément déterminant. Les avancées dans ce domaine permettent de concevoir des systèmes toujours performants, comme par exemple en climatisation et chauffage. En somme, la thermique joue un rôle clé dans le développement durable et l'innovation technologique, en optimisant l'utilisation de l'énergie et en améliorant le confort et la sécurité de notre environnement.

II DEFINITIONS DE BASE

Le transfert de chaleur se fait naturellement entre deux milieux à des températures différentes, de la plus haute à la plus basse, au moyen de trois mécanismes que l'on désigne par conduction, convection et rayonnement thermiques. Chaque mode de transfert possède ses propres lois et applications.

II.1 Conduction

La chaleur se transmet par Contact entre les molécules mais sans déplacement de matière. La Conduction concerne surtout les corps solides. Il est intéressant de connaître la conduction en régime permanent dans les parois planes, car c'est un cas fréquemment rencontré en climatisation. Soit T_{S_1} et T_{S_2} les températures des deux faces murales (s'il s'agit d'un mur). Le flux de chaleur qui traverse pendant l'unité de temps heure), une sections S est donné par la relation suivante :

$$Q = \frac{K*S*(T_{S_1}-T_{S_2})}{E} \quad (1)$$

Q est exprimée en $Kcal/h$

K : la conductibilité thermique du mur en $kcal / hm^{\circ}C$

E : épaisseur du mur en m .

II.2 Convection

La transmission de chaleur par convection s'opérant par déplacement du fluide, son étude est doublement difficile parce qu'elle comporte l'examen :

- Du déplacement du fluide,
- De L'échange calorifique.

Le phénomène de convection apparait notamment lorsque l'écoulement de l'air est turbulent. Les filets fluides ne conservent pas leur individualité dans ce cas ; il y a brassage de la matière.

Supposons deux éléments de fluide en contact (ou un élément en contact avec la paroi). Le flux de chaleur qui, par unité de temps, traverse une surface de contact S est proportionnel à la différence de température entre les deux éléments :

$$Q = h * S * (T_a - T_b) \quad (2)$$

Q est exprimée en $Kcal/h$

h : coefficient d'échange superficielle par convection $kcal / hm^2 \text{ } ^\circ C$

II.3 Rayonnement

Le rayonnement thermique est généralement considéré comme une émission désordonnée de photons entre les longueurs d'ondes 10^{-7} à 10^{-4} mètres.

Le rayonnement thermique est émis continuellement par tous les corps et autres milieux, excité thermiquement ou autrement. L'augmentation de la température d'un milieu indique que celui – ci reçoit plus de chaleur qu'il n'en perd, et vice versa.

La quantité de chaleur transmise par rayonnement par exemple entre deux plaques parallèles de température respectives T_1 et T_2 telles que $T_1 > T_2$ est régi par la formule suivante :

$$Q_{1,2} = S_1 * f_{1/2} * H_r * (T_1 - T_2) \quad (3)$$

Q est exprimée en $Kcal/h$

S_1 : surface de la plaque N ° 1 (m^2)

$f_{1/2}$: facteur de vue de la surface 2 par rapport à 1

H_r : coefficient de rayonnement ($kcal / hm^2 \text{ } ^\circ C$).

II.4 EQUATION FONDAMENTALE DE LA TRANSMISSION DE CHALEUR

Le flux de chaleur transmis en régime permanent par unité de temps entre deux surfaces isothermes du fait de la différence de température est donné par :

$$Q = K * S * \Delta T \quad (4)$$

Q est exprimée en $Kcal/h$

S : surface d'échange de chaleur en (m^2).

ΔT : différence de température entre les deux isothermes

K : coefficient de transmission global en ($kcal / hm^2 \text{ } ^\circ C$).

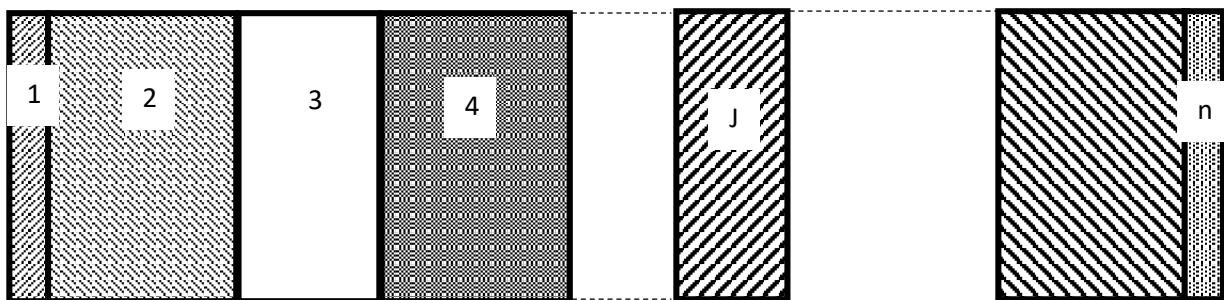


Fig. 1 Différentes couches d'un mur

Pour un mur (d'un local) constitué de plusieurs couches d'épaisseurs (C_1, C_2, \dots, C_n), Fig.7, soumis de part et d'autre à ses extrémités au phénomène d'échange de chaleur avec l'air ambiant (extérieur et intérieur) par la convection, K sera déduit à partir de la formule suivante (1):

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{h_i} + \sum_{K=1}^n \frac{E_K}{\lambda_K} + \frac{1}{h_e}$$

Si la $j^{\text{ème}}$ couche est une lame d'air, le coefficient de résistance global dans ce cas sera (2) :

$$\frac{1}{K'} = \left(\frac{1}{K} \right)_{k \neq j} + R_{air}$$

λ_K : coefficient de la conductibilité thermique de la K ième couche.

h_i : coefficient de transmission superficielle à l'intérieur du local.

h_e : coefficient de transmission superficielle à l'extérieur du local.

R_{air} : Résistance calorifique qui dépend de l'épaisseur de la lame d'air. Pour une épaisseur de 50mm (genres de lames d'air existantes dans notes cas), R_{air} sera égal à $0,21 \text{ m}^2 \text{ h}^\circ\text{c} / \text{kcal}$.

Ces relations thermiques sont fort intéressantes dans la mesure où elles permettent d'évaluer l'échange de chaleur entre l'intérieur de la chambre blanche et le milieu extérieur. Celui-ci dépend en grande partie de la maçonnerie des murs, des planchers, des ouvrants, des lampes, des occupants, etc. Un grand soin doit par conséquent être accordé à ces éléments. Les murs sont souvent constitués de plusieurs couches d'épaisseurs différentes pour réduire autant que

possible le flux thermique qui les traverse. Ces couches incluent des briques creuses, des enduits de plâtre et des lames d'air. La présence de la lame d'air est doublement intéressante dans la mesure où elle participe à la réduction de la chaleur qui la traverse, tout en constituant un bon isolant phonique.

Le dimensionnement des éléments de l'installation de traitement d'air avant son introduction dans la chambre blanche dépend du choix de plusieurs paramètres. En d'autres termes, pour amorcer le processus de calcul, il est nécessaire de définir les données de départ. Ces paramètres ne sont pas choisis au hasard, mais reflètent les conditions initiales requises pour une installation fonctionnant de manière optimale. Ainsi, l'installation doit fonctionner avec un rendement maximal pour ces valeurs. Pour qu'elle maintienne une bonne efficacité malgré des variations intermédiaires des paramètres extérieurs, il est crucial de situer ces paramètres de départ au centre de la plage des variations des conditions externes. En effet, plus les paramètres extérieurs s'éloignent de ceux pour lesquels l'installation est dimensionnée, plus son rendement diminue. En général, pour le refroidissement, on choisit la température et le degré hygrométrique moyens en été, et pour le chauffage, les mêmes moyennes mais en hiver.

III DONNEES DE BASE

III.1 Situation géographique

L'hôpital se situe à proximité de la ville d'Azazga, à 35 km de Tizi-Ouzou.

- Altitude : 450 m

- Latitude : 36 ' 40 ' nord.
- Site : exceptionnellement d'écument.

III.2 Conditions extérieures

Les conditions climatologiques servant de base au calcul sont :

Eté :

- Température de base $T_e = 35 \text{ ° C}$
- Humidité relative $Y_e = 47\%$

Hiver :

- Température de base $T_e = 0 \text{ ° C}$
- Humidité relative $Y_e = 90\%$

III.3 Conditions intérieures

Les conditions intérieures doivent être choisies de façon à satisfaire le bien être thermique des occupants. En France la **norme NF S90-351** fixe ces conditions comme suite :

- **Température** : La température ambiante dans une salle d'opération doit être comprise entre **19°C et 26°C**.
- **Humidité** : Le taux d'humidité relative doit se situer entre **45% et 65%**.
- **Renouvellement d'air**: Un renouvellement d'air minimum de 20 volumes par heure (v/h) est requis.

- **Flux d'air** : Le flux d'air doit être unidirectionnel et laminaire, c'est-à-dire qu'il doit provenir d'une source unique et circuler en parallèle au sol sans turbulence.
- **Filtres à air** : Des filtres à air haute efficacité (HEPA) doivent être utilisés pour éliminer les particules en suspension dans l'air.
- **Surpression** : La salle d'opération doit être maintenue en légère surpression par rapport aux zones adjacentes afin d'éviter l'infiltration d'air contaminé.
- **Contrôle du bruit** : Le niveau sonore ambiant doit être inférieur à 45 dB.
- **Éclairage** : L'éclairage doit être homogène et suffisant pour permettre une bonne visibilité du champ opératoire.
- **Ergonomie** : Le mobilier et les équipements doivent être ergonomiques pour réduire la fatigue du personnel.

Les valeurs des températures et humidités relatives retenues dans notre cas sont les suivantes :

Eté :

- Température de base $T_F = (25)^{\overline{+1}} \text{ } ^\circ\text{C}$
- Humidité relative $Y_F = (55 - 60) \%$

Hiver :

- Température de base $T_F = (25)^{\overline{+1}} \text{ } ^\circ\text{C}$

- Humidité relative $Y_F = (55 - 60) \%$

Les chambres blanches d'opération situées à l'entre - sol et au deuxième étage sont maintenues à des températures comprises entre $15^{\circ}C$ et $17^{\circ}C$, respectivement en hiver et en été. L'écart de température entre la salle d'opération et ses accès ne doit pas être trop important pour éviter un inconfort thermique chez les occupants. En effet, des variations de température importantes et rapides peuvent causer de la gêne, des étourdissements ou des risques de confusion, particulièrement pour les personnes sensibles.

A partir de ces données, les bilans thermiques hivernal et estival peuvent être établis. Ils sont fondés sur l'évaluation des différents apports ou pertes thermiques à travers l'enveloppe de la chambre d'opération. On parle d'apport en hiver et de perte en été. A ces apports ou pertes s'ajoute également le flux thermique induit par les fuites d'air, résultant de la différence de pression entre l'enceinte de la chambre blanche et l'extérieur. La surpression à laquelle est soumise cette salle empêche toute infiltration d'air externe, c'est pourquoi on parle uniquement de perte par fuite en été.

Un autre paramètre, et non des moindres, joue un rôle important dans le dimensionnement et le choix des éléments de l'installation de traitement d'air : il s'agit du débit de soufflage. Celui-ci est élaboré sur la base de la relation suivante :

$$L_s = \frac{Q_F}{(h_i - h_s)} = \frac{M}{(X_i - X_s)} \quad \text{en kg/h} \quad (6)$$

h_i : Enthalpie de l'air intérieur ($kcal/h$)

h_s : Enthalpie de l'air soufflé ($kcal/h$)

X_i : Teneur en eau de l'air intérieur $\frac{kg\ d'eau}{kg\ d'airsec}$

X_s : Teneur en eau de l'air soufflé $\frac{kg\ d'eau}{kg\ d'airsec}$

Q_F, M : respectivement la quantité de chaleur ($kcal/h$) et la quantité d'eau (kg/h) qu'il faut éliminer de ce local.

Le débit possède aussi une importance capitale dans le tracé et le calcul du réseau de gaines devant alimenter la chambre d'opération, qui doit être aussi régulier que possible avec un minimum de singularité pour réduire les pertes de charge.

Une fois tous ces paramètres définis, il est possible de sélectionner les éléments de l'installation capables de garantir les conditions requises dans la chambre d'opération. Il va sans dire qu'avec les paramètres extérieurs de référence, l'installation fonctionnera à son rendement maximal. Toutefois, les conditions atmosphériques évoluant constamment, il est nécessaire d'intégrer un système sophistiqué de capteurs et de régulateurs pour maintenir les conditions d'air souhaitées. Cette partie, essentielle à notre étude, sera détaillée dans le chapitre suivant.

IV DIAGRAMME DE L'AIR

Le diagramme de l'air, connu sous l'appellation de diagramme psychrométrique, est élaboré en grande partie par expérience. Il a été développé en compilant des données expérimentales et en les organisant de façon à représenter les propriétés thermodynamiques de l'air. Sur la Fig.2 l'axe horizontale représente la variation de température du fluide en degré Celsius, l'axe verticale, présente à la fois le titre du fluide, en gramme d'eau sur kg d'air sec à gauche, et la

pression à droite, en Kilos Pascal et en millibars. Les iso enthalpies et les iso humidité (Courbes d'humidités relatives constantes) sont également indiquées sur la figure. La valeur de 100% correspond à l'état de l'air saturé.

Le diagramme de l'air est très utile. Il permet de situer le tracé entre le point extérieur et le point de soufflage, en respectant que le réchauffage se fait à pression constante et l'humidification suivant les isenthalpies. Pendant l'hiver, l'air doit subir un réchauffement em, ensuite une humidification suivant l'isenthalpie $h = 11.75 \frac{kcal}{kg}, mc$, suivi d'un autre réchauffage pour atteindre le point de soufflage s. En période estivale, le fluide subit d'abord un refroidissement qui ramènera les paramètres du fluide de l'état e à l'état b. lorsque le système ne déshumidifie par l'air, c'est-à-dire qu'il ne condense pas de vapeur d'eau, l'air suit une ligne horizontale sur le diagramme psychrométrique. Cela signifie que la teneur en humidité de l'air reste constante, mais sa température sèche diminue. Ce type de processus se produit à pression constante. En revanche, Si l'évaporateur est suffisamment froid pour provoquer la condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air, l'air suit une courbe descendante vers la gauche sur le diagramme psychrométrique. Dans ce cas, la teneur en humidité de l'air diminue, et l'air se refroidit tout en perdant de la vapeur d'eau, ce qui est notre cas.

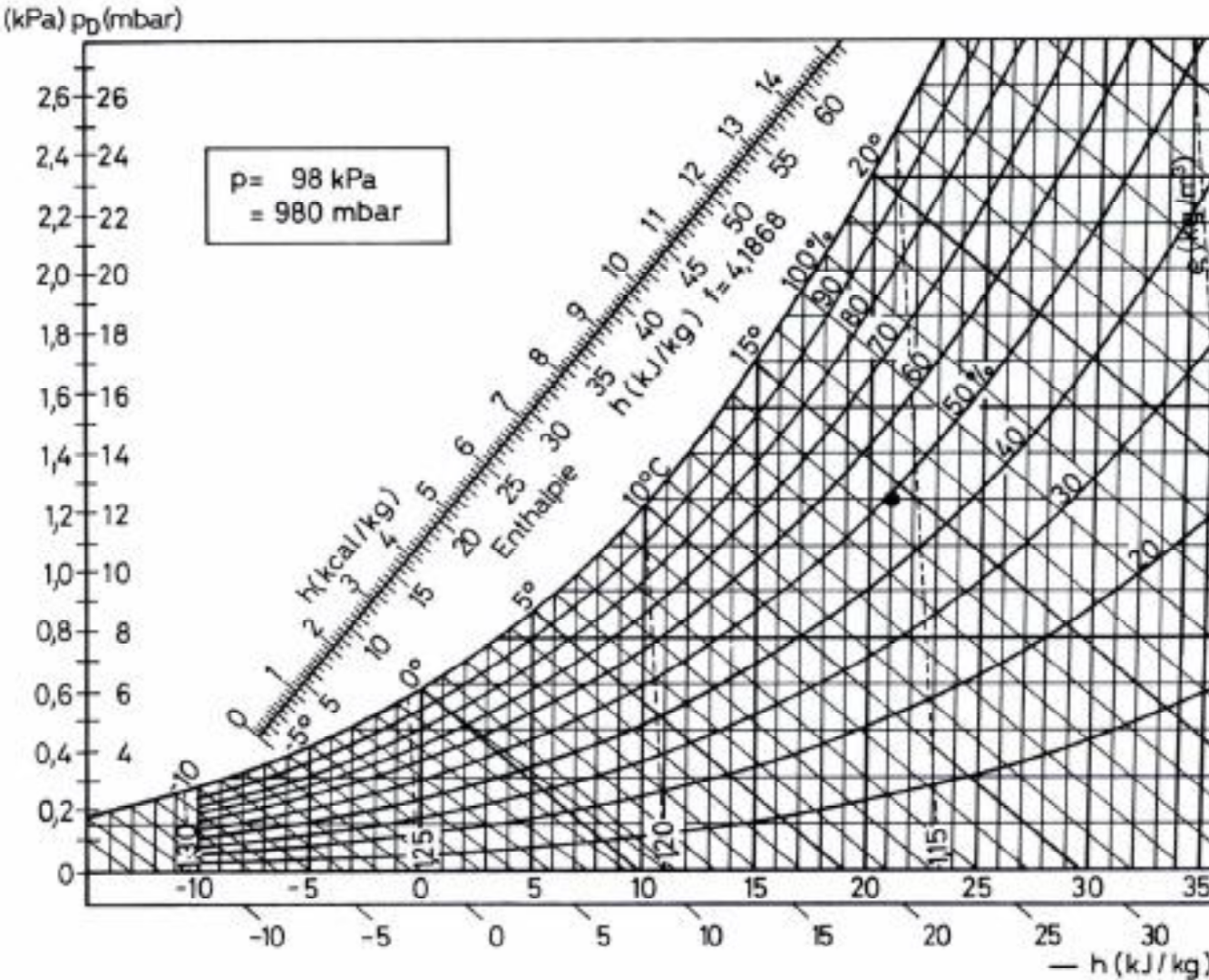
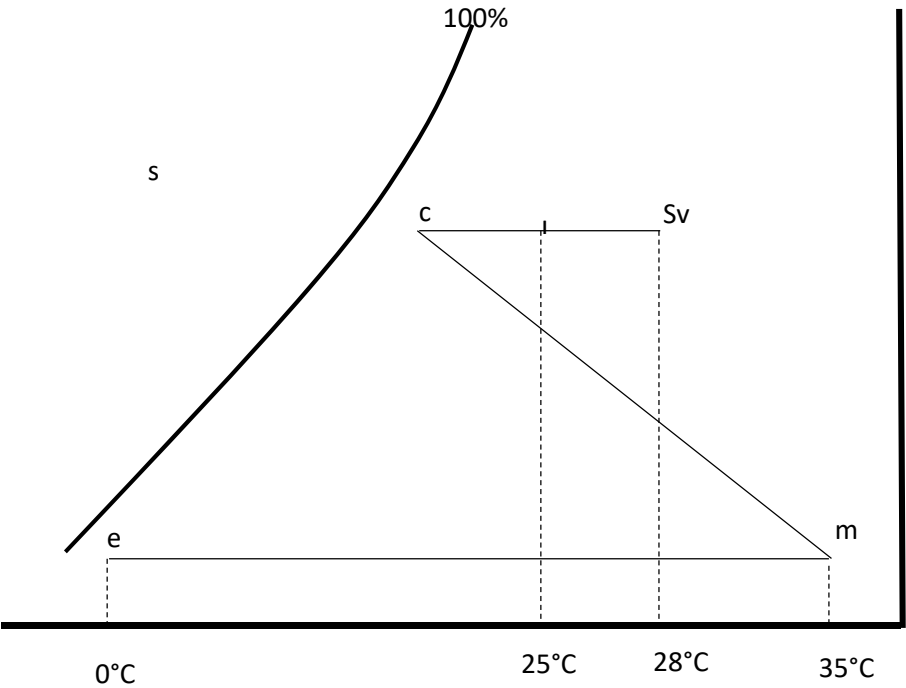
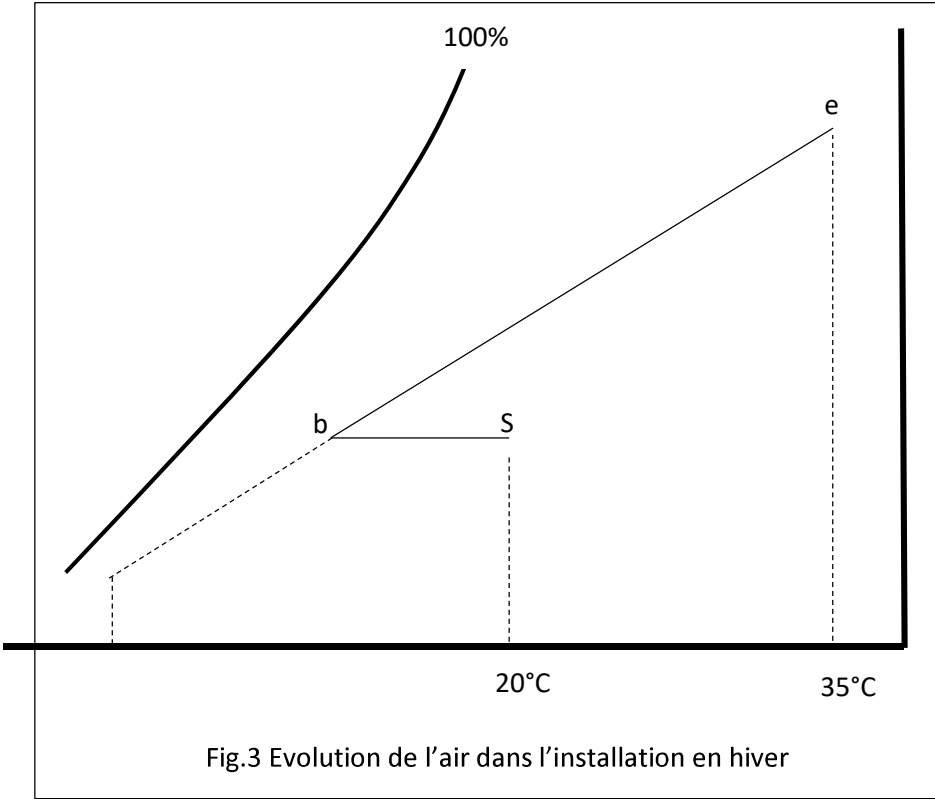
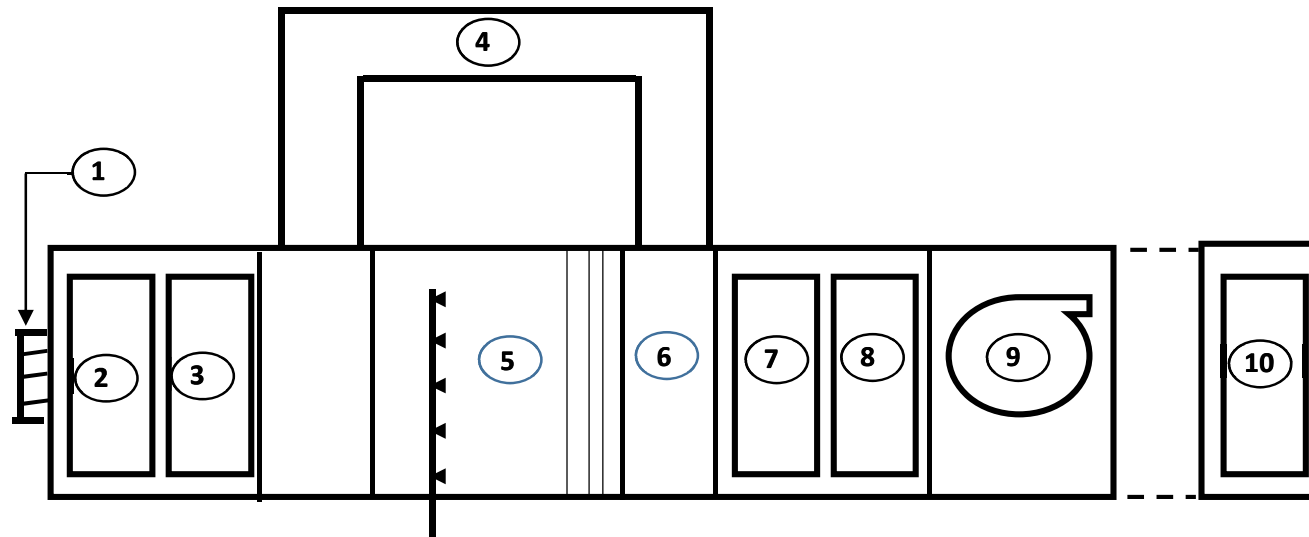


Fig. 2 Diagramme de l'air



I Installation



- | | |
|--|--|
| 1. Entrée de l'air extérieur. | 6. Chambre de mélange. |
| 2. Préfiltre, dont l'efficacité est 95%. | 7. Batterie de refroidissement. |
| 3. Préchauffeur. | 8. Réchauffeur. |
| 4. Chambre de mélange avec volets de réglages. | 9. Ventilateur de soufflage. |
| 5. Chambre de pulvérisation. | 10. Filtre à papier, 99% d'efficacité. |
| | 11. Lampes germicides. |

Fig.5 Installation de traitement d'air

CHAPITRE 1 : NOTION DE THERMIQUE

Le schéma de la Fig.5 illustre l'installation conçue pour créer les conditions requises dans la salle d'opération. Cet agencement comprend plusieurs composants clés qui, en collaboration avec un système de régulation, garantissent un environnement contrôlé en termes de température, d'humidité et de qualité de l'air.

➤ Description des composants Filtration de l'air

- Grille de filtration initiale : L'air aspiré de l'atmosphère passe d'abord à travers une grille pour éliminer les impuretés solides les plus grosses.
- Filtre HEPA : Un deuxième filtre, de type HEPA (Haute Efficacité pour les Particules Aériennes), nettoie davantage l'air en éliminant 99,97 % des particules fines, y compris la poussière, le pollen, les moisissures et les bactéries.

➤ Conditionnement de l'air

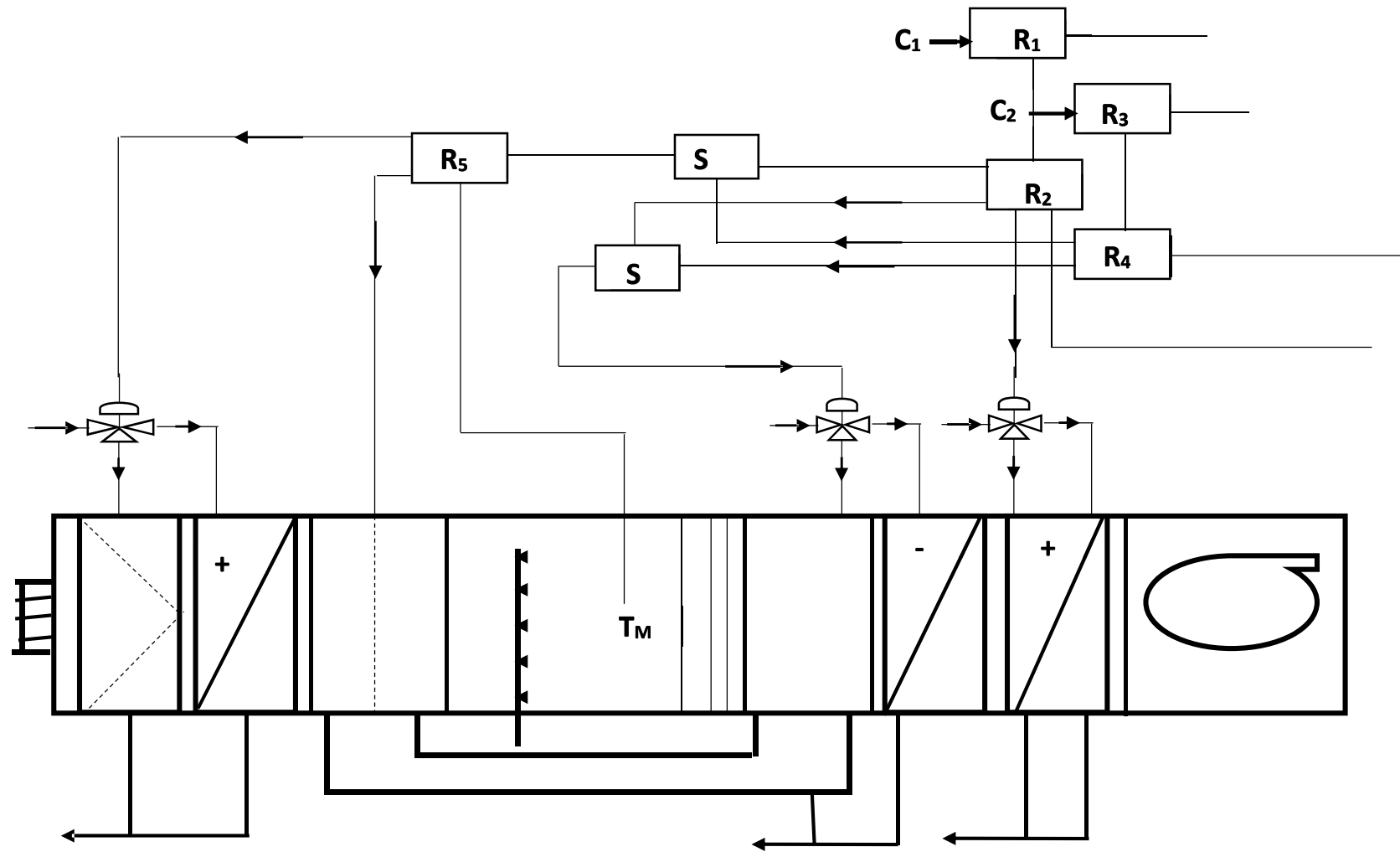
Le conditionnement de l'air est un processus intégré qui implique plusieurs étapes cruciales pour maintenir les conditions requises dans la salle d'opération :

- Préchauffeur : L'air filtré est dirigé vers un préchauffeur qui ajuste sa température à pression constante pour préparer l'étape suivante de conditionnement.
- Humidificateur : Fonctionnant à enthalpie constante, l'humidificateur ajuste l'humidité de l'air. Un circuit de dérivation permet à une partie du flux d'air de contourner l'humidificateur, optimisant ainsi le contrôle de l'humidité et l'efficacité énergétique. Mélange et régulation de la température :

- Chambre de mélange : Les flux d'air humidifié et non humidifié se rejoignent ici pour garantir un mélange homogène avant la prochaine étape de traitement.
 - Batterie de refroidissement : Active en été, cette batterie abaisse la température de l'air mélangé.
 - Réchauffeur : Situé après la batterie de refroidissement, ce composant ajuste finement la température de l'air pour atteindre les conditions précises nécessaires dans la salle d'opération.
- Distribution et stérilisation de l'air :
- Ventilateur de soufflage : Ce ventilateur propulse l'air traité à travers un dernier filtre HEPA, garantissant une qualité d'air optimale (99% d'efficacité).
 - Système de stérilisation UV : Avant d'entrer dans la salle d'opération, l'air traverse une section équipée de lampes UV germicides, éliminant les éventuels germes restants pour assurer un environnement stérile.

Bien que cette installation soit essentielle pour créer un environnement contrôlé, elle ne peut maintenir des conditions stables sans un système de régulation approprié. Les capteurs et les dispositifs de régulation sont indispensables pour surveiller en continu les paramètres environnementaux et ajuster les composants du système afin de maintenir des conditions optimales.

La fig.6 donne un schéma simplifié de cette régulation.



F : Température intérieure. F : Hygrométrie intérieure. Ts : Température de soufflage. Fs : Hygrométrie du point de soufflage. T
 Température de rosée. C₁, C₂ : Valeurs de consignes de la température et de l'hygrométrie. R : Régulateur. S

Fig. 6 Schéma de régulation

CHAPITRE II
GENERALITE SUR LA
COMMANDE DES
CHAMBRES BLANCHES
D'OPERATION

Chapitre II

GENERALITE SUR LA COMMANDE DES CHAMBRES BLANCHES D'OPERATION

I Présentation de la chambre blanche d'opération

Ce chapitre offre une présentation approfondie du fonctionnement, des caractéristiques et des applications des chambres blanches d'opération, en mettant en lumière les aspects pertinents pour la commande électronique. Pour cela, nous nous appuyerons sur une revue détaillée de la littérature disponible dans le domaine.

II Définition des chambres blanches d'opération

- **Installation contrôlée** : Une chambre blanche d'opération est une installation physique spécialement conçue pour garantir un contrôle total de l'environnement intérieur. Elle est généralement construite avec des matériaux spéciaux et des techniques d'assemblage qui minimisent la génération et la rétention de particules, ainsi que la contamination extérieure.
- **Contrôle des contaminants** : Le principal objectif d'une chambre blanche est de maintenir un niveau très bas de contamination. Cela implique le contrôle rigoureux des particules en suspension dans l'air, des bactéries, des moisissures, des virus, des substances chimiques et d'autres contaminants potentiels. Les systèmes de filtration de l'air, les procédures de nettoyage et

CHAPITRE II : Généralité sur la commande des chambres blanches d'opération

de décontamination, ainsi que les contrôles de température, d'humidité et de pression sont essentiels pour atteindre cet objectif.

- **Classification** : Les chambres blanches d'opération sont souvent classées en fonction de leur niveau de propreté, défini par le nombre maximal de particules permises par mètre cube d'air à différentes tailles de particules. Cette classification est basée sur des normes internationales telles que la norme ISO 14644.

Numéro de classification ISO	Niveau maximal de concentration (particules par m ³ d'air) pour les particules de diamètre supérieure ou égale aux chiffres ci-dessous					
	$\geq 0.1\mu\text{m}$	$\geq 0.2\mu\text{m}$	$\geq 0.3\mu\text{m}$	$\geq 0.5\mu\text{m}$	$\geq 1\mu\text{m}$	$\geq 5.0\mu\text{m}$
ISO Classe 1	10	2				
ISO Classe 2	100	24	10	4		
ISO Classe 3	1,000	237	102	35	8	
ISO Classe 4	10,000	2,370	1,020	352	83	
ISO Classe 5	100,000	23,700	10,200	3,520	832	29
ISO Classe 6	1,000,000	237,000	102,000	35,200	8,320	293
ISO Classe 7				352,000	83,200	2,930
ISO Classe 8				3,520,000	832,000	29,300
ISO Classe 9				35,200,000	8,320,000	293,000

Tableau de classification des chambres blanches d'opération

- **Applications** : Les chambres blanches sont utilisées dans une multitude de domaines où des conditions stériles sont nécessaires, notamment dans la fabrication de dispositifs médicaux, la production pharmaceutique, la microélectronique, la recherche médicale et les interventions chirurgicales.

CHAPITRE II : Généralité sur la commande des chambres blanches d'opération

Elles garantissent la sécurité, la qualité et la conformité réglementaire des produits fabriqués et des procédures médicales effectuées dans ces environnements.

- **Éléments de conception** : Les chambres blanches sont généralement conçues avec des murs, des plafonds et des planchers scellés pour empêcher la pénétration de contaminants extérieurs. Elles sont équipées de systèmes de ventilation et de filtration sophistiqués pour maintenir un flux d'air propre et contrôlé à l'intérieur de la chambre. De plus, des procédures strictes d'habillement et de décontamination sont souvent mises en place pour limiter l'introduction de contaminants par le personnel.

III Les principaux paramètres environnementaux contrôlés dans une salle blanche d'opération

Dans une salle blanche d'opération, plusieurs paramètres environnementaux sont contrôlés pour garantir des conditions optimales pour les procédés sensibles qui s'y déroulent. Voici les principaux paramètres environnementaux contrôlés et leurs exigences typiques :

1. Particules en suspension dans l'air :

Contrôle : Les salles blanches sont conçues pour minimiser la présence de particules en suspension dans l'air, car celles-ci peuvent contaminer les produits fabriqués ou les procédés sensibles. Cela est généralement réalisé en utilisant des systèmes de filtration d'air hautement efficaces pour éliminer les particules.

Les exigences en matière de concentration de particules varient en fonction de la classe de propreté de la salle blanche. Par exemple, une salle blanche de classe

CHAPITRE II : Généralité sur la commande des chambres blanches d'opération

ISO 7 peut permettre un nombre limité de particules par mètre cube d'air à différentes tailles de particules, conformément à la norme ISO 14644.

2. Température :

Contrôle : La température est maintenue à un niveau stable pour assurer des conditions de travail confortables pour le personnel et pour garantir la stabilité des procédés. Cela est généralement réalisé à l'aide de systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation (CVC) qui contrôlent précisément la température de l'air dans la salle blanche.

Les exigences de température peuvent varier en fonction des procédés et des matériaux manipulés dans la salle blanche, mais elles sont généralement maintenues dans une plage spécifique avec une tolérance minimale pour assurer la stabilité des procédés et la qualité des produits fabriqués.

3. Humidité relative :

Contrôle : L'humidité relative de l'air est contrôlée pour éviter la formation de condensation sur les surfaces et pour minimiser les risques de contamination par des micro-organismes. Cela est généralement réalisé à l'aide de systèmes de CVC qui ajustent l'humidité de l'air dans la salle blanche en fonction des exigences spécifiques.

Les exigences en matière d'humidité relative peuvent également varier en fonction des procédés et des matériaux manipulés, mais elles sont généralement maintenues dans une plage spécifique avec une tolérance minimale pour garantir des conditions optimales pour les opérations effectuées dans la salle blanche.

4. Pression :

Contrôle : La pression de la salle blanche est contrôlée par rapport aux zones environnantes pour éviter la contamination de l'extérieur ou la fuite de contaminants de l'intérieur. Cela est généralement réalisé en maintenant une pression positive, négative ou neutre par rapport aux zones adjacentes, selon les exigences spécifiques de confinement des contaminants ou de flux d'air unidirectionnel.

Les exigences en matière de pression peuvent varier en fonction des protocoles de confinement des contaminants ou des exigences de flux d'air unidirectionnel, mais elles sont généralement maintenues de manière stable pour assurer un contrôle efficace de la contamination de l'air dans la salle blanche.

5. Renouvellement d'air :

Contrôle : Le renouvellement d'air dans la salle blanche est contrôlé pour maintenir des conditions de qualité de l'air optimales. Cela est généralement réalisé en utilisant des systèmes de ventilation et de filtration d'air sophistiqués qui éliminent les contaminants de l'air et fournissent un approvisionnement en air frais conformément aux normes de propreté de l'air.

Les exigences en matière de renouvellement d'air peuvent varier en fonction des procédés et des normes de propreté de l'air applicables, mais elles sont généralement maintenues à un niveau suffisant pour garantir des conditions de qualité de l'air optimales dans la salle blanche.

6. Éclairage :

Contrôle : L'éclairage dans une salle blanche est conçu pour fournir une luminosité adéquate pour les opérations effectuées tout en minimisant la génération de chaleur. Les luminaires doivent être conçus pour être faciles à nettoyer et à désinfecter pour maintenir la propreté de l'environnement.

Les exigences en matière d'éclairage peuvent varier en fonction des besoins spécifiques des opérations effectuées dans la salle blanche, mais elles sont généralement définies pour assurer une visibilité adéquate tout en respectant les exigences de propreté de l'environnement.

IV TECHNOLOGIES DE CONTROLE ET D'AUTOMATISATION LES PLUS COURAMMENT UTILISEES DANS LES SALLES BLANCHES D'OPERATION

IV.1 Systèmes de surveillance environnementale

Capteurs de particules : Ces capteurs utilisent des techniques optiques ou de diffusion pour détecter les particules en suspension dans l'air. Ils sont souvent basés sur des principes tels que la diffusion de la lumière ou la mesure de la charge électrique des particules. Les données recueillies sont généralement transmises à un système de contrôle centralisé pour une analyse en temps réel et une action corrective si nécessaire.

Capteurs de température et d'humidité : Ces capteurs peuvent utiliser des thermistances, des thermocouples ou des capteurs capacitifs pour mesurer la température et l'humidité relative de l'air. Les données sont utilisées pour ajuster les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation afin de maintenir des conditions environnementales stables et confortables.

Systèmes de surveillance microbiologique : Ces systèmes utilisent des méthodes telles que la filtration de l'air et les échantillonnages de surface pour détecter la présence de micro-organismes dans la salle blanche. Les échantillons prélevés sont ensuite analysés en laboratoire pour identifier les contaminants microbiologiques et prendre des mesures correctives si nécessaire.

IV.2 Systèmes de ventilation et de filtration d'air

Filtres HEPA/ULPA : Ces filtres sont composés de fibres de verre disposées de manière à piéger les particules en suspension dans l'air. Ils sont capables d'éliminer efficacement les particules de taille microscopique, y compris les bactéries et les virus. Les filtres HEPA sont efficaces à 99,97 % pour les particules de 0,3 micron et plus grandes, tandis que les filtres ULPA offrent une efficacité encore plus élevée pour les particules de taille submicronique.

Systèmes de ventilation à flux laminaire : Ces systèmes utilisent des ventilateurs à haute efficacité pour créer un flux d'air unidirectionnel qui élimine les particules en suspension dans l'air et minimise la contamination croisée entre les zones de travail. Le flux d'air est généralement dirigé du plafond vers le sol pour maintenir des conditions propres dans la zone de travail.

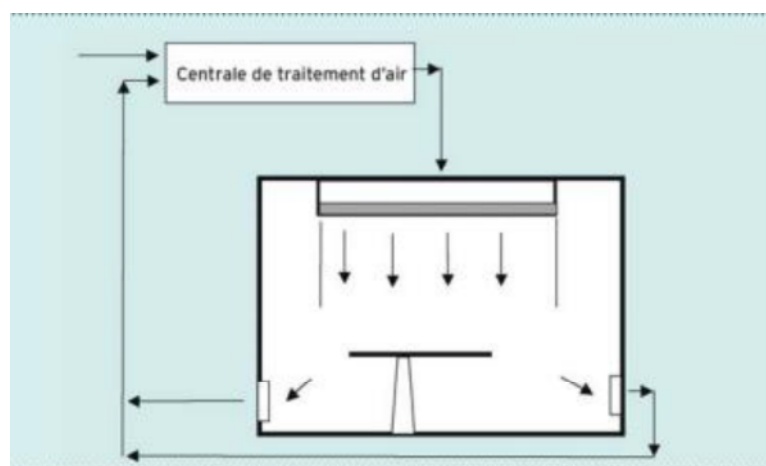


Fig.7 : Flux unidirectionnel (Laminaire)

IV.3 Systèmes de contrôle du flux d'air

Dampers et vannes de régulation : Ces dispositifs contrôlent le débit d'air et la direction du flux d'air dans la salle blanche en ajustant l'ouverture des conduits et des grilles de ventilation. Ils sont contrôlés par des actionneurs pneumatiques, électriques ou motorisés en réponse aux signaux des capteurs de pression et de débit d'air.

Systèmes de contrôle de la pression : Ces systèmes surveillent en continu la pression différentielle entre la salle blanche et les zones environnantes à l'aide de capteurs de pression différentielle. Ils ajustent automatiquement les débits d'air des systèmes de ventilation pour maintenir une pression stable et contrôlée, minimisant ainsi les risques de contamination de l'air.

IV.4 Systèmes de contrôle et d'automatisation

Systèmes de gestion du bâtiment (BMS) : Ces systèmes centralisés surveillent et contrôlent les équipements et les systèmes de la salle blanche, y compris la ventilation, le chauffage, la climatisation, l'éclairage et les systèmes de sécurité. Ils utilisent des capteurs, des actionneurs et des algorithmes de contrôle pour optimiser les performances et assurer un fonctionnement efficace de la salle blanche.

Automates programmables (PLC) : Ces dispositifs sont utilisés pour automatiser les opérations et les processus dans la salle blanche, tels que le contrôle des équipements, la régulation des paramètres environnementaux et la gestion des alarmes. Ils sont programmés pour surveiller en continu les conditions de la salle

blanche et prendre des mesures correctives en cas de déviations par rapport aux valeurs prédéfinies.

V CAPTEURS

V.1 Introduction

Dans de nombreux domaines (industrie, recherche scientifique, services, loisirs...), on a besoin de contrôler des paramètres physiques (température, force, position, vitesse, luminosité...). Le capteur est l'élément indispensable à la détection de ces grandeurs physiques. Un capteur est un organe de prélèvement d'informations qui élabore à partir d'une grandeur physique, une autre grandeur physique de nature différente (souvent électrique). Cette grandeur représentative de la grandeur prélevée est utilisable à des fins de mesure ou de commande.

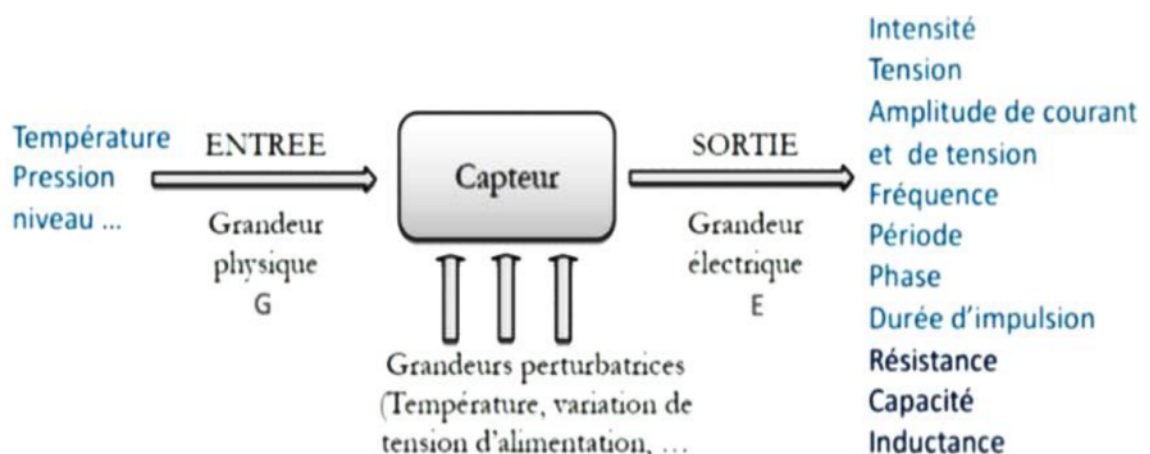


Fig. 8 : Schéma fonctionnel d'un capteur

On peut classer les capteurs en 3 groupes en fonction de la nature de l'information délivrée en sortie :

V.2 Les capteurs analogiques

Les capteurs analogiques sont des dispositifs qui convertissent une grandeur physique (comme la température, la pression, la lumière, le son, etc.) en un signal électrique continu. Ce signal est proportionnel à la valeur de la grandeur mesurée. Contrairement aux capteurs numériques, qui fournissent une sortie sous forme de valeurs discrètes, les capteurs analogiques produisent une sortie continue qui peut prendre une infinité de valeurs dans une plage donnée.

Dans la pratique industrielle, on donne à ce type de matériel le nom de capteurs. Type de signal de sortie : 0 – 10V ou 4 – 20mA (c'est juste un exemple).

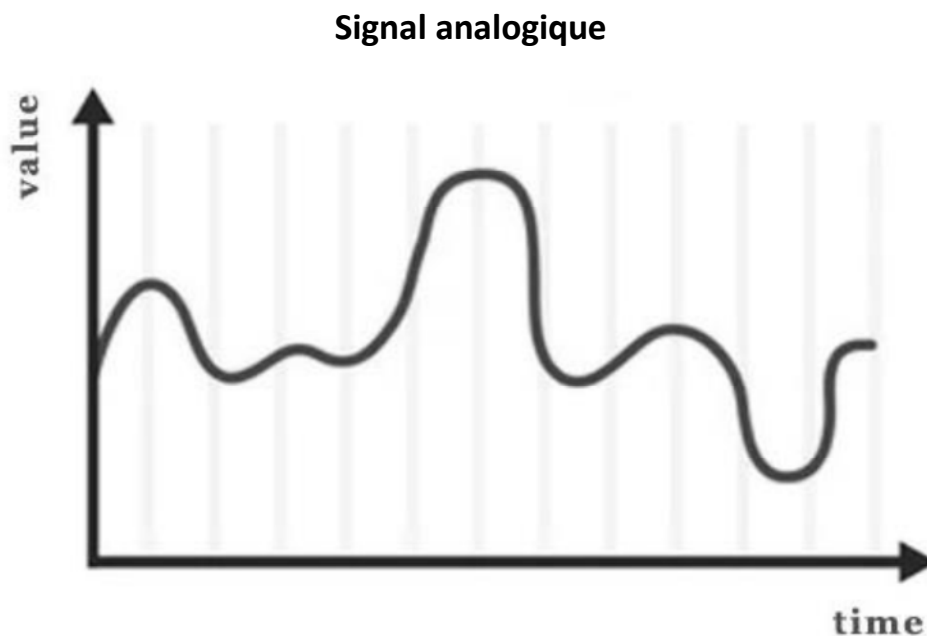
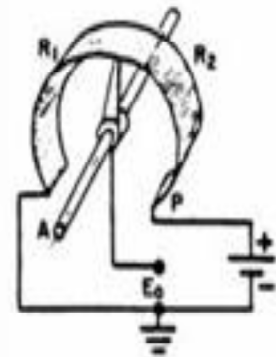


Fig.9 signal d'un capteur analogique

V.2.1 Types de capteurs analogiques

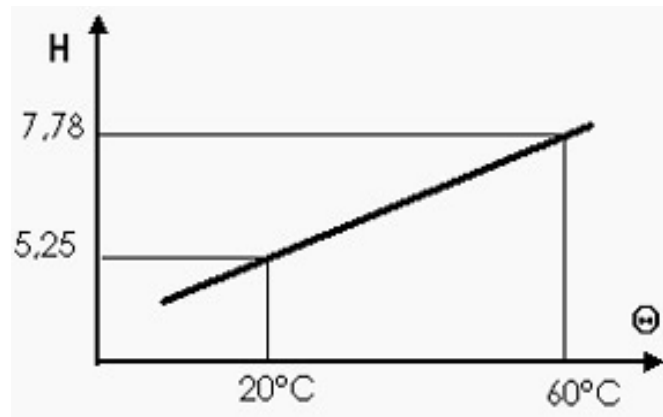
V.2.1.1 Capteurs potentiométriques

Les capteurs potentiométriques servent à détecter une position ou un déplacement rectiligne ou angulaire. La rotation de son axe est liée à la variation de la résistance comprise entre le curseur et l'une des butées par rapport à sa résistance totale : on peut transmettre à distance, un signal électrique de tension proportionnel à la position de l'axe.



Exemple :

Thermomètre A chaque variation de température entre 20°C et 40°C correspond une nouvelle information informationnelle. Ce type de capteur présente l'avantage de donner une fonction linéaire. Mais son utilisation n'est pas possible avec des systèmes numériques.



V.2.1.2 Capteur capacitif

Un capteur capacitif est un dispositif utilisé pour détecter la présence ou l'absence d'un objet ou pour mesurer des changements dans une propriété physique en utilisant le principe de la capacitance. Il fonctionne en utilisant deux électrodes, formant un condensateur. La capacité de ce condensateur change lorsqu'un objet, généralement un matériau diélectrique comme du plastique ou du verre, s'approche des électrodes. Ce changement de capacité est ensuite converti en un signal électrique.

V.2.1.2 Capteurs de température

Thermocouples : Utilisent la différence de potentiel entre deux métaux pour mesurer la température.

Thermistances : Résistances dont la valeur change avec la température.

RTD (Resistance Temperature Detectors) : Utilisent la variation de résistance d'un matériau, souvent du platine, pour mesurer la température.

V.2.1.3 Capteurs de pression :

Capteurs piézorésistifs : Utilisent la variation de résistance d'un matériau soumis à une pression.

Capteurs capacitifs : Utilisent la variation de capacité entre deux plaques en fonction de la pression appliquée.

V.2.1.4 Capteurs d'humidité

Capteurs d'humidité capacitifs : Utilisent une couche de polymère hygroscopique (qui absorbe l'humidité) entre deux électrodes. L'absorption d'eau par le polymère modifie la constante diélectrique du matériau, changeant ainsi la capacité entre les électrodes.

Capteurs d'humidité résistifs : Utilisent des matériaux dont la résistance électrique varie avec l'humidité. Un exemple typique est une couche de sel ou de polymère dont la résistance diminue à mesure que l'humidité augmente.

V.2.1.5 Capteurs de particules :

Capteurs de particules optiques : Utilisent une source de lumière (généralement un laser ou une LED) et un détecteur de lumière. Les particules passant à travers le faisceau de lumière diffusent la lumière, et cette diffusion est détectée et quantifiée pour estimer la concentration des particules.

Capteurs de particules par impaction : Collectent les particules en les faisant impacter sur une surface adhésive ou un filtre sous l'effet de la gravité ou d'une force centrifuge.

V.2.2 Fonctionnement des capteurs analogiques

Les capteurs analogiques fonctionnent généralement selon le principe de transduction, où une propriété physique est transformée en un signal électrique. Ce signal est souvent une tension ou un courant qui est proportionnel à la grandeur mesurée. Par exemple, un thermocouple génère une tension qui est proportionnelle à la différence de température entre ses deux jonctions.

V.2.3 Avantages des capteurs analogiques

Simplicité : Les capteurs analogiques sont souvent plus simples et moins coûteux que leurs homologues numériques.

Continu : Ils fournissent une sortie continue, ce qui permet une résolution théoriquement infinie dans la plage de mesure.

V.2.4 Inconvénients des capteurs analogiques

Sensibilité aux interférences : Les signaux analogiques peuvent être affectés par le bruit et les interférences électromagnétiques.

Précision et stabilité : Ils peuvent être moins précis et stables sur le long terme par rapport aux capteurs numériques.

Conversion nécessaire : Dans de nombreux systèmes modernes, les signaux analogiques doivent être convertis en numériques pour être traités par des microcontrôleurs ou des ordinateurs, nécessitant des convertisseurs analogique-numérique (ADC).

V.3 Capteurs numériques :

Les capteurs numériques convertissent les grandeurs physiques en signaux numériques (séries de bits), permettant une interface directe avec des microcontrôleurs et des systèmes informatiques. Contrairement aux capteurs analogiques qui fournissent une sortie continue, les capteurs numériques produisent des valeurs discrètes, facilitant ainsi le traitement des données, la transmission et l'intégration dans des systèmes numériques.

Souvent nommés codeurs ou compteurs. Type de signal de sortie : 0011 ou 0001

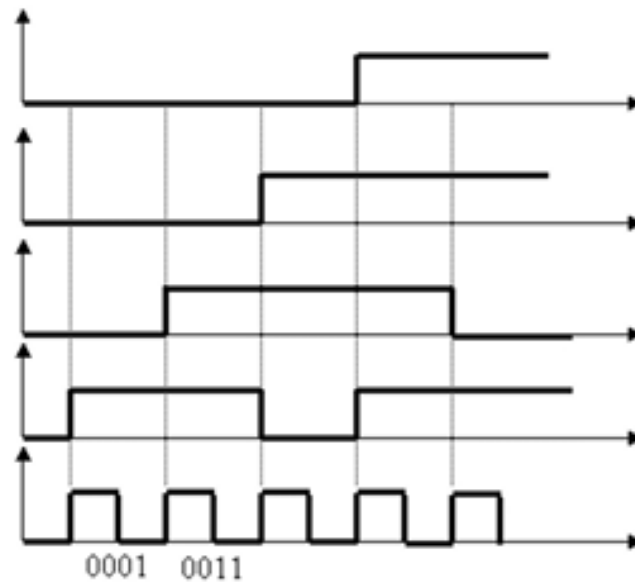


Fig.10 : Signal d'un capteur numérique

V.3.1 Types de capteurs numériques

V.3.1.1 Capteurs de température numériques

DS18B20 : Utilise le protocole 1-Wire pour communiquer avec un microcontrôleur. Offre une précision de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ dans la gamme de -10°C à $+85^{\circ}\text{C}$.

DHT22 : Mesure à la fois la température et l'humidité. Utilise un protocole propriétaire pour envoyer les données numériques.

V.3.1.2 Capteurs d'humidité numériques

SHT3x (SHT30, SHT31, SHT35) : Utilisent un capteur capacitif pour mesurer l'humidité, avec un convertisseur analogique-numérique intégré.

BME280 : Capteur environnemental qui mesure l'humidité, la pression et la température.

HIH6130 : Utilise un capteur capacitif pour mesurer l'humidité avec une conversion analogique-numérique intégrée.

V.3.1.3 Capteurs de pression numériques

BMP280 : Capteur barométrique qui mesure la pression atmosphérique et peut dériver l'altitude. Communique via I2C ou SPI.

MS5803 : Capteur de pression haute résolution utilisé souvent pour la mesure de profondeur dans l'eau.

V.3.1.4 Capteurs de particules numériques :

SDS011 : Utilise la diffusion de la lumière pour mesurer la concentration de particules PM2.5 et PM10 dans l'air. Communique via UART.

PMS5003 : Capteur de particules laser qui fournit des lectures numériques de différentes tailles de particules via UART.

V.3.2 Fonctionnement des capteurs numériques

Les capteurs numériques contiennent des circuits internes qui transforment le signal analogique en signal numérique. Ce processus inclut généralement :

Transduction : Conversion de la grandeur physique (température, pression, lumière, etc.) en un signal électrique.

Conditionnement du signal : Filtrage et amplification du signal électrique pour éliminer le bruit et adapter le signal pour une conversion optimale.

Conversion analogique-numérique (ADC) : Transformation du signal conditionné en une valeur numérique discrète.

Communication : Transmission des données numériques vers un microcontrôleur ou un autre dispositif de traitement via des protocoles comme I2C, SPI, UART, ou 1-Wire.

Microprocesseur : microprocesseur dans un capteur intelligent est de traiter et d'analyser les données collectées, de prendre des décisions en temps réel et de communiquer avec d'autres systèmes.

V.3.3 *Avantages des capteurs numériques*

Précision : Fournissent des valeurs précises et directement utilisables sans nécessiter de conversion supplémentaire.

Immunité au bruit : Les signaux numériques sont moins susceptibles aux interférences électromagnétiques par rapport aux signaux analogiques.

Facilité d'intégration : Se connectent directement aux microcontrôleurs et autres systèmes numériques via des interfaces standardisées.

Calibrage intégré : Beaucoup de capteurs numériques incluent des routines de calibrage internes pour améliorer la précision et la fiabilité.

V.3.4 *Inconvénients des capteurs numériques*

Complexité : Peuvent être plus complexes à utiliser que les capteurs analogiques simples.

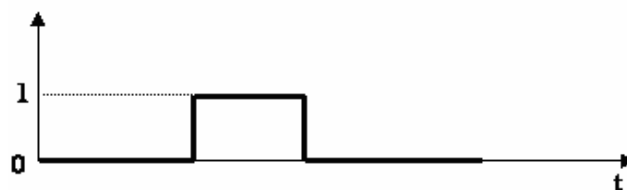
Consommation d'énergie : Certains capteurs numériques consomment plus d'énergie, ce qui peut être une contrainte dans les applications alimentées par batterie.

Coût : Généralement plus coûteux que leurs équivalents analogiques en raison des circuits supplémentaires nécessaires pour la conversion et la communication.

V.4 Capteur logique ou tout ou rien (TOR)

Les capteurs logiques, également appelés capteurs tout ou rien (TOR), sont des dispositifs qui détectent la présence ou l'absence d'un phénomène physique et produisent un signal binaire en réponse. Ce signal binaire peut être interprété comme "1" ou "0", "ON" ou "OFF", "vrai" ou "faux". Ils sont couramment utilisés dans l'automatisation industrielle, les systèmes de sécurité, et diverses applications de contrôle.

Ils portent le nom de détecteurs. Type de signal de sortie 0V ou 5V.



V.5 Les actionneurs

Les actionneurs sont des dispositifs qui convertissent une forme d'énergie en mouvement ou en action mécanique. Ils jouent un rôle crucial dans les systèmes automatisés en exécutant les commandes des systèmes de contrôle. Les actionneurs sont largement utilisés dans diverses applications industrielles,

robotiques, automobiles, aéronautiques, et domotiques. Dans les définitions de l'automatisme, l'actionneur appartient à la partie opérative.

V.5.1 Fonctionnement des Actionneurs

Le fonctionnement des actionneurs dépend de leur type d'énergie source :

Électriques

Les actionneurs électriques convertissent l'énergie électrique en mouvement par le biais de bobines électromagnétiques, de circuits électroniques, et de moteurs.

Pneumatiques :

Les actionneurs pneumatiques utilisent l'air comprimé. Un compresseur fournit l'air sous pression qui est contrôlé par des vannes pour déplacer un piston ou un rotor.

Hydrauliques

Les actionneurs hydrauliques utilisent un liquide sous pression, généralement de l'huile hydraulique. La pression est générée par une pompe et contrôlée par des vannes pour déplacer un piston ou un rotor.

Thermiques

Les actionneurs thermiques exploitent l'expansion d'un matériau en réponse à la chaleur pour générer un mouvement.

V.6 La relation capteurs et actionneurs

Dans une installation domotique, on parle d'actionneurs et de capteurs qu'interagissent. Les actionneurs sont les composantes qui reçoivent les messages (instructions) et qui, en fonction de ceux-ci, entreprennent ou non une action. Les capteurs font en sorte qu'un ou plusieurs actionneurs reçoivent l'instruction. Actionneurs et capteurs communiquent via un 'bus' : les capteurs placent l'information sur le bus et transmettent ainsi leurs instructions aux acteurs. Le principe est très simple. Un capteur transmet un signal, une alarme ou une instruction au système domotique. La programmation détermine quel acteur doit entrer en action. Le système transmet automatiquement l'instruction à l'acteur qui fait le nécessaire sur la base de celle-ci.

Capteurs	Actionneurs
Détecteurs de fumée	Extincteur à eau automatique
Capteur d'intensité lumineuse	Éclairages
Détecteurs de présence	Alarme
Capteur seuil de pression	Extracteur
Capteur de température	Compresseur
Détection de gaz	Ventilateur

CHAPITRE II : Généralité sur la commande des chambres blanches d'opération

1. Tableau d'exemple de capteur et d'actionneur

VI Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons pu définir en général certaines notions fondamentales liées à la commande d'une chambre blanche d'opération. Les chambres blanches d'opération intelligentes sont de plus en plus utilisées dans le monde entier, ce qui a révolutionné le monde de la médecine. Dans le chapitre suivant nous allons voir la conception matérielle de notre système.

CHAPITRE III
CONCEPTION
MATÉRIELLE
ET LOGICIEL

Chapitre III

Conception matérielle et logiciel

I Introduction

Une chambre blanche d'opération, ou salle blanche, est une pièce spécialement conçue pour contrôler la concentration de particules en suspension dans l'air, ainsi que d'autres paramètres environnementaux tels que la température, l'humidité et la pression. Elles jouent un rôle crucial dans la prévention des infections et des contaminations croisées, assurant ainsi des conditions stériles optimales pour des interventions chirurgicales et des procédures médicales délicates. Elles permettent de minimiser les risques de complications post-opératoires et d'assurer la sécurité des patients.

En effet, dans ce chapitre nous allons voir les différents matériaux utilisés afin d'acquérir davantage d'information sur l'environnement.

La centrale de mesure se compose d'une unité de capteur, d'une carte de traitement, d'un circuit de visualisation et d'un circuit d'actionneur. Dans cette optique nous allons réaliser un système de simulation de la surveillance intelligente permettant d'acquérir les données de l'environnement et de les transmettre vers une plateforme d'affichage.

II La conception d'une chambre blanche

Lors de la conception d'une chambre blanche, il y a plusieurs éléments clés à prendre en compte tels que :

- **Le système de filtration** : Les salles blanches doivent être équipées de systèmes de filtration de l'air pour maintenir un environnement propre et exempt de

particules. Ces systèmes comprennent généralement des filtres à air haute efficacité (HEPA) et/ou des Filtres Très Haute Efficacité qui peuvent éliminer les particules microscopique.

- **La diffusion d'air et les reprises** : l'écoulement de l'air pour maintenir un environnement propre est un point important. L'implantation des diffuseurs de soufflage et des reprises d'air doit être bien défini pour permettre d'évacuer les contaminants. Il se fera en fonction de la zone à protéger, du process et/ou des risques de contamination. Il est préférable d'avoir un écoulement du haut vers le bas sans turbulences dans une salle blanche.

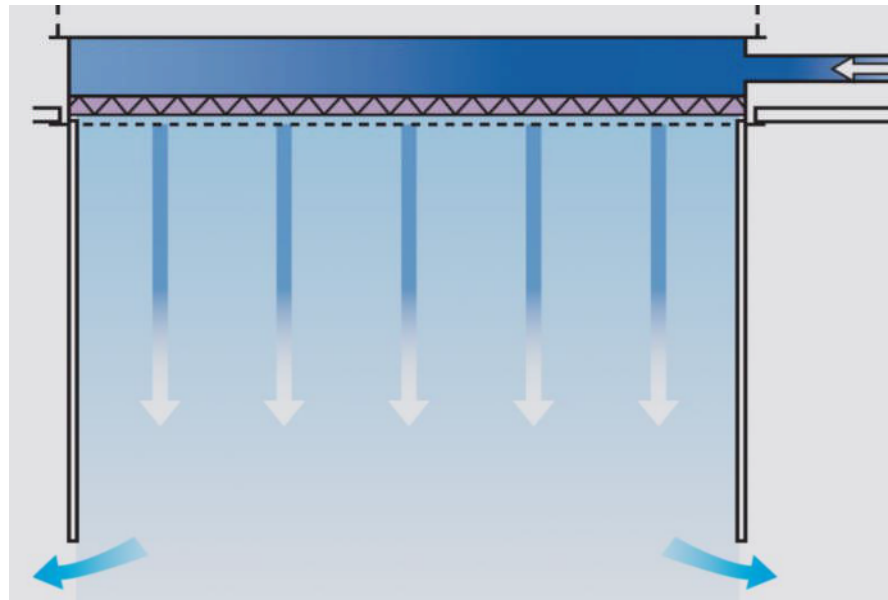


Fig.11 : système de La diffusion d'air

- **La ventilation et la CTA :** La ventilation est l'un des éléments les plus importants de la conception d'une salle blanche, car elle permet de maintenir l'environnement propre et exempt de particules. La ventilation doit être conçue pour fournir un débit d'air suffisant pour maintenir une pression positive constante dans la salle blanche. Le flux d'air doit également être régulier et uniforme, afin de minimiser la turbulence et les points morts où les particules peuvent s'accumuler. L'organe principal de filtration, de climatisation et de ventilation est la centrale de traitement d'air (CTA). Compte tenu des pertes de charges liés à l'installation et aux filtres Hépa, il est important de définir une CTA avec une pression d'air disponible. La CTA est munie d'une régulation automatique pour compenser la perte de charge liée au colmatage des filtres et pour souffler un débit constant.
- **La pressurisation de la chambre :** La pressurisation de la salle blanche est un élément clé pour minimiser l'infiltration d'air extérieur et de particules. La salle blanche doit être maintenue à une pression positive (environ 15 Pa) par rapport à l'extérieur, afin de minimiser l'infiltration d'air extérieur non filtré. Cette pression positive doit être suffisante pour maintenir une différence de pression entre la salle blanche et les zones environnantes.

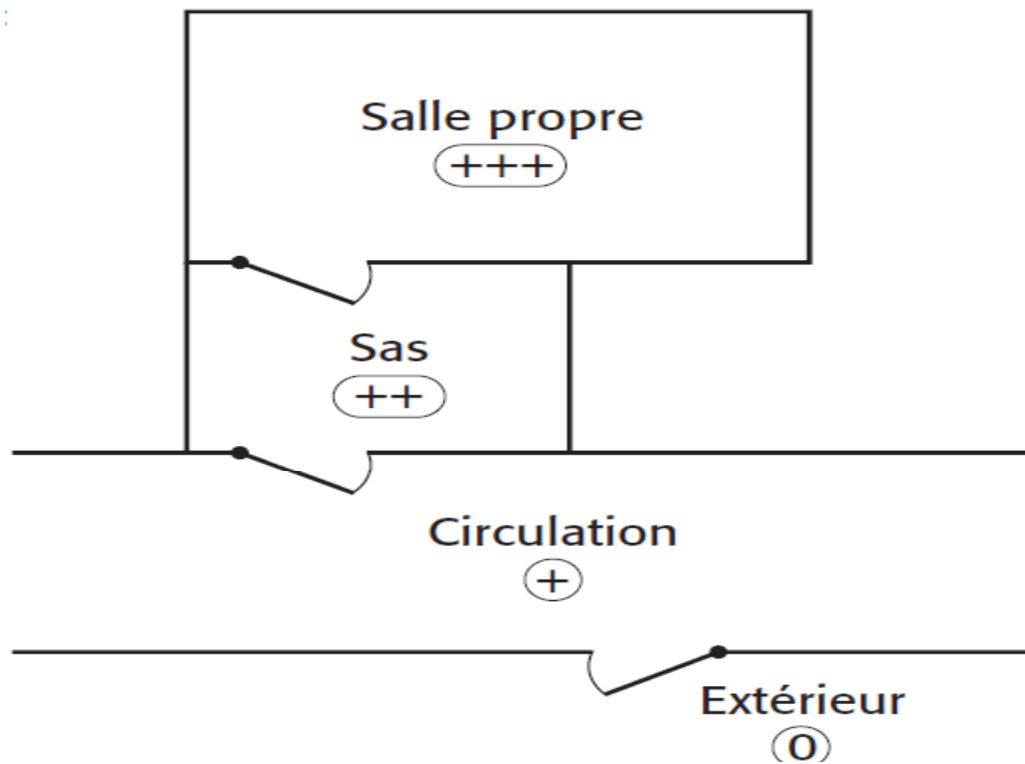


Fig.12 : Les cascades de pression

- **Les éclairages** : Les éclairages des salles blanches doivent être conçus pour minimiser la contamination de l'air et pour fournir un éclairage uniforme à travers la salle. Les éclairages doivent être installés de manière à minimiser les ombres et les reflets, et doivent être étanches et affleurant pour faciliter leur nettoyage. De plus, ils est intéressant de s'orienter sur des LED pour minimiser la consommation électrique.
- **Les revêtements de sol** : Les revêtements de sol des salles blanches doivent être conçus pour être durables, non pelucheux et faciles à nettoyer. Des matériaux comme le vinyle conducteur, les résines époxy sont souvent utilisées en raison de leur résistance aux produits chimiques et à l'usure.

- **Les matériaux de construction** : Les matériaux de construction des salles blanches doivent être non pelucheux et non émetteurs de particules, afin de minimiser la contamination de l'air. Les cloisons et les plafonds sont souvent construits en utilisant généralement des panneaux sandwich de parement en acier en métal peint ou inoxydable, et des matériaux comme le verre peuvent être utilisés pour les fenêtres.
- **La conception des portes et des vitrages** : Les portes et les vitres des salles blanches doivent être conçues pour minimiser l'infiltration d'air extérieur et de particules. Les portes des SAS doivent être interloquées pour ne pas pouvoir ouvrir les deux portes en même temps. Les SAS d'entrée et de sortie matières avec des passages fréquents doivent être équipées, si possible, de portes à fermeture automatiques, hermétiques et interloqués pour minimiser les infiltrations d'air.
- **La gestion des flux de personnel et de matériel** : La gestion des flux de personnel et de matériel est un élément important de la conception d'une salle blanche. Les salles blanches doivent être conçues pour minimiser la circulation des personnes et des équipements, afin de réduire la quantité de particules en suspension dans l'air. Les sas de décontamination, les sas de matériel et les zones de stockage doivent être conçus pour minimiser les risques de contamination croisée et pour maintenir une pression positive dans la salle blanche. Des manomètres de contrôles doivent être installés pour contrôler la pression des locaux.

III Equipements de la centrale

Pour assurer les conditions requises au niveau de l'intérieur de la salle d'opération, tout un ensemble de machines est prévu pour cela, comme indiqué par la figure 06.

L'air frais est aspiré de l'extérieur de la salle blanche d'opération par une ouverture spécifique. Cet air extérieur est essentiel pour renouveler l'air intérieur et améliorer la qualité de l'air intérieur.

Une fois entré, l'air passe à travers un préfiltre qui élimine les grosses particules comme la poussière et les débris. Avec une efficacité de 95%, ce filtre capte la majorité des particules indésirables.

L'air filtré passe ensuite par un préchauffeur. Ce dispositif élève légèrement la température de l'air, particulièrement utile en hiver pour empêcher le gel et pour préparer l'air pour les étapes suivantes.

L'air préchauffé entre dans une chambre de mélange où il est mélangé avec l'air recyclé de l'intérieur du bâtiment. Les volets de réglage permettent de contrôler les proportions d'air extérieur et d'air recyclé.

Ensuite, l'air se dirige vers une chambre de pulvérisation où de l'eau est pulvérisée pour humidifier l'air. Cette étape est importante pour contrôler l'humidité de l'air, surtout dans les environnements nécessitant des niveaux d'humidité spécifiques.

L'air humidifié entre ensuite dans une seconde chambre de mélange pour assurer une distribution uniforme de l'humidité et des propriétés de l'air avant de continuer son parcours.

Après la chambre de mélange, l'air passe à travers des batteries de refroidissement. Ces échangeurs thermiques abaissent la température de l'air,

le rendant confortable pour les occupants ou adapté aux exigences spécifiques du bâtiment.

Si nécessaire, l'air refroidi est ensuite réchauffé par des réchauffeurs pour atteindre la température souhaitée pour la distribution finale dans le bâtiment.

Finalement, l'air conditionné passe à travers les ventilateurs de soufflage qui propulsent l'air à travers le réseau de conduits pour le distribuer dans tout le bâtiment.

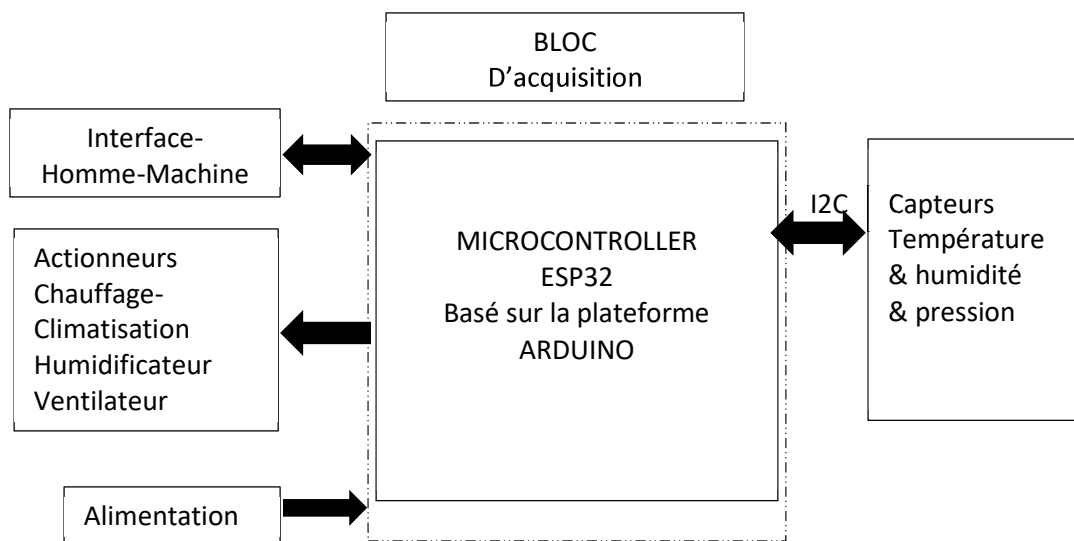


Fig.13 Schéma synoptique du système

IV Les différents composants constituant notre système

- ✓ Microcontrôleur ESP32
- ✓ Capteur BME280 (température, humidité, pression)
- ✓ Actionneurs << CTA>> (ventilateurs, chauffages, humidificateurs, etc.)
- ✓ Alimentation électrique pour ESP32 et actionneurs
- ✓ Écran LCD ou interface de communication

IV.1 Description de la carte à microcontrôleur

L'ESP32 développé par la société Espressif, est une carte de développement à faible coût dédié à l'internet des objets (IoT) et les applications embarquées. C'est un (SoC) system on a chip doté de communications sans fil Wifi et Bluetooth.



Fig.14 Carte ESP32

Les ports de la carte ESP32

Pin ou GPIO (Les ports GPIO (anglais : General Purpose Input/Output, littéralement

Entrée-sortie à usage général) sont des ports entrées-sorties très utilisés dans le monde des microcontrôleurs) On peut assigner plusieurs fonctions au même pin, grâce au circuit de multiplexage de la carte ESP32 On peut choisir le rôle un pin (UART, I2C, SPI) par programmation

La carte ESP32 est composée de :

- EN Enable : broche du régulateur 3.3 V

On peut utiliser cette broche connectée à un bouton poussoir et au GND pour redémarrer la carte ESP32.

- 15 ADC (Analog-to-Digital Converter)

convertisseur analogique-numérique)pour lire les entrées analogiques

CHAPITRE III : Conception matérielle et logiciel

- 4 interfaces SPI: SPI0 et SPI1 (réservés) , HSPI et VSPI(peuvent être utilisés).
- GPIO 34,35,36 et 39 à utiliser comme entrée seulement
- 9 capteurs tactiles capacitifs internes(TOUCH) (GPIO 2,4,15,12,13,14,27,32 et 33). Ceux-ci peuvent détecter des variations dans tout ce qui contient une charge électrique, comme la peau humaine. Ils peuvent ainsi détecter les variations induites lors du contact du GPIO avec le doigt. Ces broches peuvent remplacer les boutons mécaniques.

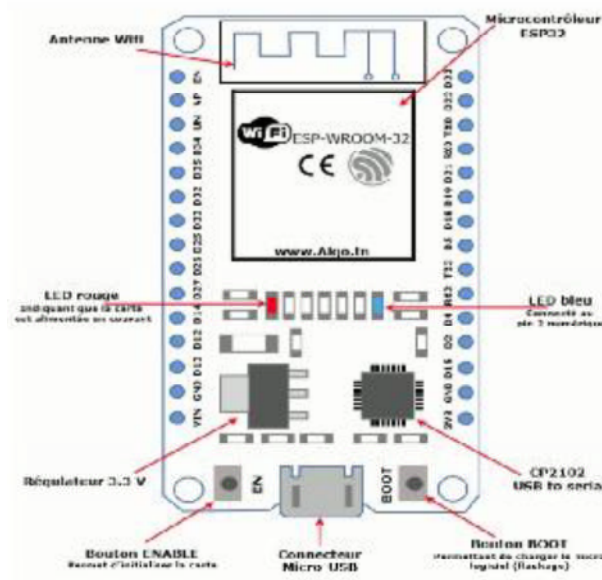


Fig.15 différentes pièces de la carte ESP32

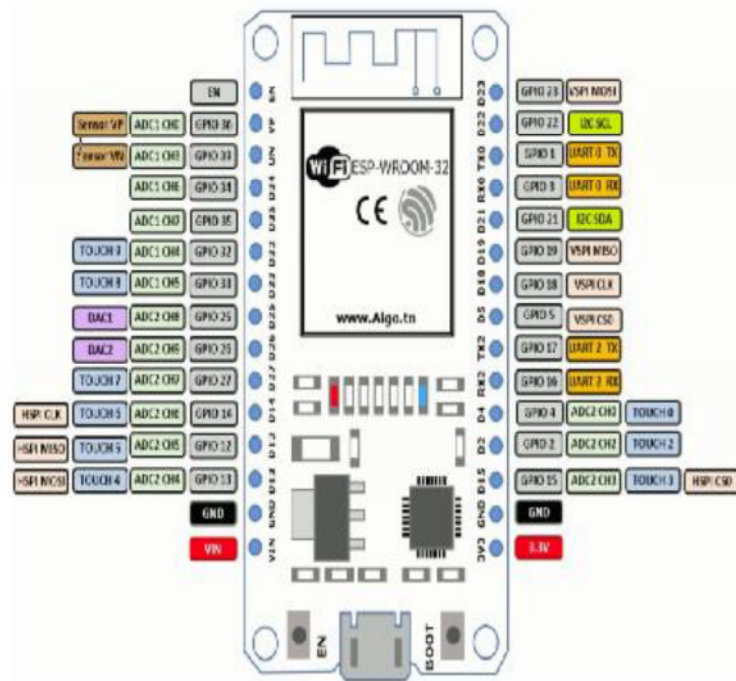


Fig.16 les ports de la carte ESP32

V Fonctionnement de la carte ESP32

V.1 Architecture et Processeur

L'ESP32 est basé sur un ou deux cœurs de processeur Tensilica Xtensa LX6, permettant une exécution efficace des tâches.

- **Processeurs** : Dual-core ou single-core Tensilica Xtensa LX6
- **Vitesse d'horloge** : Jusqu'à 240 MHz
- **Mémoire** : 520 KB SRAM, avec options pour mémoire flash externe

V.2 Connectivité

L'ESP32 offre une connectivité étendue, idéale pour les projets IoT.

- **Wi-Fi** : Compatible 802.11 b/g/n
- **Bluetooth**: Bluetooth 4.2 et BLE (Bluetooth Low Energy)

V.3 Interfaces et Périphériques

L'ESP32 dispose de multiples interfaces pour connecter divers capteurs et actionneurs.

- **GPIO** : Jusqu'à 36 broches d'entrée/sortie
- **ADC/DAC** : Convertisseurs analogique-numérique (ADC) et numérique-analogique (DAC)
- **UART, SPI, I2C, I2S, PWM** : Protocoles de communication pour interfacer avec d'autres composants

VI Configuration de l'ESP32 avec l'IDE Arduino

VI.1 Installation de l'IDE Arduino

1. **On télécharge et on installe l'IDE Arduino** depuis le site officiel : Arduino IDE.

VI.2 Configuration de l'IDE pour l'ESP32

1. **Ajoutez le gestionnaire de cartes ESP32 :**

- ✓ On ouvre l'IDE Arduino.
 - ✓ On va y aller dans Fichier > Préférences.
 - ✓ Dans le champ URL de gestionnaire de cartes supplémentaires, ajoutez cette URL :
- https://raw.githubusercontent.com/espressif/arduino-esp32/gh-pages/package_esp32_index.json.
- ✓ On Clique sur OK.

2. **Installation de la carte ESP32 :**

- ✓ On utilise Outils > Gestionnaire de cartes.
- ✓ Recherche de l'esp32 et installation esp32 by Espressif System.

VI.3 Connexion de l'ESP32

1. **Connectez votre ESP32** à votre ordinateur via un câble USB.

2. **Sélectionnez la carte et le port :**

- ✓ On utilise Outils > Type de carte et sélectionnez votre modèle d'ESP32 (par exemple, ESP32 Dev Module).
- ✓ On utilise dans Outils > Port et sélectionnez le port correspondant à votre ESP32.

VII Présentation du module de capteur BME280

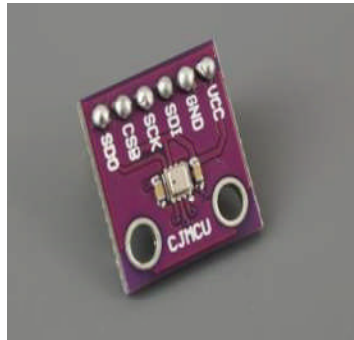
Le module capteur BME280 lit la pression barométrique, la température et l'humidité. Étant donné que la pression change avec l'altitude, on peut également estimer l'altitude. Il existe plusieurs versions de ce module. On a fait le choix du module illustré par la figure ci-dessous.



Ce capteur communique via le protocole de communication I2C, le câblage est donc très simple. On peut utiliser les broches ESP32 I2C par défaut comme indiqué dans le tableau qui suit :

BME280	ESP32
Vin	3,3 V
GND	GND
SCL	GPIO22
SDA	GPIO21

Il existe d'autres versions de ce capteur qui peuvent utiliser les protocoles de communication SPI ou I2C, comme le module présenté dans la figure suivante :



VIII Description du capteur BME280

- Spécifications du capteur de température :

Parameter	Symbol	Condition	Min	Typ	Max	Unit
Operating range	T	Operational	-40	25	85	°C
		Full accuracy	0		65	°C

- Spécification des paramètres d'humidité :

Parameter	Symbol	Condition	Min	Typ	Max	Unit
Operating range ¹	RH	For temperatures < 0 °C and > 60 °C	-40	25	85	°C
			0		100	%RH

CHAPITRE III : Conception matérielle et logiciel

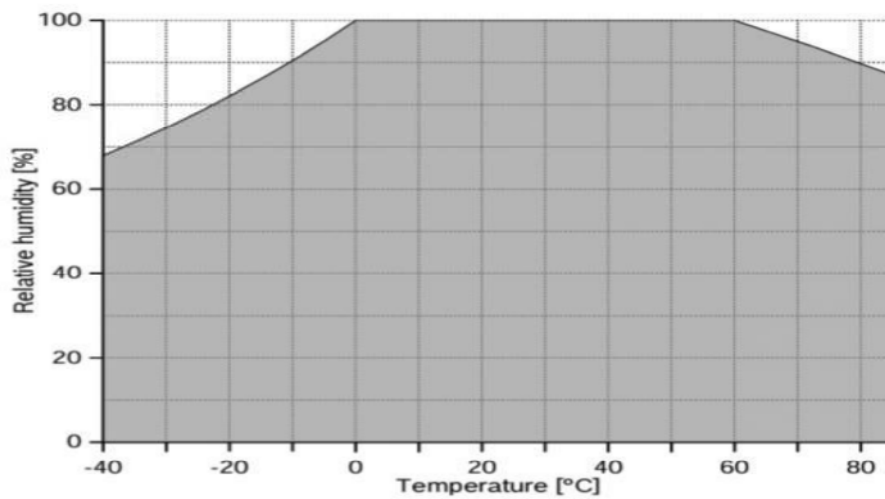
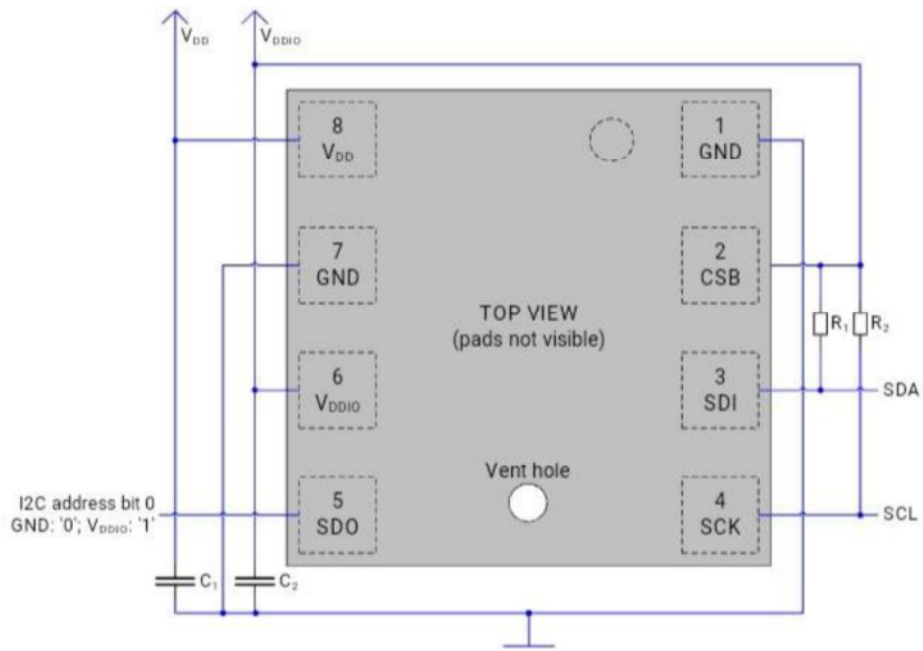


Fig.17 : plage de fonctionnement du capteur d'humidité

➤ **Spécifications du capteur de pression :**

Parameter	Symbol	Condition	Min	Typ	Max	Unit
Operating temperature range	T _A	operational	-40	25	+85	°C
		full accuracy	0		+65	
Operating pressure range	P	full accuracy	300		1100	hPa

Schéma de connexion i2C :



Remarques :

-La valeur recommandée pour C1, C2est de 100 nF.

-La valeur des résistances pull-up R1, R2 doit être basée sur la synchronisation de l'interface

IX Présentation du module de Capteur PMS5003

Le PMS5003 est un capteur optique de particules de Plantower qui mesure les concentrations de PM1.0, PM2.5, et PM10 en temps réel, utilisé couramment pour la surveillance de la qualité de l'air intérieur.

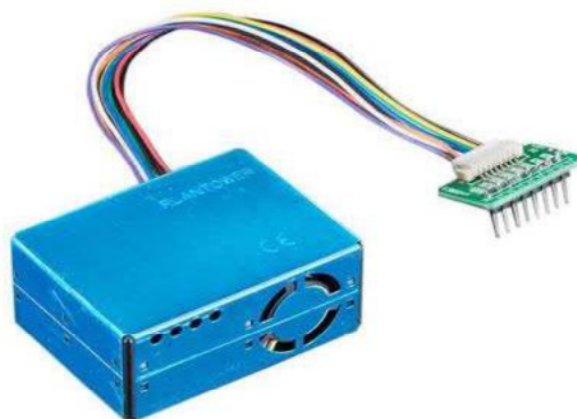


Fig. 18 Capteur PMS5003

X La Centrale de Traitement d'Air (CTA)

La Centrale de Traitement d'Air (CTA) est un système complet de gestion de la qualité de l'air dans des environnements contrôlés, tels que les salles blanches.

Elle contient plusieurs actionneurs citez en dessous :

➤ **Ventilateurs**

Les ventilateurs dans une CTA de bloc opératoire assurent la circulation et le renouvellement constant de l'air pour maintenir un environnement stérile et contrôler la température.



Fig.19 ventilateur

➤ **Filtres HEPA**

Les filtres HEPA purifient l'air en éliminant les particules et contaminants pour garantir un environnement stérile.



Fig.20 Filtre HEPA

➤ **Humidificateurs/Déshumidificateurs**

Les humidificateurs et déshumidificateurs installés dans la CTA du bloc opératoire jouent un rôle crucial en ajustant l'humidité de l'air pour maintenir des conditions optimales, essentielles à un environnement stérile et sécurisé.



Fig.21 Humidificateurs/Déshumidificateurs

➤ **Systemes de chauffage/refroidissement**

Les systemes de chauffage et de refroidissement dans une CTA de bloc operatoire maintiennent une temperature et une qualite d'air stables pour un environnement sterile et confortable.

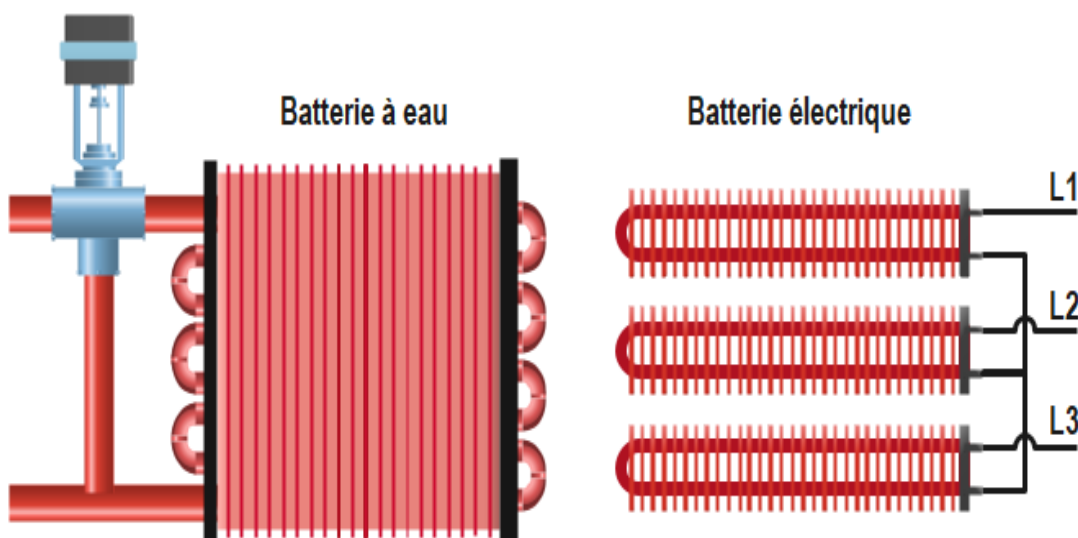


Fig.22 Batterie électrique et à eau

➤ **Interface de communication :**

Interface de communication permet de surveiller et de contrôler à distance les paramètres environnementaux de la Centrale de Traitement d'Air (CTA) via un serveur web hébergé sur l'ESP32, accessible depuis n'importe quel navigateur connecté au réseau Wi-Fi.



Fig.23 Ecran Tactile LCD

XI La régulation PID

Le terme de régulation est employé lorsqu'on cherche à combattre des perturbations afin de garder une valeur constante par exemple, une température, une pression, un débit ou une hygrométrie... La régulation mesure en permanence par les capteurs le système à régler puis transmet ces informations au régulateur celui-ci compare cette mesure à la valeur désirée (la consigne) puis suivant son algorithme le régulateur va transmettre ses ordres aux actionneurs (vannes, volets, moteurs, etc.), afin de corriger les erreurs et conduire la sortie du système vers la consigne. En industrie, les régulateurs PID répondent à plus de 90% de ces besoins.

L'idée de base d'un contrôleur PID est de lire un capteur, puis de calculer la sortie souhaitée de l'actionneur en calculant les réponses proportionnelle, intégrale et dérivée, puis en faisant la somme de ces trois composants pour calculer la sortie. Avant de définir les paramètres d'un contrôleur PID.

L'avantage d'un régulateur PID est sa performance dynamique, sa précision de réglage et sa stabilité. Les éléments de ce régulateur sont une combinaison d'actions P(Proportionnelle), I (Intégrale) et D (Dérivée) choisies en fonction du type d'application.

XI.1 Action proportionnelle(P) :

Elle permet de réduire l'erreur statique, améliorant ainsi la précision.

- Plus l'action est grande (K grand), plus l'erreur statique est réduite,
- Plus l'action est grande, plus les oscillations sont importantes durant le régime transitoire,
- Un excès d'action (k très élevé) conduit à l'instabilité du système.

XI.2 Action intégrale(I) :

Elle permet de supprimer l'erreur statique :

- Plus la constante est petite, plus l'action intégrale est forte,
- Une action excessive (trop petit ou trop grand) conduit à une instabilité du système (dû à l'augmentation du déphasage).

XI.3 Action dérivée (D) :

Plus est grand, plus l'action dérivée est forte, très forte permet de :

- Réduire le dépassement ou les oscillations obtenues en action proportionnelle seule,
- Accélérer la réponse mesurée,
- Améliorer la stabilité du système (apport d'une avance de phase).

L'action dérivée est limitée par un excès d'action qui peut conduire à l'instabilité du système

XII Principe de la régulation PID :

Afin de bien maîtriser les procédés régulés, on doit corriger leurs défauts qui se résument en trois anomalies possibles de commande et une anomalie de conception à savoir :

- ✓ Lenteur d'exécution ($\gg 0$)
- ✓ Mauvaise exactitude ($e \neq 0$)
- ✓ Instabilité
- ✓ Grand temps de retard ($\gg 0$)

Ces anomalies appelées caractéristiques apparentes du système, représentent le grand travail des régulateurs et mathématiciens. Maîtriser ces anomalies n'est pas une tâche facile, surtout lorsqu'on aura le choix entre rapidité et stabilité, et ce choix n'est pas décisif. On note qu'il y a plus qu'une méthode de détermination de ces paramètres.

XIII Les différents types d'implémentation :

Plusieurs implémentations des calculs sont possibles. On distingue les structures Série, Parallèle, et Mixte.

XIII.1 Structure PID Série :

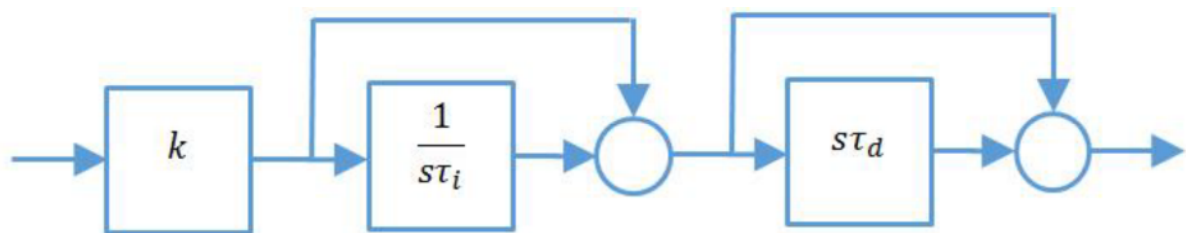


Fig.24 Structure PID Série

XIII.2 Structure PID parallèle :

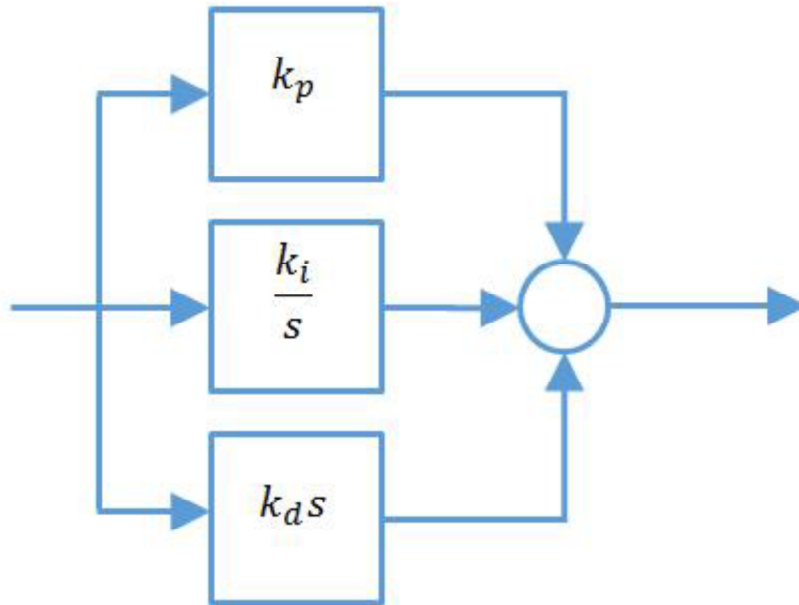


Fig.25 Structure PID parallèle

XIII.3 Structure PID Mixte :

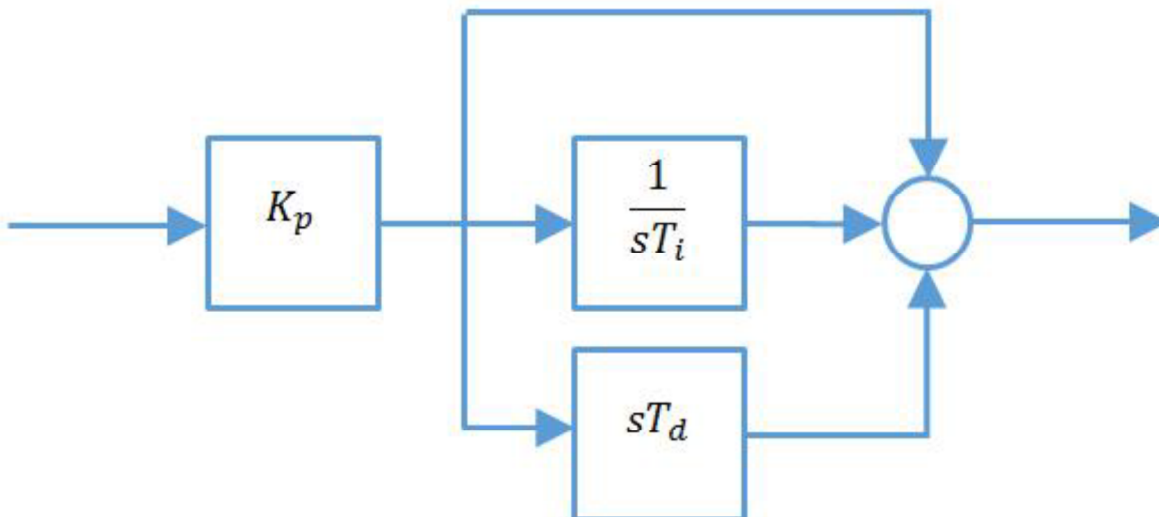


Fig.26 Structure PID Mixte

XIV Régulation des PID par rapport aux moteurs

Les termes proportionnel et intégral peuvent amener un dépassement de la consigne et des oscillations. Cela implique pour le moteur des inversions de polarité, ce qui est loin d'être idéal. Pour limiter ce phénomène indésirable, on introduit le troisième élément : le terme dérivé. Son action va dépendre du signe et de la vitesse de variation de l'erreur, et sera opposée à l'action proportionnelle. Elle devient prépondérante aux abords de la valeur demandée lorsque l'erreur devient faible, que l'action du terme proportionnel faiblit et que l'intégrale varie peu, freinant ainsi le système, limitant le dépassement et diminuant le temps de stabilisation.

XV Asservir des moteurs à courant continu avec un PID et Arduino :

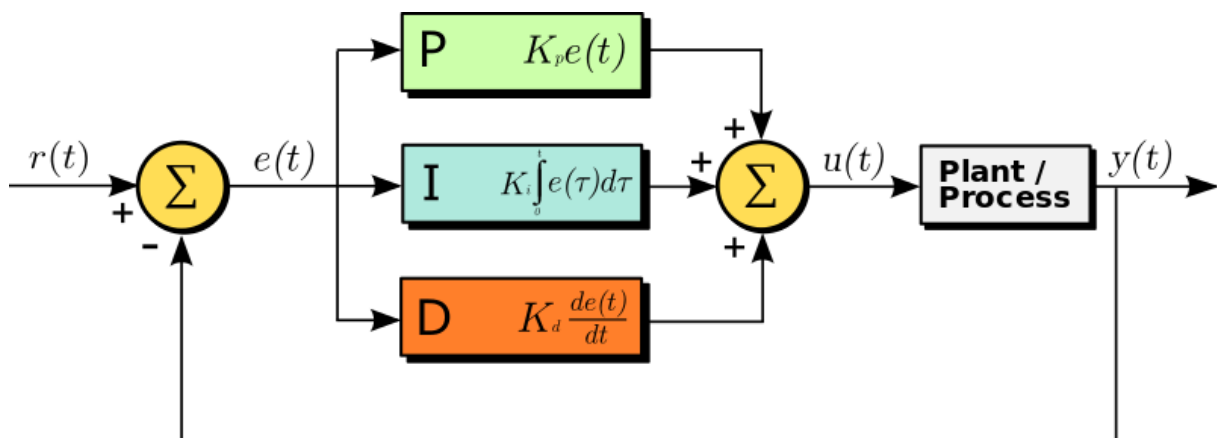


Fig.27 schéma PID

Chaque processus possède ses propres caractéristiques et ce, même si l'équipement est, à la base, le même. Le flux d'air autour des fourneaux variera, les températures ambiantes altéreront la densité et la viscosité du fluide et la pression barométrique changera d'heure en heure. Les réglages du PID (principalement le gain proportionnel appliqué au facteur de correction, ainsi que le temps utilisé pour calculer les valeurs d'intégrale et de dérivée, appelées « gain d'intégrale » et « gain de dérivée ») doivent être sélectionnés en fonction de ces différences locales.

La régulation PID sert à gérer grand nombre de processus. Les facteurs de correction sont calculés en comparant la valeur de sortie avec la valeur de consigne et en appliquant des gains qui minimisent le dépassement et l'oscillation tout en réalisant le changement le plus rapidement possible.

XVI Description de la partie logicielle

XVI.1 Arduino ide

Arduino, c'est aussi un IDE (disons plutôt un éditeur de code) qui permet d'envoyer les programmes sur la carte à travers un port USB.

XVI.2 Présentations de Arduino ide

La plate-forme Arduino :

Arduino est une plate-forme de prototypage rapide : un ensemble d'outils développés pour faciliter la conception de montages à base de microcontrôleur, sans perdre trop de temps à en apprendre les tenants et aboutissants.

XVI.3 Logiciel de commande sur pc

Le logiciel Arduino est un Environnement de Développement Intégré (IDE) qui permet :

- ✓ D'éditer un programme : des croquis (sketch en Anglais) ; les programmes sont écrits en langage C
- ✓ De compiler ce programme dans le langage << machine >> ; de l'ESP32. La compilation est une traduction du langage C vers le langage du microcontrôleur, la console donne des informations sur le déroulement de la compilation et affiche les messages d'erreur.
- ✓ De téléverser le programme dans la mémoire de l'ESP32. Le téléversement (upload) se passe via le port USB de l'ordinateur une fois dans la mémoire de l'ESP32, le logiciel s'appelle un micrologiciel.

- ✓ De communiquer avec la carte ESP32 grâce au terminal (ou moniteur série) pendant le fonctionnement du programme en mémoire sur l'ESP32, il peut communiquer avec l'ordinateur tant que la connexion est active (câble USB, ...).
- ✓ Par ailleurs, La console donne des informations sur le déroulement du téléversement et affiche les messages d'erreur.

La plate-forme Arduino comporte :

Du matériel :

Une collection de cartes à microcontrôleurs, du logiciel permettant la programmation, la communication et intégrant de nombreuses bibliothèques de fonctions, un site Internet : information, téléchargements, documentation, forums.

XVII Schéma ESP32 et PMS5003

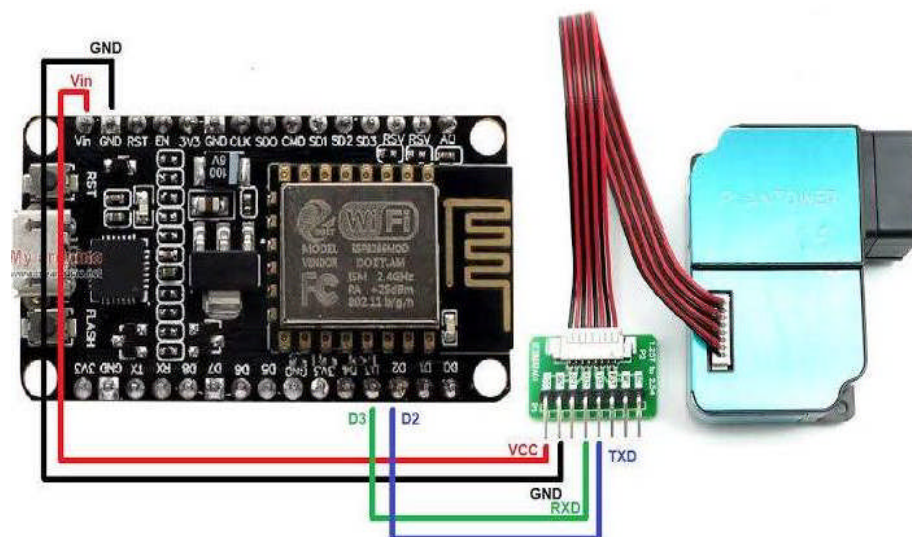


Fig.28 Schéma ESP32 et PMS5003

XVIII Schéma – ESP32 avec BME280 utilisant I2C

Nous allons utiliser la communication I2C avec le module capteur BME280. Pour cela, câblez le capteur à l'ESP32 **SDA** et **SCL** broches, comme indiqué dans le diagramme schématique suivant :

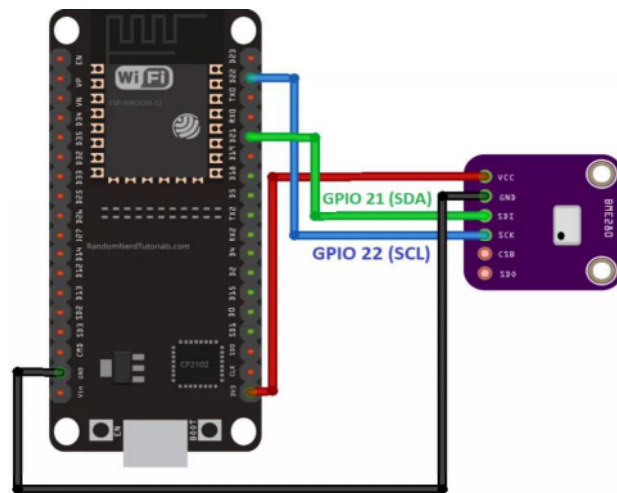


Fig.29 Schéma ESP32 avec capteur BME280

ESP32 :

- Alimentation : 3.3V
- GPIO pour interfacer le capteur BME280 et les actionneurs

BME280 :

- Alimentation : 3.3V
- Communication : I2C (SDA et SCL)

Les actionneurs

- **Chauffage** : Utiliser un relais ou un transistor pour contrôler le chauffage.
- **Humidificateur** : Similaire au chauffage, utiliser un relais ou un transistor.

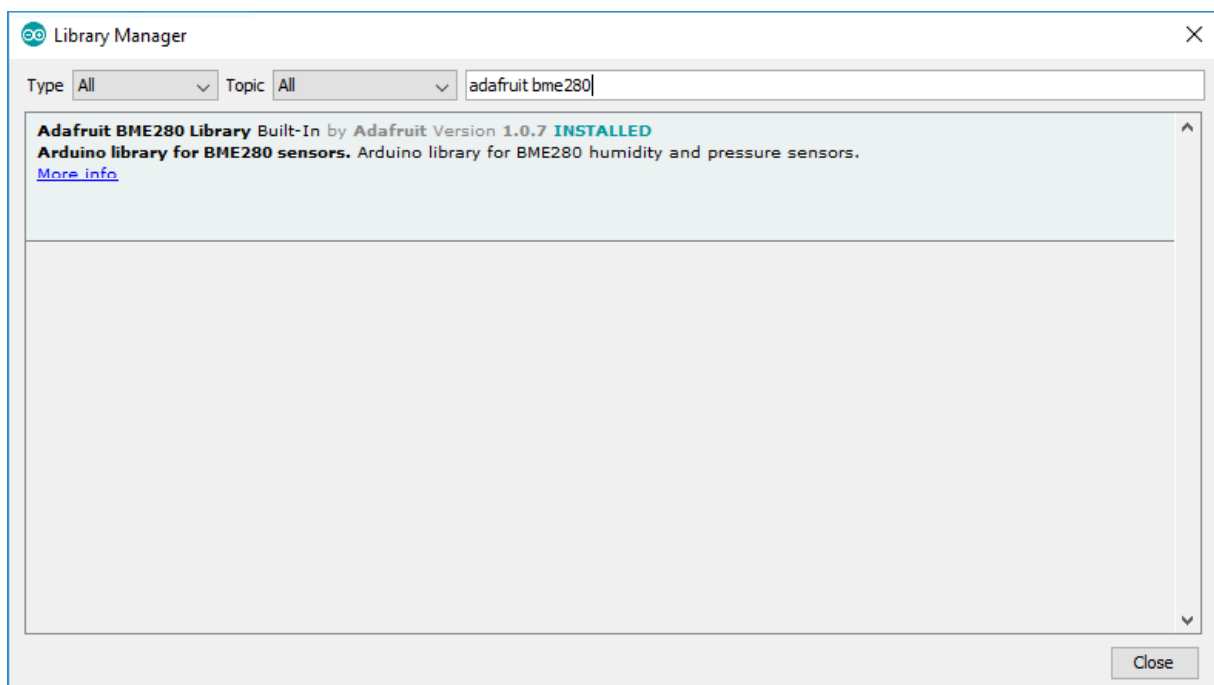
XIX Installation de la bibliothèque BME280

CHAPITRE III : Conception matérielle et logiciel

Pour obtenir les lectures du module capteur BME280, on doit utiliser la bibliothèque Adafruit_BME280. Son installation passe par le suivi des étapes ci-dessous:

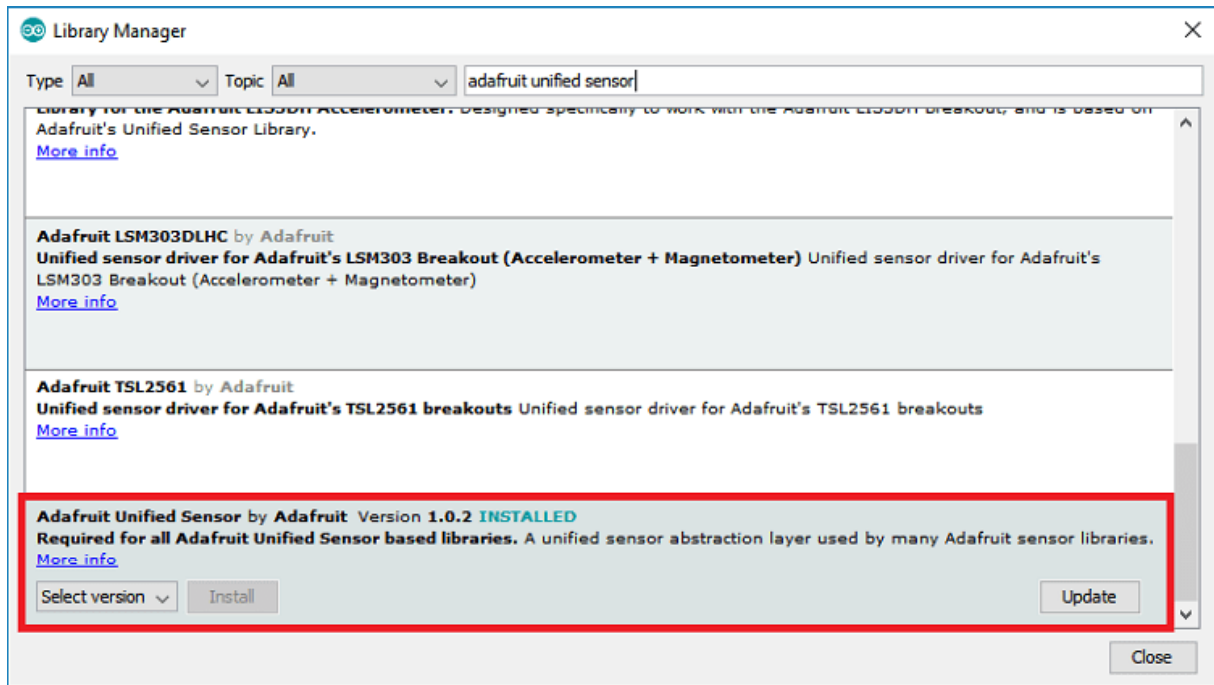
Ouverture de l'IDE Arduino et accès à **Sketch > Inclure la bibliothèque > Gérer les bibliothèques** . Le gestionnaire de bibliothèque devrait s'ouvrir.

La Recherche d'« **adafruit bme280** » dans la zone de recherche permet l'installation de la bibliothèque.



Pour utiliser la bibliothèque BME280, on doit également installer la bibliothèque Adafruit_Sensor . Les étapes à suivre pour l'installer dans l'IDE Arduino sont : Accédez à **Sketch > Inclure la bibliothèque > Gérer les bibliothèques** et tapez « **Adafruit Unified Sensor** » dans la zone de recherche. On fait défiler vers le bas pour trouver la bibliothèque et l'installer.

CHAPITRE III : Conception matérielle et logiciel



Le programme (Code)

```
#include <Wire.h>

#include <Adafruit_Sensor.h>

#include <Adafruit_BME280.h>

/*#include <SPI.h>

#define BME_SCK 18

#define BME_MISO 19

#define BME_MOSI 23

#define BME_CS 5*/

#define SEALEVELPRESSURE_HPA (1013.25)

Adafruit_BME280 bme; // I2C

//Adafruit_BME280 bme(BME_CS); // hardware SPI
```

CHAPITRE III : Conception matérielle et logiciel

```
//Adafruit_BME280 bme(BME_CS, BME_MOSI, BME_MISO, BME_SCK); // software SPI
```

```
unsigned long delayTime;
```

```
void setup() {
```

```
  Serial.begin(9600);
```

```
  Serial.println(F("BME280 test"));
```

```
  bool status;
```

```
  // default settings
```

```
  // (you can also pass in a Wire library object like &Wire2)
```

```
  status = bme.begin(0x76);
```

```
  if (!status) {
```

```
    Serial.println("Could not find a valid BME280 sensor, check wiring!");
```

```
    while (1);
```

```
  }
```

```
  Serial.println("-- Default Test --");
```

```
  delayTime = 1000;
```

```
  Serial.println();
```

```
}
```

```
void loop() {
```

```
  printValues();
```

```
  delay(delayTime);
```

```
}
```

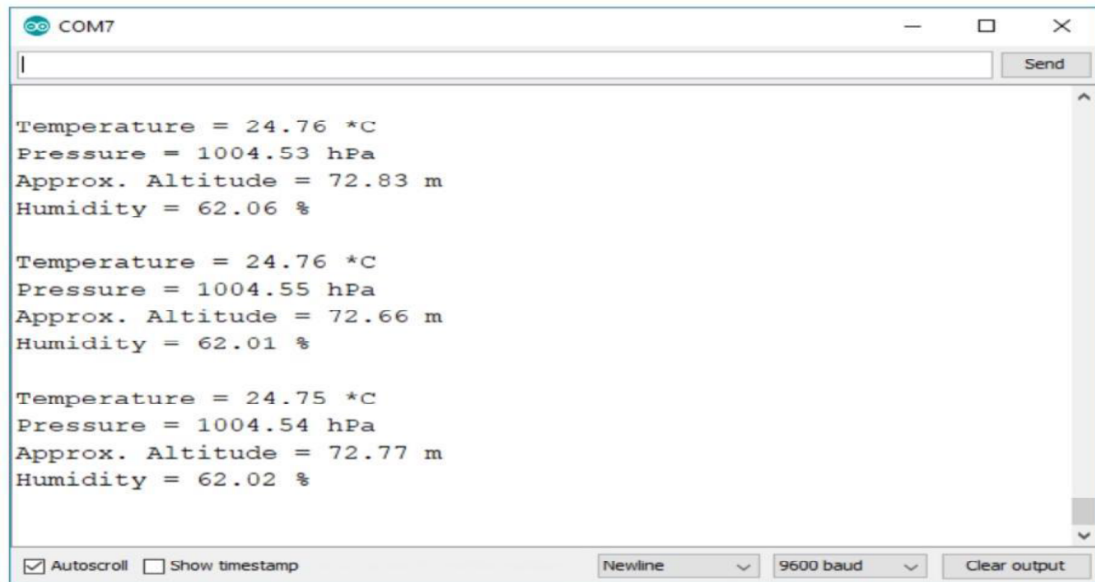
CHAPITRE III : Conception matérielle et logiciel

```
void printValues() {
  Serial.print("Temperature = ");
  Serial.print(bme.readTemperature());
  Serial.println(" *C");

  // Convert temperature to Fahrenheit
  /*Serial.print("Temperature = ");
  Serial.print(1.8 * bme.readTemperature() + 32);
  Serial.println(" *F");*/

  Serial.print("Pressure = ");
  Serial.print(bme.readPressure() / 100.0F);
  Serial.println(" hPa");
  Serial.print("Approx. Altitude = ");
  Serial.print(bme.readAltitude(SEALEVELPRESSURE_HPA));
  Serial.println(" m");
  Serial.print("Humidity = ");
  Serial.print(bme.readHumidity());
  Serial.println(" %");
  Serial.println();
}
```

XX - les lectures affichées sur le moniteur série :



XXI Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté les composants électriques utilisés pour la conception et la réalisation du système et nous avons présenté aussi d'une façon générale le régulateur PID. On a vu pourquoi on a fait les choix matériels avec précision, chaque composant a son rôle indispensable. On a, aussi, présenté la partie programmation utilisée dans la conception logicielle. Le logiciel Arduino ide a fait l'objet d'une description précise de son fonctionnement. Le code ce logiciel est donné plus haut.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

La conception et la mise en œuvre d'une chambre blanche d'opération contrôlée par un microcontrôleur ESP32 représentent une avancée significative dans la gestion des environnements stériles. En utilisant l'ESP32, avec ses capacités Wi-Fi et Bluetooth intégrées, on peut assurer une surveillance et un contrôle en temps réel des paramètres critiques tels que la température, l'humidité et la pression grâce à des capteurs comme le BME280. L'ESP32, grâce à sa puissance de calcul et sa polyvalence, permet l'exécution d'algorithmes de contrôle PID pour réguler les actionneurs responsables de la ventilation, du chauffage et de la gestion de l'humidité. Cette configuration permet de **maintenir des conditions environnementales** optimales de manière autonome, tout en offrant la possibilité de contrôle et de surveillance à distance via une interface web. Ainsi, l'intégration de l'ESP32 dans une chambre blanche d'opération non seulement améliore la précision et la fiabilité des conditions stériles mais aussi réduit la nécessité d'interventions humaines, garantissant une meilleure sécurité et efficacité des opérations médicales.

Ce projet a été une expérience professionnelle très enrichissante que ce soit d'un point de vue approfondissement de nos connaissances, que du point de vue relationnel et découverte d'un nouvel environnement de travail.

Bibliographie

1. <https://www.acsysteme.com/fr/ressources-documentaires/pid-serie-ou-parallele-quelle-structure-choisir/>
2. <https://randomnerdtutorials.com/esp32-bme280-arduino-ide-pressure-temperature-humidity/>
3. https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Bme280%20datasheet&gad_source=1&gclid=CjwKCAjwg8qzBhAoEiwAWagLrJ1VW6Y4QcEBiDx2RUzByswXe--z8UGiCfzwFAYD436q15E9wwe0_hoCI8lQAvD_BwE
4. Traité de chauffage et de climatisation (tome1 et 2), H. RIETCHEL ET W. RAISS, Dunod, 1971 ;
5. <https://dokumen.tips/documents/manuel-carrier-bilan-thermique.html?page=1>
6. Manuel carrier : Bilan Thermique, Carrier International Ltd.
7. -<https://oplusr-salle-blanche.com/salle-blanche/>
8. -https://fr.wikipedia.org/wiki/Salle_blanche
9. -<https://www.laminairecourtois.com/produits/salle-blanche-ou-laboratoire>
10. Cleanroom Technology : Fundamentals of Design, Testing and Operation" de William Whyte 01/01/2010