







**LOCALISATION ET QUANTIFICATION DES FUITES D'UN  
MASQUE N95 PAR IMAGERIE INFRAROUGE**

**DÉVELOPPEMENT D'INSTALLATIONS POUR L'ÉTUDE EXPÉRIMENTALE  
DES FUITES D'UN MASQUE N95 SUR DES SYSTÈMES À COMPLEXITÉ  
CROISSANTE**

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie

en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences appliquées (M.Sc.A.)

PAR

© GEOFFREY MARCHAIS

**Août 2024**



**Composition du jury :**

**Raef Cherif, président du jury, Université du Québec à Rimouski**

**Jean Brousseau, directeur de recherche, Université du Québec à Rimouski**

**Xavier Maldague, codirecteur de recherche, Université Laval**

**Ali Bahloul, codirecteur de recherche, Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et  
en sécurité au travail**

**Sandrine Chazelet, examinatrice externe, Institut national de recherche et de sécurité**

Dépôt initial le 21 juin 2024

Dépôt final le 13 août 2024



UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI  
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.





## REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier très sincèrement mon directeur de recherche Jean Brousseau pour ses conseils avisés et son accompagnement tout au long de mes travaux à l'Université du Québec à Rimouski. Sa disponibilité et son engagement ont été précieux, que c'est pour répondre à mes nombreuses questions, pour m'aider dans la rédaction de la demande au comité d'éthique, pour la mise en place du serveur, pour la recherche de financements et bien d'autres... Merci encore, Jean, pour tout ton soutien.

Je remercie chaleureusement Clothilde Brochot pour son aide précieuse dans la mise en place des bancs d'essai et également pour ses discussions constructives sur l'avancée du projet.

Je suis également très reconnaissant envers Yacine Yaddaden, Ali Bahloul et Xavier Maldague pour leurs précieux conseils lors de nos réunions hebdomadaires, ainsi que pour leurs idées et leur expérience qui m'ont guidé tout au long du projet. Merci à Xavier Maldague et Ali Bahloul d'avoir mis à ma disposition d'excellentes conditions de travail, notamment en prêtant un laboratoire, des caméras infrarouges et en me fournissant tout le matériel nécessaire à la bonne conduite de mon projet.

Merci à Clemente Ibarra Castanedo et Denis Ouellet pour leur expertise sur l'utilisation des caméras infrarouges et du matériel informatique, ainsi que pour leurs conseils avisés. Je remercie également Suzie Loubet, Dany Lemay, Denis Labbé et Joël Langlois pour leur aide dans diverses tâches de mon projet. Merci également aux membres du laboratoire d'impression 3D du pavillon Adrien-Pouliot à l'Université Laval pour leur réactivité.

Un grand merci aux 62 participants qui ont pris part à la collecte de données en laboratoire, manifestant ainsi leur intérêt pour notre projet.

Je tiens à exprimer ma gratitude à Barthélemy Topilko et Mohamed Arbane pour leur soutien constant. Barthélemy, merci pour ton soutien depuis Rimouski jusqu'à Québec. Mohamed, merci pour tout ce que tu m'as appris sur les outils de recherche, merci pour ta précieuse aide tout au long de cette maîtrise. Je vous souhaite à tous deux beaucoup de réussite dans vos projets futurs.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à l'IRSST (Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail) et à Mitacs pour le financement du projet « Dispositifs de protection des FFR — Développement d'une méthode facile à utiliser pour détecter les fuites et évaluer l'étanchéité des joints faciaux à l'aide de l'imagerie IR », sous les accords de subvention IRSST n°2022-0008 et Mitacs n°IT37899. Je remercie également le Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie (CRSNG), les Chaires de recherche du Canada et la Fondation Canadienne pour l'Innovation (FCI) pour leur soutien.

Finalement, je remercie tout particulièrement les membres du jury, Raef Cherif, Jean Brousseau, Xavier Maldague, Ali Bahloul, Sandrine Chazelet, pour leur temps précieux, leurs remarques constructives et leur bienveillance. Leurs conseils avisés ont grandement enrichi mon travail et m'ont permis de l'améliorer considérablement.

## RÉSUMÉ

À la suite de la pandémie mondiale de COVID-19, plusieurs problématiques ont émergé, notamment la faible fiabilité des autotests d'étanchéité et les lacunes dans leur réalisation. Les méthodes actuelles pour déterminer l'appareil de protection respiratoire (APR) le mieux adapté à un utilisateur, tels que les tests d'ajustement qualitatifs (QNFT) et quantitatifs, ont également révélé leurs limites. Ces tests engendrent des coûts considérables en matière de temps et d'argent, et ne permettent ni de localiser, ni de quantifier, ni de visualiser les fuites sur un APR.

Il est donc impératif de trouver des méthodes alternatives pour détecter les fuites de manière efficace. Certaines études ont démontré que l'imagerie infrarouge (IR) pouvait localiser les fuites sur les pièces faciales filtrantes (PFF) N95 en étudiant les variations de température tout au long du joint facial. Cependant, aucune étude utilisant cette technologie n'a encore réussi à automatiser la localisation et la quantification des fuites. Ce projet vise à combler cette lacune en développant une méthode permettant la détection automatique des fuites par imagerie IR et par intelligence artificielle (IA).

Le projet se divise en plusieurs sous-projets, dont celui-ci qui se concentre sur la collecte et l'étude expérimentale de différents scénarios de fuites afin de mieux comprendre le phénomène et de développer une méthode pour localiser et quantifier les fuites des PFF N95 par imagerie IR. Ce sous-projet prévoit d'étudier trois systèmes différents (plan, mannequin et sujets humains), en augmentant progressivement le niveau de complexité de l'étude. Ces systèmes permettront d'analyser les fuites des PFF N95 dans des environnements contrôlés (plan et mannequin) ainsi que dans un environnement non contrôlé (sujets humains). Chaque système fera l'objet d'une collecte de données, donnant ainsi lieu à la création d'une base de données, et permettant le développement d'une méthode pour localiser et quantifier les fuites des PFF N95.

À terme, cette méthode incorporera des modèles d'IA et sera ensuite intégrée à une station d'analyse capable de détecter entièrement et automatiquement les fuites d'une pièce faciale filtrante N95.

*Mots clés* : Santé et sécurité au travail, Protection respiratoire, Pièce faciale filtrante N95, Détection de fuites, Imagerie infrarouge, Test d'ajustement quantitatif, Bases de données, Apprentissage profond.



## ABSTRACT

Following the global COVID-19 pandemic, several issues have emerged, notably the low reliability of fit check self-tests and the shortcomings in their execution. The current methods for determining the most suitable respiratory protective device (RPD) for a user, such as qualitative and quantitative fit testing (QLFT/QNFT), have also shown their limitations. These tests incur significant costs in terms of time and money, and they neither locate, quantify, nor visualise leaks on an RPD.

Therefore, it is imperative to find alternative methods for effectively detecting leaks. Some studies have demonstrated that infrared (IR) imaging can locate leaks on N95 filtering facepiece respirator (FFR) by studying temperature variations along the facial seal. However, no study has yet succeeded in automating the localisation and quantification of leaks using this technology. This project aims to fill this gap by developing a method for the automatic detection of leaks through IR imaging and artificial intelligence (AI).

The project is divided into several sub-projects, including this one, which focuses on the in-depth experimental study of different leak scenarios to better understand the phenomenon and to develop a method for locating and quantifying leaks in N95 FFR using IR imaging. This sub-project plans to study three different systems (flat model, static advanced headform, and human subjects), progressively increasing the complexity of the study. These systems will allow the analysis of N95 FFR leaks in controlled environments (flat surface and mannequin) as well as in an uncontrolled environment (human subjects). Each system will involve data collection, leading to the creation of a database, and thus enabling the development of a method to locate and quantify leaks in N95 FFR.

In the long term, this method will incorporate AI models and will then be integrated into an analysis station capable of fully and automatically detecting leaks in a FFR N95.

*Keywords:* Occupational Health and Safety, Respiratory protection, N95 Filtering facepiece respirator, Leak detection, Infrared imaging, Quantitative Fit Testing, Databases, Deep learning.



## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	vii
RÉSUMÉ.....	ix
ABSTRACT.....	xi
TABLE DES MATIÈRES.....	xiii
LISTE DES TABLEAUX.....	xvii
LISTE DES FIGURES.....	xix
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES.....	xxiii
LISTE DES SYMBOLES.....	xxv
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
1.    MISE EN CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE.....	1
2.    TRAVAUX ANTÉRIEURS SUR L'UTILISATION DE L'IMAGERIE INFRAROUGE POUR LA DÉTECTION DES FUITES DES PFF N95.....	4
3.    OBJECTIFS DU PROJET DE RECHERCHE.....	6
4.    MÉTHODOLOGIE.....	8
5.    PLAN DU MÉMOIRE.....	13
CHAPITRE 1 : Un Banc d'Essai pour Reproduire la Respiration Humaine : Évaluation des Effets Thermiques des Fuites des Pièces Faciales Filtrantes N95 – Résultats Préliminaires.....	15
1.1    RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU PREMIER ARTICLE.....	15
1.2    A TEST BENCH FOR REPLICATION HUMAN BREATHING: EVALUATING THERMAL EFFECTS OF N95 FILTERING FACEPIECE RESPIRATOR LEAKS – PRELIMINARY FINDINGS.....	18
1.2.1 Abstract.....	18
1.2.2 Introduction.....	19

1.2.3 Modelling and Design.....	21
1.2.4 Experimental Validation .....	27
1.2.5 Preliminary Results and Discussion.....	32
1.2.6 Conclusion .....	35
<b>CHAPITRE 2 : Développement d'une Méthode pour la Localisation et la</b> <b>Quantification des Fuites d'une Pièce Faciale Filtrante N95 .....</b>	<b>37</b>
2.1 COLLECTE DE DONNÉES PLAN ET MANNEQUIN.....	37
2.2 BASES DE DONNÉES POUR LE PLAN ET LE MANNEQUIN .....	40
2.2.1 Scénario sans fuite .....	40
2.2.2 Scénario avec fuites .....	42
2.2.3 Intégration des modèles d'intelligence artificielle .....	44
2.3 PROPOSITION D'UNE MÉTHODE ANALYTIQUE POUR LOCALISER ET QUANTIFIER LES FUTTES D'UNE PFF N95 PAR IMAGERIE INFRAROUGE ET PAR INTELLIGENCE ARTIFICIELLE .....	45
2.3.1 Capture et division du joint facial en N ROI .....	45
2.3.2 Extraction et traitement du signal <i>Température</i> sur chaque ROI .....	48
2.3.3 Exploitation du $\Delta T$ .....	55
2.4 DISCUSSION.....	59
<b>CHAPITRE 3 : SafeRespirator : Base de Données Complète pour la Détection des</b> <b>Fuites d'une Pièce Faciale Filtrante N95 Comprenant des Vidéos Infrarouges, RGB et</b> <b>des Tests d'Ajustement Quantitatifs .....</b>	<b>63</b>
3.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU DEUXIÈME ARTICLE .....	63
3.2 SAFERESPIRATOR: COMPREHENSIVE DATASET FOR N95 FILTERING FACEPIECE RESPIRATOR LEAK DETECTION INCLUDING INFRARED, RGB VIDEOS, AND QUANTITATIVE FIT TESTING.....	67
3.2.1 Abstract .....	67
3.2.2 Introduction.....	67
3.2.3 Related Works.....	69
3.2.4 Materials and Methods.....	71
3.2.5 Data .....	80
3.2.6 Preliminary Results.....	83
3.2.7 Discussion.....	86
3.2.8 Conclusion .....	87
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE.....</b>	<b>89</b>



ANNEXE I - Protocoles expérimentaux – Plan & Mannequin / Sujets Humains .....	97
ANNEXE II - Approbation du CER-UQAR .....	99
ANNEXE III - Les outils de recrutement .....	102
ANNEXE IV - Les outils de consentement .....	107
ANNEXE V - Organisation des données avec Sujets Humains .....	117
ANNEXE VI - Aperçu du site web : SafeRespirator.....	118
ANNEXE VII - Formulaire d'accès à la base de données.....	119
ANNEXE VIII - Consentement de chaque participant à l'utilisation de leur visage dans des publications scientifiques .....	123
ANNEXE XIX – Conception, code et montage du système de synchronisation .....	125
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	126



## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 0.1 Complexité de chaque système étudié suivant 5 critères .....	9
Tableau 0.2 Ensemble des instruments et dispositifs utilisés dans ce projet de recherche .....	11
Tableau 2.1 Équivalence entre le calibre (G) et le diamètre intérieur (mm) d'une aiguille.....	38
Tableau 2.2 Récapitulatif des scénarios créés pour les deux bases de données .....	43
Tableau 3.1 Information about database used to develop their deep learning models .....	70
Tableau 3.2 Characteristics of two cameras used to collect data.....	71
Tableau 3.3 N95 FFR Characteristics tested during data collection.....	77
Tableau 3.4 Test reliability classification according to the difference between FF1 and FF2.....	82
Tableau 3.5 Example of 2 tests for 2 participants.....	83
Tableau 4.1 Exigences et solutions potentielles pour la conception de la station d'analyse.....	95



## LISTE DES FIGURES

Figure 0.1 Évolution du nombre de publications suivant les recherches "N95" (courbe bleue) et "Filtering facepiece respirator" (courbe verte) [53] .....	3
Figure 0.2 Les trois systèmes étudiés, dans l'ordre de gauche à droite : plan, mannequin et sujet humain.....	8
Figure 1.1 : Overview of the proposed test bench .....	22
Figure 1.2 Complete test bench modeling .....	24
Figure 1.3 Modelling and design of two test devices .....	25
Figure 1.4 Control of number, size and location leak(s) .....	26
Figure 1.5 Final test bench.....	27
Figure 1.6 Output flow rate as a function of input flow rate .....	28
Figure 1.7 Breathing pattern on the ASL 5000 <sup>®</sup> software.....	29
Figure 1.8 Temperature variations of ROI during a normal breathing .....	30
Figure 1.9 Validation of limited number of generated particles.....	32
Figure 1.10 Location of Leak on both Test Devices.....	33
Figure 1.11 Many leak scenarios with a FF labelling.....	34
Figure 2.1 Positions des fuites sur les deux dispositifs.....	38
Figure 2.2 Scénario 1 sans fuite sur le dispositif Plan .....	41
Figure 2.3 Scénario 1 sans fuite sur le dispositif Mannequin .....	41
Figure 2.4 Scénario 77 – Plan.....	42
Figure 2.5 Scénario 20 - Mannequin .....	43
Figure 2.6 Architecture d'un modèle d'IA avec comme entrées les données de la base de données .....	44
Figure 2.7 Capture du joint facial sur plan .....	46

Figure 2.8 Capture du joint facial sur mannequin .....	46
Figure 2.9 Méthode pour la division du joint facial .....	47
Figure 2.10 Positions des 4 ROI étudiés .....	49
Figure 2.11 Analyse temporelle (a) et fréquentielle (b) de 4 ROI sans traitement de signaux.....	50
Figure 2.12 Analyse temporelle (a) et fréquentielle (b) de 4 ROI après lissage .....	51
Figure 2.13 Analyse temporelle (a) et fréquentielle (b) de 4 ROI après lissage et filtrage.....	53
Figure 2.14 Représentation des points maximaux et minimaux pour réaliser le calcul de la moyenne des $\Delta T_i$ .....	55
Figure 2.15 Graphique des $\Delta T$ en fonction des ROI. Les trois ROI étudiées (rouge, bleue et verte) ainsi que le joint facial (jaune) sont visibles sur l'image IR à gauche et sur l'axe des abscisses du graphique à droite.....	56
Figure 2.16 Nouvelle architecture d'un modèle d'IA avec l'ajout d'une nouvelle entrée.....	57
Figure 2.17 Aperçu de l'aire sous la courbe (zone bleue) des $\Delta T$ en fonction des ROI pour le scénario 1 à gauche (sans fuite) et le scénario 77 à droite (2 fuites) .....	58
Figure 3.1 Modeling and design of the imaging system, 1) RGB camera, 2) IR camera ....	72
Figure 3.2 Two IR and RGB image pairs of the aluminum checkerboard in 2 different positions for calibration .....	73
Figure 3.3 Two IR and RGB image pairs with and without pulse of heat and light (encircled in red) for synchronization.....	74
Figure 3.4 Final installation including the imaging system, the PortaCount <sup>®</sup> , the dark tent and the swivel chair .....	76
Figure 3.5 Detailed data collection protocol for 1 N95 FFR tested .....	78
Figure 3.6 NIOSH bivariate panel as determined by Zhuang et al. [49] and distribution of 62 participants' face length and width.....	80
Figure 3.7 Visualization of IR and RGB images in 4 different positions : front, top, left, right .....	81
Figure 3.8 Test distribution according to the average between FF1 and FF2 .....	83

Figure 3.9 Application of MediaPipe on RGB/ IR Images after synchronization and calibration. Landmark 56: blue point on the left side, at eye level; Landmark 464: red point on the right side, at cheek level. The size of the landmarks is enlarged for better; their original size is 4*4 pixels .....	84
Figure 3.10 Comparative analysis of temperature variations between two participants at identical landmarks. Landmark 56 : blue curve; Landmark 464 : orange curve .....	85





## **LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES**

<b>AI / IA</b>	Artificial Intelligence / Intelligence Artificielle
<b>CER-UQAR</b>	Comité d'éthique de la recherche de l'Université du Québec à Rimouski
<b>CERUL</b>	Comités d'éthique de la recherche avec des êtres humains de l'Université Laval
<b>CND</b>	Contrôle Non Destructif
<b>COVID-19</b>	Coronavirus Disease 2019 / Pandémie du Coronavirus survenue en 2019
<b>CRSNG</b>	Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie
<b>FCI</b>	Fondation Canadienne pour l'Innovation
<b>FF</b>	Fit Factor / Facteur d'ajustement
<b>FFR / PFF</b>	Filtering Facepiece Respirator / Pièce Faciale Filtrante
<b>HEPA</b>	High Efficiency Particulate Air
<b>IR</b>	Infrared / Infrarouge
<b>INRS</b>	Institut national de recherche et de sécurité
<b>IRSST</b>	Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail
<b>LSST</b>	Loi sur la santé et la sécurité du travail
<b>N</b>	Nombre de régions d'intérêts
<b>NIOSH</b>	National Institute for Occupational Safety and Health Institut National pour la Sécurité et la Santé au travail

<b>OSHA</b>	Occupational Safety and Health Administration
<b>QLFT</b>	Qualitative Fit Testing / Test d'ajustement qualitatif
<b>QNFT</b>	Quantitative Fit Testing / Test d'ajustement quantitatif
<b>UQAR</b>	Université du Québec à Rimouski
<b>RGB / RVB</b>	Red, Green, Blue / Rouge, Vert, Bleu
<b>ROI</b>	Region Of Interest / Région d'intérêt
<b>RPD / APR</b>	Respiratory Protective Device / Appareil de Protection Respiratoire
<b>RSST</b>	Règlement sur la santé et la sécurité du travail
<b>StAH</b>	Static Advanced Headform / Tête de mannequin statique avancée

## LISTE DES SYMBOLES

### Unités de longueur

**cm / mm** centimètre / millimètre

**G** Jauge

### Unités de temps

**Hz** Hertz

**s** seconde

### Unités de température

**°C** Degré Celsius

**K** Kelvin

### Unités de débit

**L/min** Litre par minute

### Unités de concentration

**g/mL** gramme par millilitre

### Unités de pression

**PSI** Pound per Square Inch

### Unités monétaires

**CA\$** Dollars canadiens

### Unités de puissance

**W** Watts



## INTRODUCTION GÉNÉRALE

### 1. MISE EN CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE

Un appareil de protection respiratoire (APR) est conçu pour préserver le porteur des dangers liés à l'inhalation d'aérosols nocifs. Au Québec, la Loi sur la santé et la sécurité du travail (LSST) [1] et le Règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST) [2] encadrent cette pratique dans les environnements professionnels. Lorsque les mesures administratives, d'ingénierie et de protection collective ne suffisent pas à garantir une exposition sans risque pour la santé des travailleurs, ces derniers doivent être équipés d'un APR. Le RSST se réfère à la norme canadienne CSA Z94.4-93 [3] pour le choix, l'entretien et l'utilisation des APR, et chaque entreprise utilisant ces équipements doit mettre en place un programme de protection respiratoire rigoureux, y compris la désignation d'un administrateur de programme. Malgré son importance, l'implémentation de ce programme peut s'avérer difficile dans certaines entreprises, en particulier les petites structures ou les travailleurs indépendants. Le programme de protection comprend notamment les tests d'ajustement des APR selon la norme CSA Z94.4-93. Il est crucial que les APR soient correctement ajustés aux caractéristiques faciales du porteur pour garantir une protection adéquate. Le choix parmi les différents modèles et tailles d'APR disponibles doit être fait après des tests d'ajustement supervisés [4,5]. Des études ont montré que l'efficacité de la protection respiratoire avant ces tests d'ajustement et avant une formation appropriée est souvent inférieure aux attentes [6].

Il existe deux types de tests d'ajustement supervisés [7] : le test d'ajustement quantitatif (QNFT = Quantitative Fit Testing) et le test d'ajustement qualitatif (QLFT = Qualitative Fit Testing). Ces tests permettent à un utilisateur de sélectionner l'APR le mieux adapté à son visage, assurant ainsi une protection optimale contre les aérosols nocifs. Concrètement, le QNFT implique l'exposition du porteur d'APR à un nombre de particules inoffensives pour

le porteur, mais également détectables par un instrument spécifique, tel qu'un compteur de particules. Cet appareil quantifie l'ajustement de l'APR en comptant le nombre de particules à l'extérieur et à l'intérieur de celui-ci, puis en établissant un rapport entre ces deux valeurs, le facteur d'ajustement (FF = Fit Factor). Pour le QLFT, le porteur de l'APR est exposé soit à une fumée irritante soit à un produit dégageant une odeur identifiable. La détection de l'odeur indique une infiltration dans le masque, signalant ainsi un mauvais ajustement de l'APR. Chaque utilisateur d'un APR est tenu de passer un test d'ajustement, qu'il soit quantitatif ou qualitatif, conformément au programme de protection en vigueur. Ceci garantit un ajustement facial satisfaisant pour le port de l'APR par l'utilisateur. Cependant, ces tests d'ajustement sont très coûteux en termes de temps et d'argent [10]. De plus, ces tests présentent des limitations significatives, ils ne permettent pas de localiser les fuites, qui sont simplement détectées par des irritations ou par un faible FF. Ils n'offrent ni visualisation des fuites ni quantification précise de la sévérité de chaque fuite. Enfin, ces tests ne sont pas automatisés et nécessitent l'intervention d'une personne spécialement formée pour les superviser.

Ces tests d'ajustement sont généralement effectués une seule fois avant la première utilisation d'un APR. Cependant, ils peuvent être refaits dans certaines circonstances exceptionnelles, telles que des modifications physiques du visage (prise de poids important, chirurgie faciale, etc.) ou en cas d'exigences réglementaires spécifiques [5]. En revanche, un autre type de test, le test d'étanchéité ou autotest (fit check), doit être effectué par l'utilisateur avant chaque utilisation de l'APR. Ce test vise à vérifier le bon ajustement du masque à l'aide de gestes simples. Cependant, ce test repose sur la subjectivité de chaque utilisateur [10]. Plusieurs études [8,9] ont démontré la faible sensibilité et la faible précision de ce test d'étanchéité pour déterminer l'ajustement d'un APR. Ils ont également conclu sur le fait qu'une grande partie des utilisateurs ne réalisent pas ce test de manière adéquate [11].

La pandémie mondiale de COVID-19 a mis en évidence la plupart des problématiques mentionnées précédemment, avec près d'un quart des cas rapportés touchant des travailleurs de santé [12]. D'une autre part, la réalisation de l'ensemble des tests d'ajustement pour tout

le personnel de santé a également été un défi majeur, nécessitant un temps considérable et un effort organisationnel important [13].

À la suite de cette pandémie, un très grand nombre d'études ont été réalisées dans le but d'approfondir les connaissances sur la protection respiratoire et plus particulièrement sur les pièces faciales filtrantes (PFF) et les N95 (Fig.0.1).

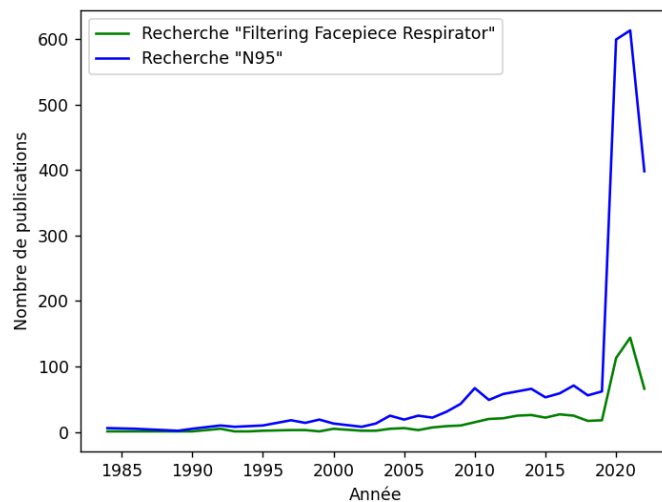


Figure 0.1 Évolution du nombre de publications suivant les recherches "N95" (courbe bleue) et "Filtering facepiece respirator" (courbe verte) [53]

À la lumière de toutes ces problématiques, il apparaît important de développer des méthodes alternatives aux tests d'ajustement et d'étanchéité, dans le but d'assurer un meilleur ajustement des APR et donc une meilleure protection des utilisateurs dans leur environnement de travail réel. Pour un APR de type N95, Clayton et Vaughan [14] ainsi que Grinshpun et al. [15] ont montré que le plus grand facteur contributif à la perte de protection est la fuite à travers le joint facial. Le joint facial est le contact entre l'APR et le visage du porteur. Cela implique que la protection offerte par un APR est considérablement affectée par l'ajustement insuffisant entre le masque et le visage [16].

## **2. TRAVAUX ANTÉRIEURS SUR L'UTILISATION DE L'IMAGERIE INFRAROUGE POUR LA DÉTECTION DES FUITES DES PFF N95**

Une alternative aux essais d'ajustement actuels est la technologie infrarouge (IR), cette méthode fait partie des méthodes de Contrôle Non Destructif (CND). Cette approche par imagerie IR repose sur le principe physique suivant : la température de l'expiration humaine, approximativement à la température corporelle (environ 37°C), est plus élevée que celle de l'air inspiré, correspondant à la température du milieu ambiant [17]. Kerl et al. [18] sont les premiers à utiliser une caméra IR pour détecter les fuites d'une PFF. Leur méthode repose également sur la visualisation des changements de température de la surface du visage près du joint facial du masque, induits par l'écoulement de l'air chaud expiré.

Même si le nombre d'études à propos de cette nouvelle méthode reste limité, quelques études se sont intéressées à l'imagerie IR pour étudier les fuites d'une PFF N95. En effet, Dondall et al. [19] ainsi que Roberge et al. [16] ont montré que l'imagerie IR est capable de détecter les fuites d'une PFF sur sujets humains et qu'elle est également capable d'évaluer si une PFF est correctement ajusté ou non. Ils ont conclu que l'imagerie IR pourrait jouer un rôle dans les essais d'ajustement actuels. Harber et al. [20] se sont intéressés à l'existence d'une relation entre le FF et l'imagerie IR dans le but de quantifier une fuite grâce à l'imagerie IR. Cette méthode repose sur une échelle de quatre points qui évalue la sévérité des fuites par imagerie IR. Ils ont montré qu'une relation existait entre le FF et ce score, mais qu'à leur estimation elle n'était pas suffisamment fiable pour remplacer les essais d'ajustement actuels. Lei et al. [21] ont utilisé l'imagerie IR pour valider des simulations de mécanique des fluides numériques (CFD) dans le but de prédire les fuites d'une PFF N95. Ils ont également montré que la plupart des fuites apparaissent aux régions du nez (40%) et des joues droite (26%) et gauche (26%).

Plus récemment, certaines études ont exploré l'utilisation de modèles d'intelligence artificielle (IA) appliqués aux données IR pour améliorer la détection des fuites des pièces faciales filtrantes.



En effet, Siah et al. [22] ont filmé des participants portant des masques N95 à l'aide d'une caméra IR. Ils ont filmé ces participants dans différentes positions pour capturer le joint facial entièrement et ont appliqué des modèles d'IA sur ces vidéos. Ils ont démontré que l'imagerie IR, combinée à des outils d'IA, avait le potentiel de localiser les fuites d'air d'une PFF.

Bari et al. [23] ont également réalisé des enregistrements IR de participants portant des masques N95 dans les mêmes positions. Leurs conclusions ont corroboré celles de Siah et al. quant au potentiel de l'imagerie IR, tout en soulignant quelques limitations dans leur étude, tels que les mouvements des participants et la quantité limitée de données collectées pour l'entraînement des modèles d'IA.

Encore plus récemment, Chapman et al. [24] ont filmé de face des participants portant une PFF P2 et ont démontré que l'intégration des modèles d'IA à l'imagerie IR dépasse les limites des tests d'étanchéité et autotests traditionnels. Ils concluent que cette approche basée sur l'IA est très prometteuse en tant qu'alternative pour garantir le bon ajustement des masques PFF P2. Ces trois études ont toutes utilisé des méthodes d'essais d'ajustement conventionnelles comme référence. Ces méthodes, déjà testées et prouvées, les ont aidés à détecter les fuites et à valider leurs résultats.

Cependant, à notre connaissance, aucune étude n'a encore permis de localiser et de quantifier automatiquement la sévérité des fuites d'une PFF. La plupart des recherches dans ce domaine ont démontré l'efficacité des modèles d'IA et de l'imagerie IR pour la localisation, mais non pour la quantification des fuites d'une PFF.

### 3. OBJECTIFS DU PROJET DE RECHERCHE

L'objectif principal du projet plus global est le développement d'une méthode complète capable d'évaluer l'étanchéité du joint facial, de localiser et de quantifier la sévérité des fuites d'une PFF grâce à l'imagerie IR et également grâce à des modèles d'intelligence artificielle.

Plus spécifiquement, les objectifs du projet sont :

- Détecter et localiser les zones de fuite à l'aide de l'imagerie IR ;
- Quantifier l'importance des fuites en corrélant les mesures effectuées par un appareil utilisé lors des QNFT avec les images IR ;
- Travailler en vue de développer une station d'évaluation du joint facial adaptée à divers environnements de travail, et proposer une conception préliminaire ainsi qu'un prototype.

Pour atteindre ces objectifs, plusieurs sous-projets ont été créés afin de diviser les tâches. Ce projet est donc une initiative globale regroupant les sous-projets suivants :

- Expérimentation : création de bases de données et étude du lien entre le facteur d'ajustement et les mesures infrarouges ;
- Modélisation et simulation multiphysique : création de modèles multiphysiques dans le but de valider les résultats expérimentaux ;
- Détection et évaluation des fuites par IA : intégration de modèles d'IA aux données collectées pour rendre la méthode de détection automatique.

Ce projet de recherche s'intéresse au sous-projet suivant : « Expérimentation : création de bases de données et étude du lien entre le facteur d'ajustement et les mesures infrarouges »

Le premier objectif de ce sous-projet est la mise en place d'une première installation expérimentale pour mener une étude approfondie sur l'effet thermique des fuites d'une PFF N95 dans un environnement contrôlé. Les objectifs spécifiques associés à cet objectif sont :

- Établir un environnement contrôlé en instaurant une respiration contrôlée et en concevant deux dispositifs spécifiquement conçus pour contrôler totalement les fuites (leur nombre, leurs taille(s) et leurs position(s)) d'une PFF ;
- Créer une base de données complète pour chaque dispositif regroupant des données IR et données résultant de QNFT de différents scénarios de fuites ;
- Développer une ou des méthodes préliminaires pour localiser et quantifier les fuites d'une PFF par imagerie IR ;

Le deuxième objectif est la mise en place d'une deuxième installation dans le but de créer une base de données complète pour l'étude des fuites d'une PFF sur participants humains. Les objectifs spécifiques associés à cet objectif sont les suivants :

- Développer un protocole détaillé pour collecter les données intéressantes pour notre projet sur participants humains ;
- Mettre en place une installation pour accueillir ces participants et pour mettre en œuvre ce protocole ;
- Préparer et réaliser cette collecte de données sur des participants portant des PFF N95 ;
- Rassembler toutes ses données dans une base de données unique, faciliter son accès et son organisation dans le but de simplifier son utilisation (intégration des modèles d'IA – *sous projet 3*).
- Mettre à disposition la base de données auprès de la communauté scientifique via la création d'un site web dédié.

#### 4. MÉTHODOLOGIE

La complexité d'étude de ce phénomène physique explique l'absence actuelle de publications permettant de localiser et de quantifier automatiquement les fuites d'un APR par imagerie IR. L'analyse des variations de température de la peau près du joint facial dépend de multiples facteurs difficiles à contrôler, tels que le métabolisme cutané, les conditions environnementales, la morphologie du visage, la respiration humaine, les mouvements. Afin d'approfondir notre compréhension de l'effet thermique d'une fuite sur une PFF N95, il est essentiel de minimiser ces facteurs perturbateurs autant que possible. Ainsi, ce projet s'est focalisé sur l'étude de trois systèmes distincts (Fig.0.2) : un plan, un mannequin et des sujets humains.



Figure 0.2 Les trois systèmes étudiés, dans l'ordre de gauche à droite : plan, mannequin et sujet humain

La complexité de ces trois systèmes augmente progressivement en fonction de critères tels que la géométrie, la respiration, le contrôle des fuites, les mouvements et le nombre de vues nécessaires pour capturer la totalité du joint facial (Tableau 0.1). Les systèmes seront étudiés par ordre de complexité croissante, d'abord le plan, puis le mannequin, et enfin les participants humains.

Tableau 0.1

Complexité de chaque système étudié suivant 5 critères

<b>Système</b>	<b>Géométrie</b>	<b>Respiration</b>	<b>Fuite(s)</b>	<b>Mouvements</b>	<b>Vues nécessaires</b>
<b>1</b>	Simple	Contrôlée	Contrôlée(s)	Non	1
<b>2</b>	Complexe	Contrôlée	Contrôlée(s)	Non	4
<b>3</b>	Complexe	Non Contrôlée	Non Contrôlée(s)	Oui	4

Ce projet se divise en deux phases distinctes. La première phase sera dédiée à une étude en environnement contrôlé, incluant l'étude des deux premiers systèmes : le plan et le mannequin. Cette étape initiale permettra d'atteindre le premier objectif du projet. La deuxième phase se concentrera sur le troisième système, à savoir la mise en place d'une installation et la collecte de donnée sur les participants humains. Elle vise à atteindre le deuxième objectif du projet.

Tout d'abord, pour l'étude des deux premiers systèmes, il sera nécessaire de créer une installation reproduisant la respiration humaine afin de simuler les conditions réelles. Pour reproduire au mieux cette respiration, trois critères devront être respectés : le débit respiratoire, la température de l'air expiré et de l'air inspiré, ainsi qu'un nombre minimal de particules générées par cette installation. Le respect des deux premiers critères permettra d'assurer l'étude des variations de température au joint facial proche de celle d'un humain. Le dernier critère permettra d'assurer une fiabilité des résultats des QNFT. En effet un être humain n'émet pas de particules détectables par les instruments utilisés pour réaliser les QNFT, il est donc primordial que l'installation mise en place reproduise ce phénomène.

Cette installation sera assemblée à l'aide de divers instruments, d'une caméra IR et de pièces imprimées. L'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) met à la disposition du projet une tête factice (Mannequin), un simulateur respiratoire de haute précision, l'ASL 5000<sup>®</sup> (IngMar Medical, Pittsburgh, Pennsylvania, USA). Ce simulateur permettra de reproduire la respiration humaine de façon contrôlée. Cependant, il est important de noter que le simulateur respiratoire ASL 5000<sup>®</sup> ne possède pas la capacité de chauffer l'air expiré. Ainsi, il sera nécessaire d'ajouter à cet ensemble d'appareils un module spécifique permettant de chauffer seulement l'air expiré à température

corporelle tout en maintenant l'air inspiré à température ambiante. Un système de direction de flux d'air sera donc également à développer pour assurer cette différenciation thermique. Ceci est crucial pour recréer les variations thermiques requises pour notre étude.

L'IRSST met également à disposition un appareil permettant de réaliser des QNFT, le PortaCount<sup>®</sup>, Modèle 8038 (TSI Incorporated, Shoreview, Minnesota, USA) et un générateur de particules, le 24-Jet Collision Nebulizer (BGI Inc., Waltham, USA). L'instrument PortaCount<sup>®</sup> permet de réaliser des QNFT sur des PFF N95, il est capable de fournir un FF allant de 1 à 200, au-delà de 200, le résultat sera de 200+. Un FF proche de 1 signifie un très mauvais ajustement de la PFF. Plus ce facteur augmente, meilleur est l'ajustement de la PFF. Pour une PFF de type N95 bien ajusté, la valeur seuil du FF est de 100. Le générateur de particules permettra de maintenir un nombre de particules constant dans le laboratoire et donc de réaliser des QNFT dans des conditions similaires pour chaque test.

De plus, le laboratoire de Vision et Systèmes Numériques de l'Université Laval dispose d'une caméra IR FLIR 8501sc de très haute résolution (FLIR Systems, Inc., Wilsonville, Oregon, USA).

Des dispositifs de contrôle des fuites d'une pièce faciale filtrante (PFF) seront également modélisés et conçus à la fois sur plan et sur mannequin. Ces dispositifs permettront de contrôler le nombre, les taille(s) et les position(s) des fuites créées pour réaliser une étude approfondie de l'effet thermique de ces dernières. L'assemblage de l'ensemble des instruments et d'un des deux dispositifs (plan ou tête de mannequin) permettra la mise en place d'une installation capable de reproduire une respiration humaine et des fuites contrôlées. Cette installation sera utilisée pour réaliser des collectes de données de différents scénarios de fuites sur les dispositifs plan et mannequin. Ces données seront des données IR et des données résultant de QNFT. Elles permettront par la suite de développer une méthode de localisation et de quantification des fuites d'une PFF N95.

Concernant la deuxième phase avec les participants humains, une installation sera également mise en place. Cette deuxième installation inclura comme la précédente plusieurs

instruments, caméras et pièces conçus. Le laboratoire de Vision et Systèmes Numériques de l'Université Laval dispose d'une caméra IR FLIR 8501sc de haute résolution et d'une caméra GoPro Hero 9. Contrairement à l'installation précédente, une caméra visible (la GoPro Hero 9) sera utilisée avec les participants humains pour collecter des données RGB. Ces données permettront de faire une fusion de données avec les données IR facilitant le suivi des ROI (régions d'intérêts) à étudier. Ces deux caméras feront l'objet d'une conception d'un système rigide permettant l'installation et la fixation des deux caméras. Un système de synchronisation ainsi qu'un système de calibration seront également développés et conçus. Ces systèmes permettront après la collecte de données de calibrer et synchroniser les données IR et RGB pour améliorer la fusion de données. Le PortaCount<sup>®</sup>, cité précédemment, sera également utilisé pour réaliser des QNFT. Un protocole détaillé sera élaboré pour la collecte de données sur cette installation. Ce protocole sera soumis à des tests multiples afin d'assurer la fiabilité maximale des données collectées.

L'ensemble des instruments et systèmes à réaliser est récapitulé dans le Tableau 0.2. Certains de ces éléments seront utilisés soit dans l'installation 1, soit dans l'installation 2, soit dans les deux.

Tableau 0.2  
Ensemble des instruments et dispositifs utilisés dans ce projet de recherche

Catégorie	Instrument / Dispositif	Modèle	Fabricant	Installation 1	Installation 2
Système étudiés	Plan	∅	À réaliser	✓	
	Mannequin	∅	IRSST	✓	
	Participant Humains	∅	∅		✓
Imagerie	Caméra IR	FLIR x8501sc	FLIR Systems	✓	✓
	Caméra RGB	GoPro Hero 9	GoPro		✓
	Système d'imagerie	∅	À réaliser		✓
	Système de calibration	∅	À réaliser		✓
	Système de synchronisation	∅	À réaliser		✓
QNFTs	Compteur de particules	PortaCount Modèle 8038	TSI Incorporated	✓	✓
	Générateur de particules	24-Jet Collision Nebulizer	BGI Incorporated	✓	✓
Respiration humaine	Simulateur Respiratoire	ASL 5000 <sup>®</sup> Breathing Simulator	IngMar Medical	✓	
	Chambre Chauffante	∅	À réaliser	✓	
	Systèmes de Flux d'Air	∅	À réaliser	✓	

En parallèle de la mise en place de l'installation, une demande sera soumise au Comité d'Éthique en Recherche de l'Université du Québec à Rimouski (CER-UQAR) afin d'obtenir leur approbation en vue de la collecte de données. Une approbation du comité d'éthique de l'Université Laval sera également requise, étant donné que le recrutement se fera sur le campus de l'Université Laval. Une fois ces approbations obtenues, le recrutement des participants a commencé. Celui-ci s'est fait à l'aide d'une affiche promotionnelle qui sera partagée avec la communauté étudiante de l'Université Laval par affichage sur des babillards et par l'envoi de courriels groupés. L'affiche a également été diffusée sur les réseaux sociaux. Concernant le nombre de participants attendu, la cible se situait entre 50 et 100.

Une fois le recrutement effectué, la collecte de données a pu débuter. Elle a été organisée en deux phases, avec la participation de la moitié des participants à chaque phase. Une pause entre ces deux phases a permis de vérifier la qualité des données collectées. Chaque participant devait consentir à la collecte de données et à l'utilisation de son visage dans des publications scientifiques. Deux formulaires distincts ont été utilisés à cette fin. Il est à noter qu'un refus de signer le deuxième formulaire n'entraînait pas l'annulation de la collecte de données, contrairement au premier. En reconnaissance de leur participation, chaque participant a reçu une compensation financière de 20 CA\$.

À la suite de cette collecte de données, un temps a été dédié à l'exportation de l'intégralité des données, ainsi qu'à la création et à l'organisation de la base de données. De plus, un site web a été créé pour présenter un échantillon de la base de données et expliquer comment accéder à celle-ci. Finalement, une licence d'utilisation a été rédigée pour définir les règles d'accès et d'utilisation de la base de données. Un article dédié à présenter cette base de données a été rédigé, avec pour objectif de le publier dans une revue scientifique. Cette publication donnera de la visibilité à cette base de données.

Ce projet a joué un rôle crucial dans la création et le partage d'une base de données exhaustive concernant des participants humains. Cette base de données facilitera une étude approfondie de la relation entre le facteur d'ajustement des PFF N95 et les variations de température au niveau du joint facial, permettant ainsi d'évaluer plus précisément



l'ajustement de ces dispositifs. Par ailleurs, l'utilisation de l'imagerie infrarouge pour examiner l'ajustement des PFF, tant sur un mannequin que sur un modèle numérique, constitue une innovation notable. Cette technologie montre un potentiel prometteur pour remplacer les méthodes traditionnelles de tests quantitatifs. En outre, les installations et fichiers 3D ont été préservés pour d'éventuelles utilisations futures.

## **5. PLAN DU MÉMOIRE**

Ce mémoire est organisé en trois chapitres distincts. Le premier chapitre présente un article scientifique qui détaille la mise au point d'une installation visant à reproduire au mieux la respiration humaine, afin d'étudier les effets thermiques des fuites d'une pièce faciale filtrante (PFF) N95 sur deux systèmes : un plan et un mannequin. De plus, quelques résultats préliminaires sont présentés.

Le deuxième chapitre complète le premier en exposant le protocole utilisé pour la collecte de données sur les deux systèmes initiaux, ainsi qu'un aperçu des bases de données créées. De plus, deux méthodes utilisant l'imagerie IR et des modèles d'IA pour localiser et quantifier les fuites d'une PFF N95 dans un environnement contrôlé y est proposée.

Enfin, le dernier chapitre présente un second article scientifique. Celui-ci détaille la base de données complète issue de tests réalisés sur des participants humains pour l'étude de la détection des fuites dans les pièces faciales filtrantes N95. Cette base de données inclut des vidéos RGB, IR et les résultats des QNFT. L'article présente également en détail le protocole utilisé, l'ensemble des données collectées, ainsi que les modalités pour accéder à cette base de données.

Pour conclure, une synthèse générale des travaux réalisés et des résultats obtenus sera présentée. Cette conclusion mettra en avant les contributions de l'étude, identifiera ses limites, et abordera les perspectives ainsi que les prochaines étapes pour continuer à faire progresser ce projet et cette technologie.

Concernant la bibliographie, elle sera globale à tout le document et englobera la bibliographie pour l'introduction, pour les deux articles, pour le chapitre 2, ainsi que pour la conclusion. Certains éléments de la revue de littérature initiale seront intégrés dans les revues de littérature des deux articles présentés. De plus, les sigles et abréviations seront redéfinis dans chaque article. En raison du format bilingue du mémoire, ces sigles et abréviations peuvent apparaître en anglais ou en français (voir liste des abréviations, sigles et acronymes).

**CHAPITRE 1 :**  
**UN BANC D’ESSAI POUR REPRODUIRE LA RESPIRATION HUMAINE :**  
**ÉVALUATION DES EFFETS THERMIQUES DES FUTES DES PIÈCES**  
**FACIALES FILTRANTES N95 – RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES**

**Titre : A Test Bench for Replicating Human Breathing: Evaluating Thermal Effects  
of N95 Filtering Facepiece Respirator Leaks – Preliminary Findings**

G. Marchais<sup>1</sup>, B. Topilko<sup>1</sup>, M. Arbane<sup>1</sup>, J. Brousseau<sup>1</sup>, C. Brochot<sup>3</sup>, Y. Yaddaden<sup>1</sup>,  
A. Bahloul<sup>1,3</sup>, X. Maldague<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université du Québec à Rimouski, Rimouski, Canada

<sup>2</sup>Université Laval, Québec, Canada

<sup>3</sup>Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité au travail, Montréal, Canada

*Conférence : 9<sup>th</sup> International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK  
2024) – Soumis le 9 août 2024*

## **1.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU PREMIER ARTICLE**

À la suite de la pandémie de COVID-19, il est apparu important de développer des méthodes alternatives pour vérifier l’ajustement d’une pièce faciale filtrante (PFF). La technologie infrarouge (IR), prometteuse dans l’évaluation de l’ajustement d’une PFF, nécessite encore une étude approfondie de l’effet thermique d’une fuite d’une PFF N95. Cette étude pilote vise à concevoir un banc d’essai capable de reproduire la respiration humaine, en se concentrant sur trois aspects : le débit d’air, la température et la génération de particules. Toutefois, l’aspect humidité n’est pas reproduit dans cette étude. Pour y parvenir, le

simulateur de respiration ASL 5000<sup>®</sup>, une chambre de chauffe et un filtre HEPA ont été utilisés. Ces trois aspects ont été validés par divers tests sur le banc d'essai. L'objectif principal de ce banc d'essai est d'évaluer l'impact thermique des fuites d'une PFF N95 sur deux dispositifs de test différents conçus pour cette étude : un plan et un mannequin. L'impact thermique des fuites a été capturé à l'aide d'une caméra IR. De plus, un compteur de particules, l'instrument PortaCount<sup>®</sup>, a été intégré au banc d'essais pour quantifier les fuites des PFF N95 à titre de référence. Dans un avenir proche, ce banc d'essai permettra le développement de méthodes pour localiser et quantifier les fuites des PFF N95, qui seront ensuite appliquées à des sujets humains.

Cet article, intitulé « *A Test Bench for Replicating Human Breathing : Evaluating Thermal Effects of N95 Filtering Facepiece Respirator Leaks – Preliminary Findings* », a été soumis le 9 août 2024 à la conférence 9<sup>th</sup> *International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK 2024)*. Tous les auteurs de cet article font partie de l'équipe de recherche travaillant sur le projet plus global visant à localiser et quantifier les fuites d'une PFF N95 par imagerie infrarouge et par intelligence artificielle. Les trois premiers auteurs sont des étudiants à la maîtrise à l'UQAR, tandis que les cinq auteurs suivants sont des professeurs ou des chercheurs.

En tant que premier auteur, j'ai conduit la majeure partie des recherches pour cet article et rédigé l'intégralité du texte. Barthélemy Topilko, second auteur, m'a apporté des idées et des conseils pour la conception des pièces du banc d'essai. Mohamed Arbane, troisième auteur, m'a guidé dans la rédaction de cet article, mon premier article scientifique. Il m'a aussi aidé à utiliser le logiciel *Overleaf* et ses différents outils, et m'a conseillé sur les conférences appropriées. Le professeur et chercheur, Jean Brousseau, quatrième auteur, a révisé plusieurs fois l'article et a dirigé l'écriture lors de réunions hebdomadaires. La chercheuse, Clothilde Brochot, cinquième auteure, m'a conseillé sur l'utilisation de certains instruments tels que le compteur de particules PortaCount<sup>®</sup> et le simulateur respiratoire ASL 5000<sup>®</sup>, afin de collecter des données les plus fiables possibles. Elle a également réalisé une partie de la revue de la littérature au tout début du projet, l'article reprend quelques éléments

de cette revue de la littérature. Le professeur et chercheur, Yacine Yaddaden, sixième auteur, a proposé l'idée originale de la rédaction de cet article pour présenter le banc d'essai. Le chercheur, Ali Bahloul, septième auteur, a fourni le matériel nécessaire à la réalisation du banc d'essai. Le professeur et chercheur, Xavier Maldague, huitième auteur, m'a permis de monter le banc d'essai dans l'un de ses laboratoires et m'a fourni les caméras IR nécessaires. Tous les auteurs ont également participé à la révision de cet article et à des réunions hebdomadaires pour me conseiller sur cet article.

## **1.2 A TEST BENCH FOR REPLICATION HUMAN BREATHING: EVALUATING THERMAL EFFECTS OF N95 FILTERING FACEPIECE RESPIRATOR LEAKS – PRELIMINARY FINDINGS**

### **1.2.1 Abstract**

Following the COVID-19 pandemic, it seemed important to develop alternative methods for verifying the fit of a filtering facepiece respirator (FFR). Infrared (IR) technology, promising in the assessment of the fit of a FFR, still requires a thorough study of the thermal effect of a N95 FFR leak. This pilot study aims to design a test bench capable of replicating human breathing, focusing on three aspects: airflow, temperature, and particle generation. However, the humidity aspect is not replicated in this study. To achieve this, the ASL 5000<sup>®</sup> Breathing Simulator, a heating chamber, and a HEPA filter were employed. These three aspects were validated through various tests on the test bench. The primary objective of this test bench is to assess the thermal impact of leaks from an N95 FFR on two different test devices designed for this study: a flat model and a static advanced headform (StAH). The thermal impact of the leaks was captured using an IR camera. Additionally, a particle counter, the PortaCount<sup>®</sup> Instrument, was integrated into the test bench to quantify N95 FFR leaks as a reference. In the near future, this test bench will enable the development of methods to locate and quantify N95 FFR leaks, which will subsequently be applied to human subjects.

*Keywords:* Occupational Health and Safety, Respiratory protection, Infrared imaging, Quantitative Fit Testing, Artificial human breathing, N95 FFR Leak

## 1.2.2 Introduction

### 1.2.2.1 Literature Review

Many issues have been highlighted in the wake of the global COVID-19 pandemic, such as the filtering facepiece respirator (FFR) fit for healthcare professionals. Indeed, before each use of an FFR, the wearer must carry out a Fit Check, which consists of using different tests (positive pressure and negative pressure tests) to check the airtightness of an FFR. Regli et al. [10] have shown that this Fit Check is unreliable in detecting proper fit or leaks. Before COVID-19, Huh et al. [8] already questioned the accuracy (<50%) of this fit check and showed that many users do not perform an adequate verification.

For N95 FFR, the biggest contributory factor to the loss of protection is a leak through the face seal [14,15]. This implies that the protection offered by an FFR is significantly affected by the impaired fit between the FFR and the face [16]. Quantitative or qualitative methods can determine FFR fit: Quantitative Fit Testing (QNFT) or Qualitative Fit Testing (QLFT). These methods are used for training and enable workers to choose the FFR best suited to their face. Furthermore, none of the current methods can identify the position and extent of leaks. It seems essential to find alternative methods to conventional fit testing and fit checking [7] by simplifying, shortening, visualizing, and quantifying the N95 leaks, the avenue is to use infrared (IR) technology.

There is relatively little research into using IR imaging to study face seal quality. The principle of using an IR camera to detect seal leaks is based on visualizing changes in facial surface temperature that occur near the FFR face seal and are caused by the flow of hot exhaled air [18]. Dowdall et al. [19] have shown that thermal imaging cameras can detect leaks and assess whether the FFR is properly worn. Roberge et al. [16] experimentally detected exhalation leaks in several subjects using IR imaging. Harber et al. [20] assessed the importance of leaks detected by IR imaging on a four-point scale and established a general relationship between this score and the fit factor (FF). They also showed that it is possible to

identify situations with poor FF. According to Harber et al. [20], there is a relationship between FF and leak detection using IR imaging. Still, this study is not sufficient to allow IR imaging to supplant QNFT. Most recently, Siah et al. [22] have shown that IR imaging has the potential to play a complementary role in FFR QNFT, particularly with front-line nurses. Chapman et al. [24], as well as Bari et al. [23] have also demonstrated the capacity of IR imaging to locate N95 FFR leak thank to deep neural network architecture using a PortaCount<sup>®</sup> instrument as a reference to ensure the presence of a leak or not. However, no study has yet located and quantified automatically leaks detected by IR imaging.

#### 1.2.2.2 Objectives

With the future aim of locating and quantifying an N95 FFR leak, a more detailed study on a leak thermal impact must be carried out. Objectives of this pilot study are:

- The construction of a test bench reproducing human breathing.
- The design of two test devices wearing an N95 FFR: a flat model and a static advanced headform (StAH).
- A preview of the thermal impact of an N95 FFR leak on several leak scenarios.

Indeed, before working with human subjects, it is necessary to work in a controlled environment, with controlled leaks and a controlled geometry, enabling us to gain a better understanding of the thermal impact of different leak scenarios. Each leak scenario includes one or several leaks, and for each leak, it has got a location and a size. On one hand, the test bench must reproduce accurately human breathing. To validate its capacity to reproduce human breathing, this test bench must be calibrated and validated.

On the other hand, concerning these two test devices wearing an N95, they must be designed to control the number, location, and size of leaks to assess the thermal impact of different leak scenarios. The FLIR X8501sc Infrared Camera (FLIR Systems, Inc., Wilsonville, Oregon, USA) is used in this study to capture the thermal impact of each leak



scenario. In addition, a PortaCount<sup>®</sup> Instrument Model 8038 (TSI Incorporated, Shoreview, Minnesota, USA) is also used to carry out QNFT on these two test devices to quantify the severity of leaks. This instrument is used as a reference in this study because healthcare, industrial, agricultural workers and many other users frequently need to carry out QNFT with this instrument. Bergman et al. [25,26] have already shown the potential of StAH for assessing fit for some N95 FFR models/sizes carrying out a QNFT on a StAH.

### **1.2.3 Modelling and Design**

#### 1.2.3.1 Functional Analysis

To accurately replicate human breathing, several key aspects for this study must be considered: the breathing airflow, the breathing temperature, and the number of generated particles. The humidity aspect is not replicated in this study, indeed Topilko et al. [27] have shown that humidity does not have influence on thermal impact on a flat model. To address the first aspect: breathing airflow, the Active Servo Lung (ASL) 5000<sup>®</sup> Breathing Simulator (IngMar Medical, Pittsburgh, Pennsylvania, USA) was used. This instrument allows for emulating the breathing patterns of a typical adult, with control over breath rate and minute ventilation (minute ventilation is a measurement of the amount of air that enters the lungs per minute [28]). It operates using a controlled piston mechanism that mimics both inhalation and exhalation.

However, the ASL 5000<sup>®</sup> Breathing Simulator cannot regulate the temperature of breathing. Most machines, such as heated humidifiers, exist to heat the inhaled airflow for humans, but not the exhaled air for a StAH. Consequently, a supplementary system must be devised to heat the exhaled air flow without affecting the temperature of the inhaled airflow. Notably, the investigation of the N95 FFR leaks relies on temperature differentials [16]. These variations stem from disparities between exhalation temperature (approximately at body temperature [18]) and inhalation temperature (at ambient temperature).

Concerning generated particles, it is imperative to establish a sealed and airtight environment to minimise particle dispersion during exhalation. In fact, reducing the number of generated particles will increase the accuracy of the Fit Factor (FF). Therefore, including a filtering component is essential to trap particles generated during inhalation.

Fig.1.1 illustrates a simplified closed system that replicates human breathing responding to these three aspects. A valve connection has been engineered to facilitate directional airflow within the system. This Figure also shows these two test devices, the flat model (1) and the StAH (2), used at the end of the system. These test devices will enable the creation of different leak scenarios, which will be captured thanks to the IR camera.

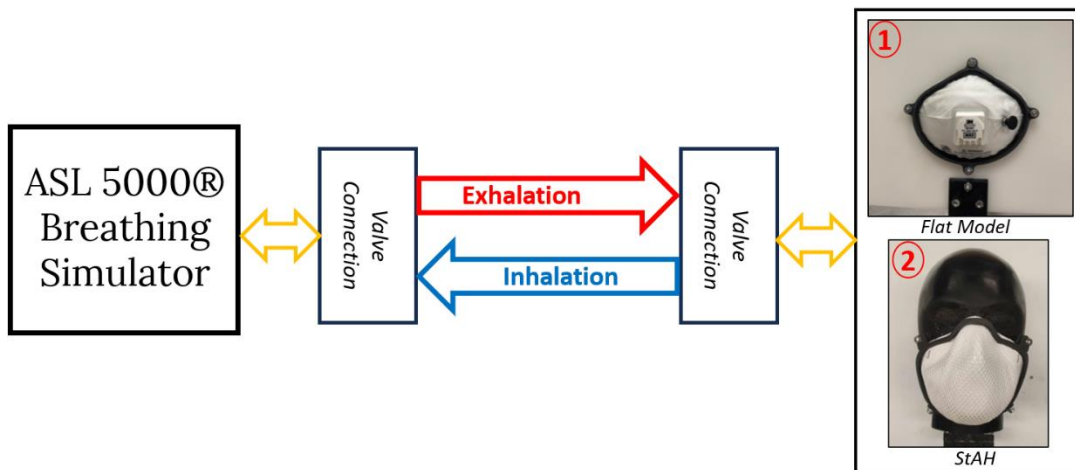


Figure 1.1 : Overview of the proposed test bench

### 1.2.3.2 Test Bench

The test bench was designed using a CAO software, SolidWorks® 2022 (Dassault Systems, Waltham, Massachusetts, USA), incorporating all essential components illustrated in Fig.1.2.

At the beginning of the system, the ASL 5000® Breathing Simulator (1), is linked to a High Efficiency Particulate Air (HEPA) filter (2) that effectively captures particles within

the closed system. Then the airflow traverses a first valve connection (3), crafted with Mask Replacement One-way Valves and 3D-printed components, guiding the flow precisely. Following this path, the airflow enters a heating chamber (4), custom-made with dual incandescent bulbs and twin fans to ensure uniform air heating. The chamber's operation is governed by a precise thermostat, the DIGITEN DHTC-1011 Temperature Controller, ensuring a stable expiring temperature while maintaining the internal temperature below 85°C to safeguard against the degradation of 3D printing components. The heating chamber has a volumetric capacity of 2,5 litres (approximately five exhalations [29]), paired with the 40W heating power of the bulbs. This combination ensures consistent temperature maintenance within the chamber, which is vital for accurate testing protocols with a constant breathing temperature. Exiting the chamber, the airflow encounters another valve connection, linked to both the inhalation flexible, maintained at ambient temperature, and the test device in this picture: the flat model (6).

A wooden board (5) was introduced to the installation to enhance testing precision, effectively isolating the test device from heating elements such as the chamber, the ASL 5000<sup>®</sup>, and the computers. This isolation facilitates IR visualisation, allowing precise temperature monitoring of N95 leaks. Enabling this visualisation is a fundamental aspect of the test bench. This is made possible by including the IR camera (7), which is widely recognised for its precision, exceptional performance, and high acquisition frequency. It is an essential tool for conducting a thorough study of the thermal impact of a scenario.

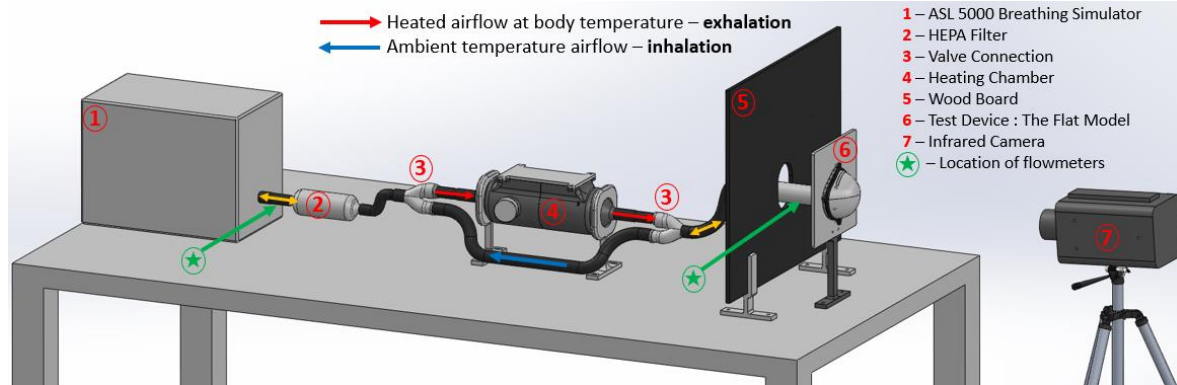


Figure 1.2 Complete test bench modeling

### 1.2.3.3 Test Devices

Once the test bench is built to replicate human breathing, it becomes imperative to design test devices for studying the thermal impact of N95 leak. These test devices, comprising a flat model ((1) in Fig.1.3) and a StAH ((2) in Fig.1.3), must meet specific criteria: controlling the number of leaks, size, and location. High-density polyethylene (HDPE) was selected for the flat model (30cm×30cm) to achieve this. HDPE offers a thermal conductivity ranging between 0,4 and 0,43  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$  [30], aligning closely with the skin's thermal conductivity of 0,4 to 0,45  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$  [31]. The exact composition of the StAH remains unknown, but it primarily comprises rubber.

Each test device, as depicted in Fig.1.3, consists of three components: a holed piece (red), a clamp (green) and an FFR N95 (white), designed to integrate seamlessly with each test device. To achieve this precision, the Creaform3D C-Track 780 HandyProbe scanner (Creaform, Lévis, Quebec, Canada) was employed to scan the StAH and its meshing has been used on SolidWorks® 2022. Furthermore, an N95 geometry has been projected on this meshing to design some pieces which fit perfectly with this StAH. For each case, the holed piece is in contact with the test device, with the flat model, this contact has been carried out with 4 bolts and for the StAH with a fixative silicone.

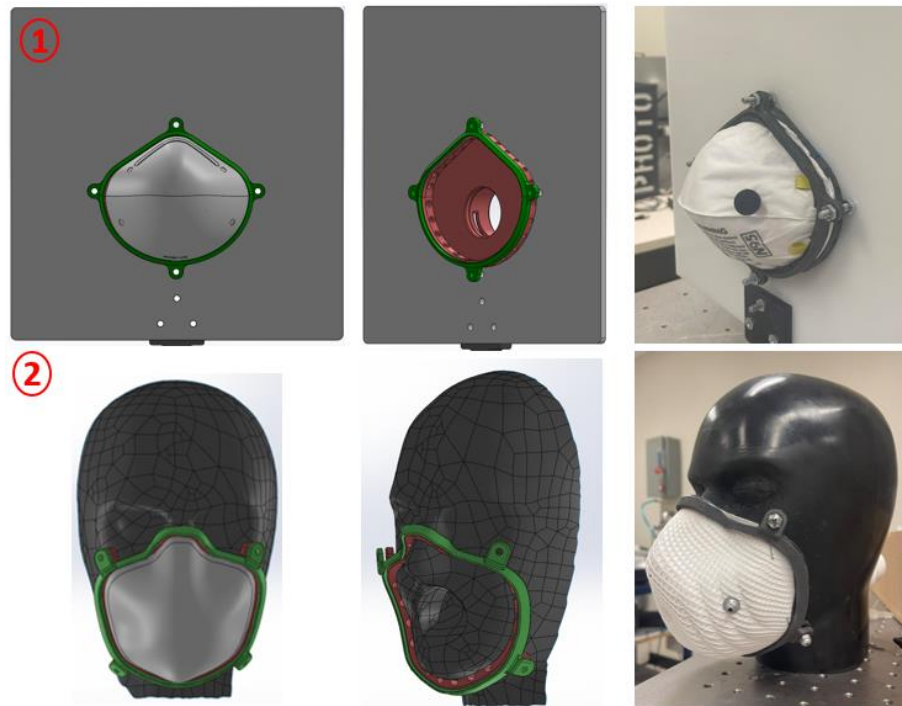


Figure 1.3 Modelling and design of two test devices

On one hand, the holed piece in red in the Fig.1.3 enables the creation of diverse leak scenarios, with each scenario specifying the number, size, and location of leaks. The holed piece for each test device is shown in the Fig.1.4a for the flat model and in the Fig.1.4b for the StAH. Each hole of this piece has a diameter equal to 5 mm and can be plugged with a plug (Fig.1.4c) or opened with a tube. Concerning the plug, it is designed with O-ring (Fig.1.4c) to ensure airtightness. For the tube, standardised needles have been used to create controlled diameter leaks as have done Rengasamy et al. [32], each standardised tube has been cut and sanded from a standardised needle (Fig.1.4d). Incorporating these standardised tubes with gum in a hole, ranging in diameter from 3,5 mm to 0,84 mm (8G to 18G), with a length equal to 1 cm, it allows variability in leak size. These tubes, during a scenario test, must be tangent to the test device to simulate real-life leak situation. On the other hand, the clamp in green in the Fig.1.3 secures the N95 FFR onto the perforated piece, ensuring airtightness during testing and thus providing complete control over leaks.



Figure 1.4 Control of number, size and location leak(s)

#### 1.2.3.4 Design and Assembly

Most of the pieces have been printed with the Ultimaker S5 3D Printer (Ultimaker B.V., Utrecht, Netherlands): valve connections, supports, and plugs. However, the pieces requiring very high print and high-temperature resistance (the heating chamber, holed pieces and clamps) were printed in Nylon on a Formlabs Fuse 1 3D Printer (Formlabs Inc., Somerville, Massachusetts, USA). All pieces that need to be airtight are assembled with hose clips. The final test bench is illustrated in Fig.1.5.

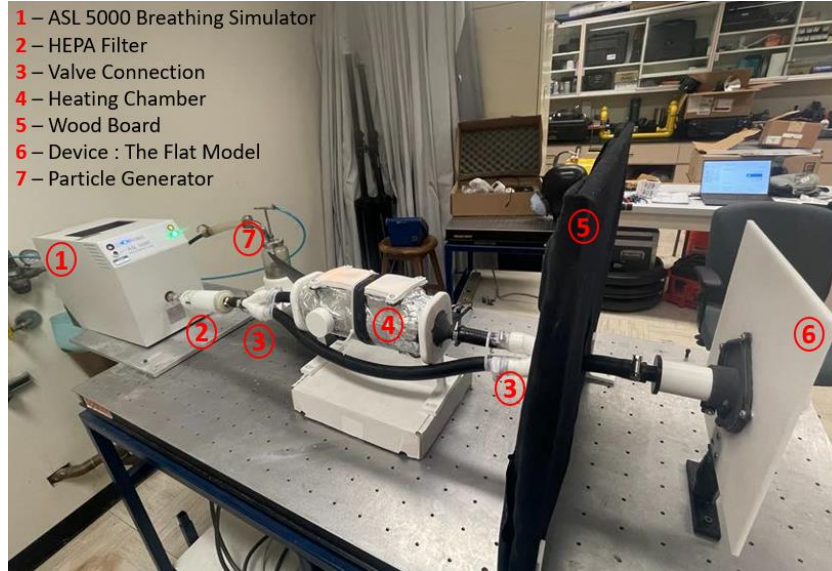


Figure 1.5 Final test bench

## 1.2.4 Experimental Validation

This work is focused on the test bench validation, and this paper is mainly focused on these three aspects: the breathing airflow, the breathing temperature, and a limited number of particles generated.

### 1.2.4.1 Breathing Airflow

An experiment was conducted on the test bench to validate the first aspect. Instead of using the ASL 5000<sup>®</sup> Breathing Simulator, a constant input flow of pressurised air was employed. The objective of this test was to evaluate the integrity of the closed system and ensure the absence of leaks. Two flowmeters, Model 4040 Series (TSI Incorporated, Shoreview, Minnesota, USA) were strategically placed, spotted by a (★) in the Fig.1.2. By monitoring the flow rates at these critical points, we could ascertain the system's airtightness and ability to maintain a consistent airflow without any losses. The test aimed to replicate normal conditions using a flow range of 0-50L/min. A balanced flow between input and output, as illustrated in the Fig.1.6, confirmed the absence of leaks in this closed system.

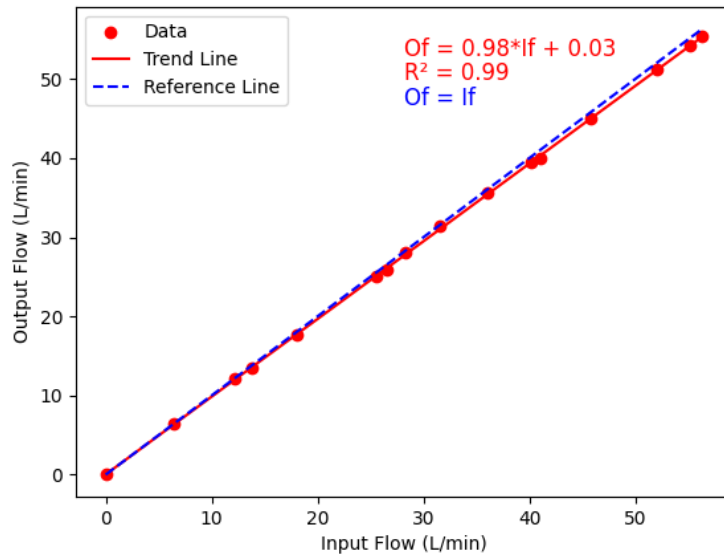


Figure 1.6 Output flow rate as a function of input flow rate

#### 1.2.4.2 Breathing Temperature

Once the airflow aspect is validated, assessing the adequacy of the released breathing temperature becomes necessary. To achieve this, it is crucial to replicate normal breathing conditions, encompassing both inhalation and exhalation. Indeed, maintaining a constant airflow using pressurised air, as used in 1.2.4.1, can only mimic pure exhalation, without replicating the complexities of human respiration. Therefore, to accurately simulate human breathing, it is essential to incorporate mechanisms that enable both inhalation and exhalation, ensuring a realistic representation of breathing temperature. The ASL 5000<sup>®</sup> Breathing Simulator has been used, and an adult normal pre-recorded scenario in the software has been selected. Then, it is possible to control the Breath rate (Br) and the Minute Ventilation (MV) on the software. MV is calculated using the following formula (1). A normal adult Br is comprised between 12 and 20 breaths per minute [33] and the mean Tidal Volume TV (the volume of air that moves into and out of the lungs during normal breathing)



is around 0,66 Litres for a man [29]. For a breathing rate equal to 15 breaths per minute, MV is equal to:

$$\begin{aligned}
 MV &= Br \times TV \\
 MV &= 15 \times 0,66 \\
 MV &= 10L/min
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

These parameters will be used to simulate normal breathing throughout the study on the ASL 5000<sup>®</sup> Software. The Fig.1.7 shows the pre-recorded breathing pattern used: the instantaneous flow depending on time. It is a periodic but non-sinusoidal cycle, which closely resembles the human breathing cycle [57]. However, the ASL 5000<sup>®</sup> software does not provide a mathematical function to characterize this cycle.

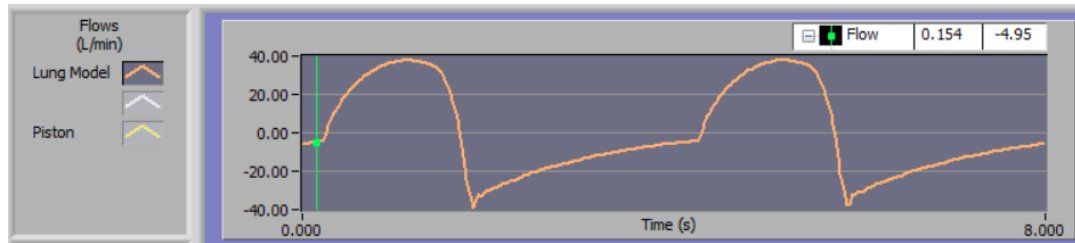


Figure 1.7 Breathing pattern on the ASL 5000<sup>®</sup> software

Once this normal breathing setup is completed, it is necessary to adjust the heating chamber thermostat to achieve the final breathing temperature. Unfortunately, thermal sensors have response times that are too slow to measure and follow the temperature changes between inhalation and exhalation. Instead of using sensors, the thermal response was recorded using IR videos of two human subjects wearing an N95 FFR during normal breathing. Indeed, an IR camera has a response time small enough to detect and track the temperature variations of the mean temperature of region of interest (ROI) located on the N95 FFR. By analysing the IR images, with the FLIR software, ResearchIR Max software (FLIR Systems, Inc., Wilsonville, Oregon, USA), it was possible to calibrate the thermostat to control the exhalation temperature. Fig.1.8 shows the temperature variations measured on N95 ROI worn by two consenting human subjects and the N95 ROI installed on the flat

model test device when the thermostat is set to 80°C. As observed in Fig.1.8, the temperature differentials  $\Delta T$  ( $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$ ) obtained are quite similar. However, it can also be observed that there is a difference between the breathing patterns. Two elements can be stated to explain those differences. Han et al. [34] have shown that an awareness of the recording of breathing caused an increase of TV. Indeed, a higher tidal volume (TV) results in a greater volume of exhaled and inhaled air, leading to a more intense flow of hot and cold air passing through the N95 FFR. This, in turn, causes more significant warming and cooling effects. Concerning the breath rate, the short difference between the two subjects can be explained by the fact that the breath rate of a human is between 12 and 20 cycles per minute, while a breath rate equal to 15 has been selected in the ASL 5000<sup>®</sup> Software. Finally, concerning the breathing pattern, Benchetrit [35] has demonstrated the existence of individual variations in breathing patterns among human subjects. This explains the differences in breathing patterns between these two individuals and the selected breathing pattern in the ASL 5000<sup>®</sup> software.

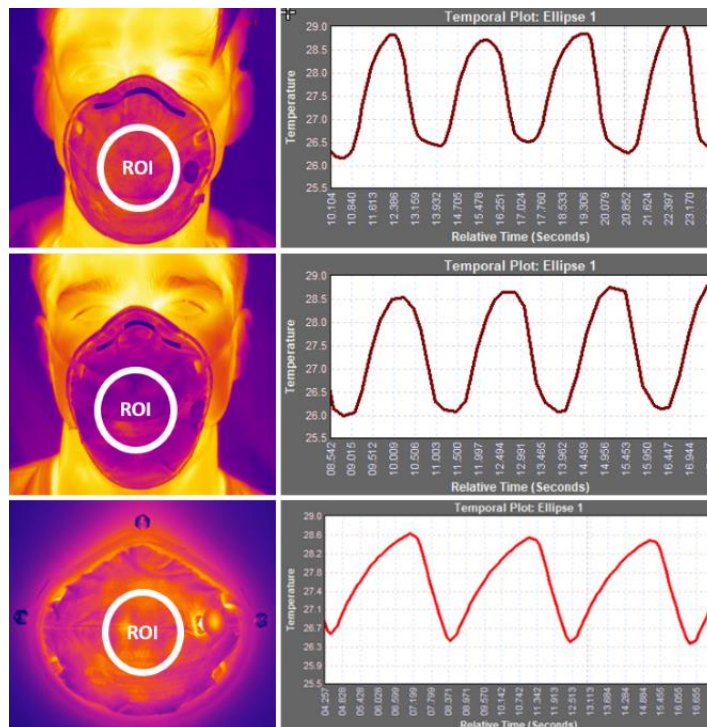


Figure 1.8 Temperature variations of ROI during a normal breathing

#### 1.2.4.3 Number of Generated Particles

To address the final aspect, ensuring the absence of generated particles or any particles within the system was crucial. To achieve this, all openings in the holed piece were sealed thanks to corks to prevent any potential leaks and the ingress of particles. The PortaCount® instrument was used for this purpose, specifically focusing on its real time monitoring tab within the software. This feature enabled us to accurately measure the particle count within the FFR and in the ambient air. Comprehensive tests were conducted using both test devices: the flat model and the StAH. A particle generator, the 24-Jet Collision Nebulizer (BGI Inc., Waltham, USA) (piece (7) in the Fig.1.5), has been used to generate enough particles. This control of particle generation is also part of the establishment of a controlled environment, for that a constant pressure ( $P = 30$  PSI) and a constant 2,3% NaCl solution concentration ( $c=0,05\text{g/mL}$ ) have been used. The Fig.1.11a shows a minimal presence of particles (around one particle/cm<sup>3</sup>) in the N95 FFR using the StAH (Fig.1.9b). While there are many particles in ambient air (around 10000 particles/cm<sup>3</sup>), this particle level has been reached for each test to reduce interference. Even if the recommended particle level (1500 particles/cm<sup>3</sup>) has been exceeded, this high particle concentration does not affect the QNFT results [52]. The FF, which represents the ratio between the number of particles in the ambient air and those within the FFR, enables the assessment of FFR fit. The PortaCount® instrument used in N95 mode for this study has a fit factor (FF) range of 1 to 200. For an N95 FFR, the success criterion to pass a QNFT is an FF higher than 100 [7].

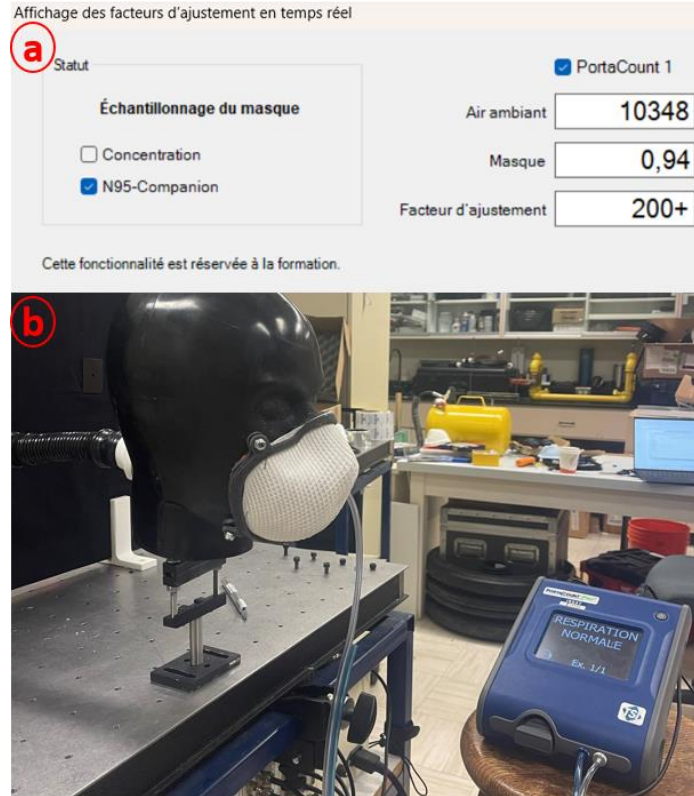


Figure 1.9 Validation of limited number of generated particles

## 1.2.5 Preliminary Results and Discussion

### 1.2.5.1 Visualisation

Initial tests can be conducted once the test bench is set up, validated, and capable of simulating human breathing. For each test, a leak scenario is created as described in section 1.2.3.C, and it can be tested on both devices. The potential leak locations are shown in Fig.1.10. Each device is divided into four quadrants, with each quadrant (red) further subdivided into several holes (black). Each hole can accommodate standardized tubes ranging in diameter from 3,5 mm to 0,84 mm.

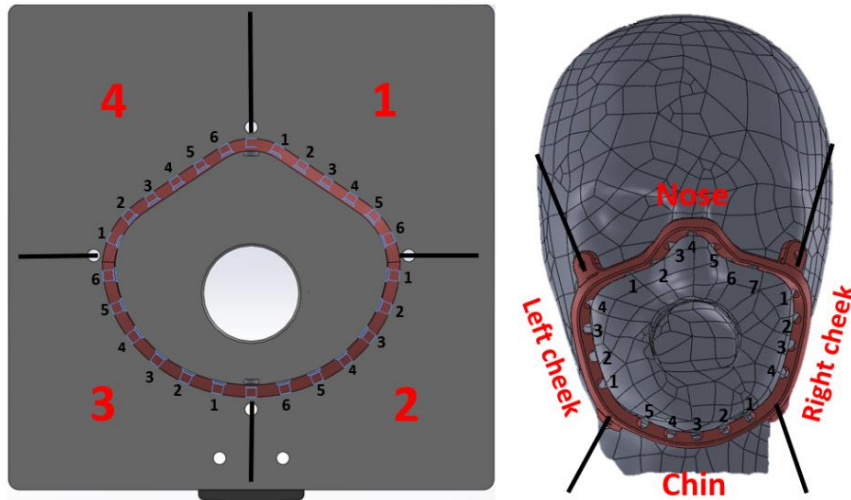


Figure 1.10 Location of Leak on both Test Devices

For the flat model, only one 30-second IR video is recorded, whereas for the StaH model, four 30-second IR videos are captured in different positions: (a) the front of the face, (b) the right side of the face, (c) the left side of the face, and (d) the bottom of the face mask with the head facing upward. To fully capture the face seal, it is necessary to record four different views [22]. Each video is recorded with a sampling frequency equals to 30Hz; this frequency enables a precise temperature variation monitoring. Concerning the PortaCount<sup>®</sup> Instrument, it is used to assign each scenario an FF, enabling the quantification of leak severity. Only one exercise (Normal Breathing) is carried out for 1 minute and 30 seconds. Each scenario underwent a QNFT including this exercise to assign the test an FF. The Fig.1.11 illustrates the necessary views and five different leak scenarios on test devices. Scenarios No 1 and 4 are scenarios without leak (Fig.1.11.1 & Fig.1.11.4) on both devices. Whereas scenario No 2,3 and 5 (Fig.1.11.2 & Fig.1.11.3 & Fig.1.11.5) are scenarios with two leaks, these leaks have, in these scenarios a different size. For example, the fifth scenario (Fig.1.11.5), two leaks are in the nose quadrant, the first one in the third hole with a diameter equal to 2.3mm of and the second leak in the fifth hole with a diameter equal to 3,5mm. These first results show that the FF decreases when the size of the leak increases, this agrees well with the results of the studies cited in 1.2.2.1. A greater thermal impact for a larger leak

is also remarkable. These results provide a promising beginning for visualising various leaks according to their number, size, and position.

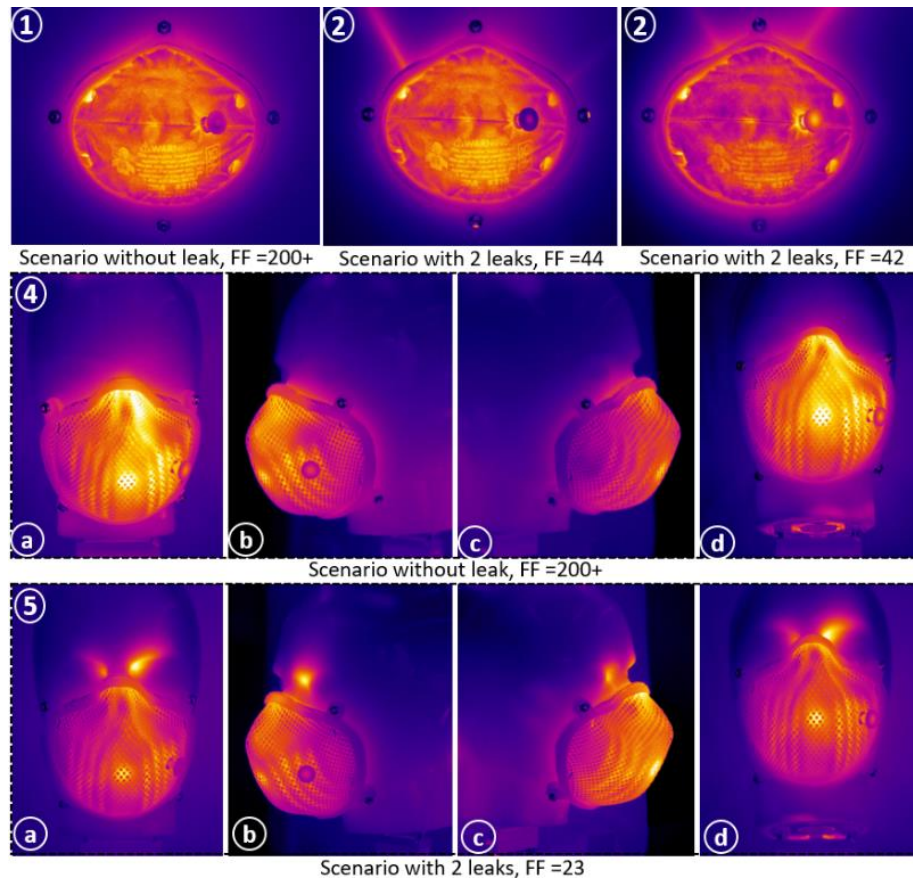


Figure 1.11 Many leak scenarios with a FF labelling

#### 1.2.5.2 Discussion

Subsequently, a more in-depth study on various leak scenarios will be carried out to assess the influence of the number, location, and size of leaks on the thermally affected area and on the FF. Indeed, in the Fig.1.11, a difference in thermal impact between the flat model and the StAH is perceptible, it can be explained by the difference in relief between these two test devices. The upcoming study will enable a better understanding of leaks and the development of methods to locate and quantify N95 leaks. Multiphysics models, using COMSOL Multiphysics® will be developed to validate these future results.

Deep Learning Models will be developed to recognise leak automatically, location and severity. These models on these two test devices will enable the study of the feasibility of detecting efficiently an N95 leak. Once these methods are proven and validated, a study on human subjects will be conducted, with the realisation of a complete database composed of IR videos, RGB videos and QNFT of human subjects wearing an N95. Data will be collected following a detailed protocol.

However, it is important to note that this pilot study is being carried out on two test devices that react differently to heat and temperature variations than a human subject.

### **1.2.6 Conclusion**

This pilot study shows the implementation of a complete test bench enabling it to reproduce a human breathing. This paper also shows the design of two test devices (a flat model and a StAH) allowing the creation of different leak scenarios with total control of calibrated leak(s) (number, location, size). This test bench combined with these two test devices shows that the infrared technology can present many advantages, which could be beneficial for leak detection. Indeed, as shown in first results, the IR technology enables a leak visualisation, a simplification, and a shortening of leak detection. This pilot study enables in a near future to work on a potential correlation between the thermal impact of a leak and the FF, this correlation would enable the quantification of the leak. A Multiphysics study will also be carried out in the future to validate the experimental results.

*The data collected through this test bench will be further elaborated in the next chapter.*





## **CHAPITRE 2 :**

### **DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE POUR LA LOCALISATION ET LA QUANTIFICATION DES FUITES D'UNE PIÈCE FACIALE FILTRANTE N95**

#### **2.1 COLLECTE DE DONNÉES PLAN ET MANNEQUIN**

La mise en place du banc d'essai pour simuler la respiration humaine, ainsi que l'utilisation des dispositifs (plan et mannequin) permettant un contrôle complet des fuites, ouvre la voie à une étude thermique détaillée des différentes situations de fuite sur ces deux dispositifs équipés de PFF N95. Pour le plan, le modèle 8210 de 3M a été utilisé. En revanche, pour le mannequin, le modèle 2200 de Moldex a été préféré. Le choix de ces deux modèles différents s'explique par leur géométrie, qui correspondait mieux à l'un ou l'autre dispositif.

Pour mener à bien cette étude, il est important d'établir un protocole afin d'assurer la collecte de données fiables dans des conditions stables. Ce protocole, décrivant les réglages des divers instruments utilisés, ainsi que la procédure pour installer un scénario de fuite(s) et recueillir les données, est présenté en annexe (voir annexe I).

Ce protocole a été testé pour plusieurs scénarios, chaque scénario est numéroté et caractérisé par trois paramètres :

- **Le nombre de fuites**, variant de 0 à 3 selon les scénarios.
- **La position des fuites**, déterminée par l'indexation des quadrants et des trous. Chaque dispositif est divisé en 4 quadrants distincts (chiffres en rouge sur la Fig.2.1), chacun quadrant comportant de 4 à 7 trous (chiffres en noir sur la Fig.2.1).
- **Le diamètre des fuites**, allant de 0,84 mm à 3,5 mm, réalisés à l'aide de 8 aiguilles standardisées pour les seringues.

Concernant ces aiguilles, leur taille est communément désignée par leur calibre en jauge (G). Il existe une équivalence entre le calibre d'une aiguille et son diamètre intérieur.

Le Tableau 2.1 présente cette équivalence pour les 8 aiguilles utilisées. Durant la collecte de données, chaque aiguille est identifiée par son calibre.

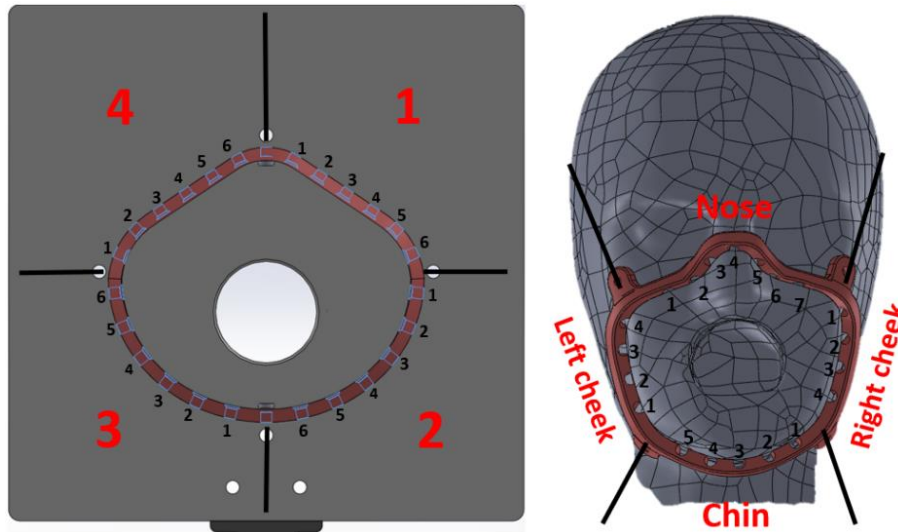


Figure 2.1 Positions des fuites sur les deux dispositifs

Tableau 2.1

Équivalence entre le calibre (G) et le diamètre intérieur (mm) d'une aiguille

Calibre (G)	Diamètre intérieur (mm)
8	3,5
10	3
12	2,3
14	1,6
15	1,32
16	1,2
17	1,12
18	0,84

Chaque scénario est étiqueté de la façon suivante, pour un scénario à 1 fuite, son étiquetage est le suivant : [numéro du quadrant, numéro du trou, calibre de l'aiguille]

Par exemple, sur le dispositif plan, le scénario N°55 comprend 2 fuites. La première fuite est localisée dans le quadrant 1, au trou 4 et le calibre de l'aiguille utilisée est 10G. Pour la deuxième fuite, on a le quadrant 4, le trou 4 et le calibre de l'aiguille 10G. L'étiquetage de ce scénario est le suivant : [1,4,10G] ; [4,4,10G]. Sur le dispositif mannequin, le scénario N°15 comprend 1 fuite dans la région du Nez au trou 2 et le calibre de l'aiguille est 12G. L'étiquetage du scénario N°15 est donc : [Nez,2,12G].

Après avoir créé de façon aléatoire un ensemble des scénarios pour les deux dispositifs, chaque scénario a été mis en place sur son dispositif l'un après l'autre. Monter un scénario signifie insérer les aiguilles dans les bons trous et boucher les trous sans fuite à l'aide de bouchons étanches. Une fois l'aiguille insérée dans le trou, il est important de vérifier sa tangence de la fuite avec le dispositif afin de se rapprocher au plus proche d'une fuite d'un N95 porté par un sujet humain. Pour chaque situation, la tangence est assurée à l'œil nu et à l'aide d'une très fine aiguille à coudre, enfilée dans les aiguilles creuses. L'aiguille à coudre, d'une longueur plus grande que les aiguilles utilisées pour les fuites, ressort du côté du dispositif à l'extérieur de la PFF. Cette aiguille à coudre doit être tangente au dispositif. Cette aiguille va servir de guide pour l'aiguille creuse afin que cette dernière soit également tangente au dispositif. Une fois que ces aiguilles sont montées, la PFF N95 est remontée ainsi que le collier de serrage, l'étanchéité de ce N95 est assurée en tirant fort dessus pour s'assurer qu'elle ne se décroche pas de l'ensemble pièce trouée/collier de serrage. Sur la Fig.1.3, la pièce percée (the holed piece) est représentée en rouge, tandis que le collier de serrage (the clamp) est en vert.

Une fois le scénario installé, cinq QNFT sont effectués pour évaluer l'ajustement du masque N95 sur le dispositif, qui peut être soit le plan, soit le mannequin. Chaque test dure une minute durant laquelle le nombre de particules à l'intérieur et à l'extérieur du masque N95 est échantillonné. À la fin de chaque test, un facteur d'ajustement (FF= Fit Factor) est calculé sur la base de cet échantillonnage. Ce FF permet de quantifier l'ajustement de chaque test.

Réaliser cinq QNFT par scénario permet d'augmenter la fiabilité des résultats et de réduire les erreurs potentielles dues à un test défaillant. Pour chaque scénario, la moyenne et l'écart-type des cinq FF sont calculés. Chaque scénario est ainsi caractérisé par un FF (par exemple : FF = 40), qui quantifie l'ajustement du masque et les informations des fuites créées (par exemple : [1,4,10G] ; [4,4,10G]).

Après ces QNFT, un test infrarouge (IR) est réalisé. Celui-ci consiste à enregistrer une ou des vidéos IR mettant en évidence les fuites éventuelles du dispositif. Ce test IR diffère légèrement entre le plan et le mannequin. Pour le plan, une seule vue suffit pour capturer l'ensemble du joint facial, tandis que pour le mannequin, quatre vues sont nécessaires : de face, à gauche, à droite et au-dessus. Une vidéo IR pour chaque vue est donc enregistrée. Cette vidéo d'une durée de 30 secondes permet l'enregistrement de plusieurs cycles respiratoires. En effet, la consigne de la fréquence respiratoire est égale à 15 respirations/minute, en 30 secondes, chaque vidéo IR capturera environ 7 à 8 respirations complètes.

En résumé, pour chaque scénario, cinq FF, les informations des fuites créées et une ou des vidéos IR (d'une durée de 30 secondes) sont collectées. La collecte de données sur plan a précédé la collecte de données sur mannequin.

## **2.2 BASES DE DONNÉES POUR LE PLAN ET LE MANNEQUIN**

### **2.2.1 Scénario sans fuite**

Le premier scénario des deux bases de données est un scénario ne présentant aucune fuite, celui-ci permet de valider l'étanchéité totale des deux dispositifs. En effet, grâce au mode du PortaCount® « suivi en temps réel », l'étanchéité du dispositif est vérifiée en suivant le nombre de particules en temps réel avec un mode prévu à cet effet, un FF égal à 200+ signifiait une étanchéité suffisante pour réaliser nos tests. Le générateur de particules générerait environ 10000 particules/cm<sup>3</sup>. Sur le plan, lors de ce scénario sans fuite, le nombre de particules à l'intérieur du masque était de 1 particule contre environ 25 particules sur le

mannequin. Cette différence s'explique par la difficulté à assurer une étanchéité sur la géométrie assez complexe du mannequin. Les Fig.2.2 et Fig.2.3 présentent une image de chaque vue des deux scénarios sans fuite pour le plan et mannequin. Un léger réchauffement se produit au-dessus de la PFF dans chacun des cas, cela est dû aux effets convectifs de la respiration. L'air chaud a tendance à monter en raison de la différence de densité entre l'air chaud et l'air froid. Ce flux d'air chaud va donc au bout d'un certain temps réchauffer la partie supérieure du masque.

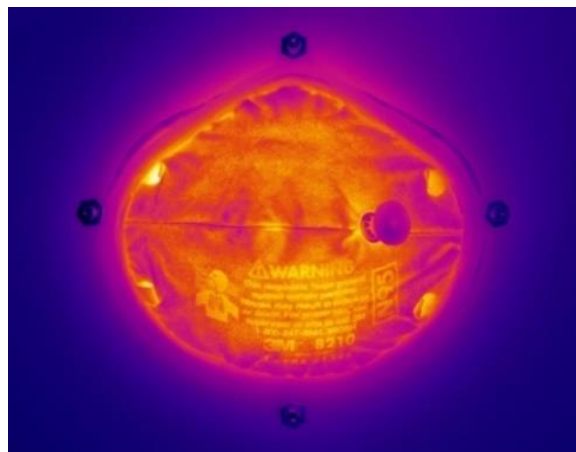


Figure 2.2 Scénario 1 sans fuite sur le dispositif Plan

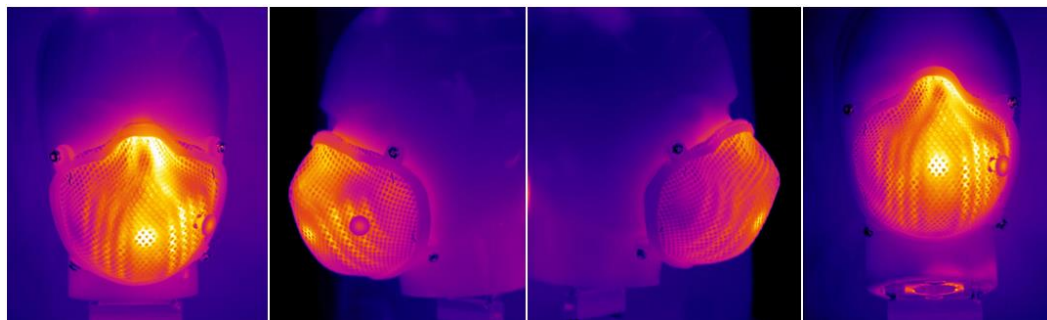


Figure 2.3 Scénario 1 sans fuite sur le dispositif Mannequin

Une fois que l'étanchéité des dispositifs est assurée, les scénarios avec fuites peuvent être créés comme décrit dans la section précédente.

### 2.2.2 Scénario avec fuites

Chaque scénario conçu sur les deux dispositifs a été soumis à un test IR et à cinq QNFT. Pour illustrer cela, prenons le scénario n°77 comme exemple. Les données relatives aux deux fuites pour ce scénario sont les suivantes : [1,5,15G] ; [4,3,8G]. Les résultats des cinq QNFT ont établi un FF moyen égal à 44, avec un écart-type égal à 4,34. La Fig.2.4 présente une image du test IR pour ce scénario, où les deux fuites sont clairement visibles. Il est à noter que la fuite de 8G apparaît plus importante que celle de 15G, ce qui semble cohérent compte tenu de leur différence de diamètre.

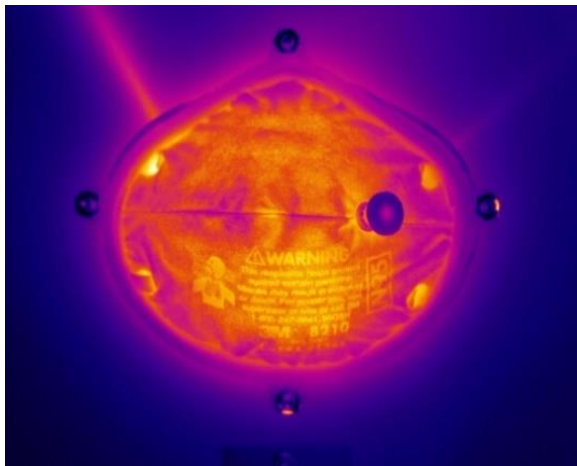


Figure 2.4 Scénario 77 – Plan

Pour le mannequin, examinons le scénario n°20. Les informations relatives aux fuites pour ce scénario sont les suivantes : [N,3,12G] ; [N,5,8G]. Les résultats des cinq tests QNFT ont établi un FF moyen égal à 23 avec un écart-type égal à 1,87. La Fig.2.5 présente une image de chaque vue capturée lors du test IR de ce scénario. Les deux fuites sont clairement visibles ; celle de 8G semble plus importante que celle de 12G, ce qui semble cohérent avec la différence de diamètre.

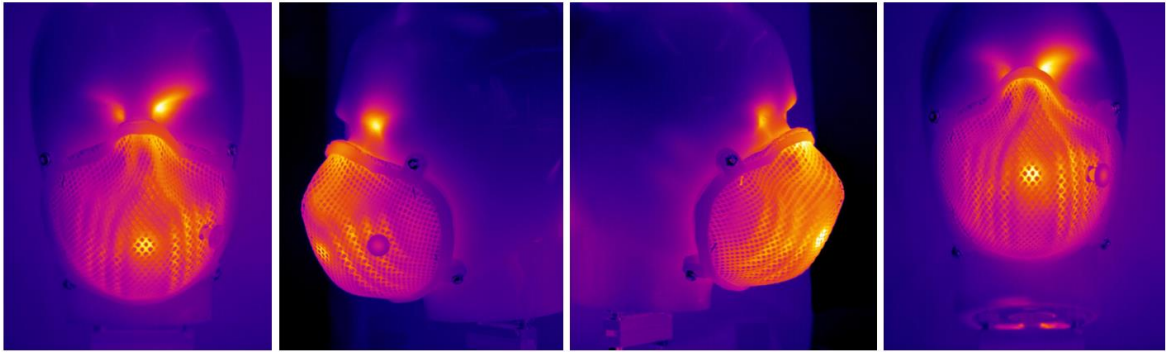


Figure 2.5 Scénario 20 - Mannequin

Dans l'ensemble des scénarios créés, on trouve une diversité dans le nombre de fuites créée, certains ayant une seule fuite et d'autres deux ou même trois fuites. Le Tableau 2.2 présente de manière exhaustive tous les scénarios générés, illustrant ainsi la variabilité des scénarios de fuites créés.

Tableau 2.2

Récapitulatif des scénarios créés pour les deux bases de données

Nombre de scénarios	Plan	Mannequin
0 fuite	2	2
1 fuite	45	15
2 fuites	15	10
3 fuites	5	5
Total	67	32

Tous ces scénarios sont numérotés et comprennent :

- Les informations relatives aux fuites ;
- Les résultats des 5 QNFT sous forme d'un  $FF_{moyen}$  ;
- Les données IR sous forme d'un ou de 4 vidéos de 30 secondes.

Toutes ces données sont enregistrées et stockées sur un serveur à l'UQAR.

La suite des travaux présentés dans ce chapitre 2 propose plusieurs pistes de réflexion visant à développer la méthode complète pour la détection des fuites d'une PFF à l'aide de l'imagerie IR et de l'intelligence artificielle (IA).

### 2.2.3 Intégration des modèles d'intelligence artificielle

À la suite des collectes de données sur les différents systèmes étudiés : plan et mannequin, deux avenues peuvent être étudiées pour intégrer les modèles d'IA en utilisant ces bases de données :

1. Intégrer (avec peu ou sans traitement) les données collectées dans des modèles d'IA (*sous-projet 3*). Les entrées des modèles consisteront en des images IR étiquetées par leur FF (voir Fig.2.6) ainsi que les informations relatives aux fuites créées. L'architecture de modèle d'IA est illustrée sur la figure ci-dessous.

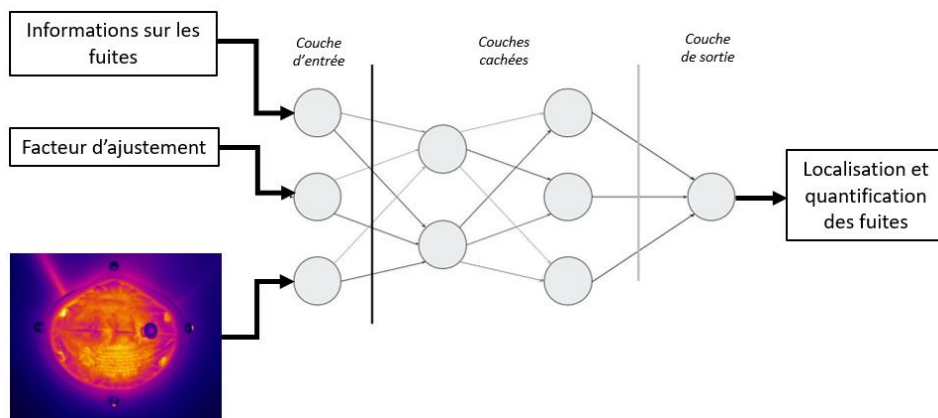


Figure 2.6 Architecture d'un modèle d'IA avec comme entrées les données de la base de données

2. Effectuer un traitement des données IR selon une méthode analytique visant à améliorer la fiabilité des données collectées et à éliminer les éléments non pertinents pour notre étude, tels que le bruit ou les variations de température non dues aux fuites d'une PFF et



intégrer par la suite les données dans des modèles d'IA pour une détection finale plus précise.

Une proposition de la deuxième approche ainsi que ses différentes étapes sont présentées dans la suite de ce mémoire. Elle a été testée uniquement sur un scénario et sur quelques régions d'intérêt (ROI) de celui-ci. Il s'agit d'une piste de réflexion pour la suite du projet de recherche.

### **2.3 PROPOSITION D'UNE MÉTHODE ANALYTIQUE POUR LOCALISER ET QUANTIFIER LES FUITES D'UNE PFF N95 PAR IMAGERIE INFRAROUGE ET PAR INTELLIGENCE ARTIFICIELLE**

Pour détecter et caractériser intégralement les fuites d'une PFF N95, une méthode analytique est proposée, comprenant les étapes suivantes :

- [1]. Capture et division du joint facial en N ROI
- [2]. Extraction et traitement du signal *Température*
- [3]. Exploitation du  $\Delta T$  ( $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$ ) de chaque ROI

#### **2.3.1 Capture et division du joint facial en N ROI**

La détection des fuites d'une PFF N95 par imagerie IR repose sur l'analyse des variations de température au niveau du joint facial [17,18]. Il est donc essentiel de capturer l'intégralité de ce joint pour une détection complète des fuites.

Sur le plan, la capture du joint facial est simple : une seule vue suffit pour couvrir son ensemble (indiqué en jaune sur la Fig.2.7). En revanche, sur le mannequin, quatre vues sont nécessaires pour capturer l'ensemble du joint (Fig.2.8). Une fois ces vues obtenues, il est nécessaire de reconstruire le joint facial en assemblant chaque section du joint capturée sur chaque image. Il faut également faire correspondre les différentes ROI sur les quatre vues. Par exemple, la ROI d'indice 0 est visible sur les vues de face et de droite. Cette

reconstruction peut être facilitée par des repères visibles sur les images, tels que les sangles du masque ou les vis du collier de serrage.

Cette même approche de reconstruction sera également nécessaire pour les sujets humains, car il faut également quatre vues pour capturer le joint facial dans sa globalité.

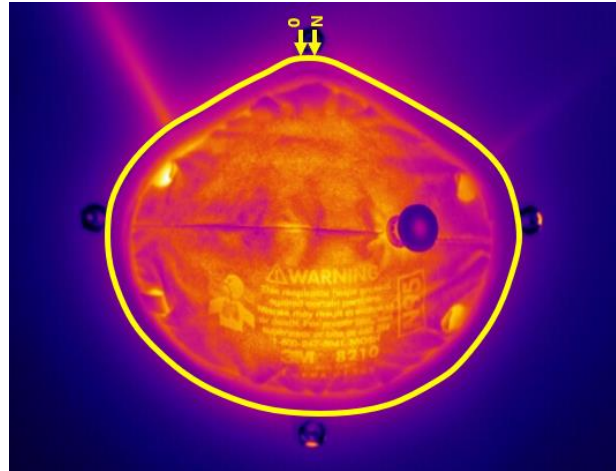


Figure 2.7 Capture du joint facial sur plan

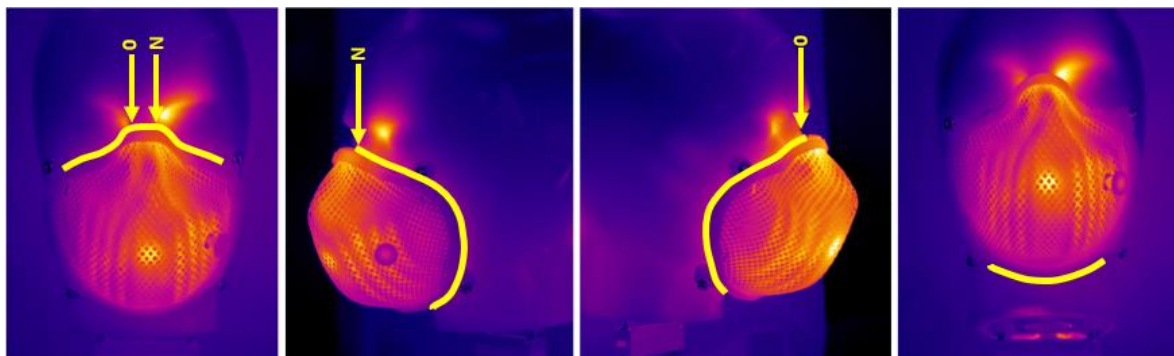


Figure 2.8 Capture du joint facial sur mannequin

Une fois que le joint facial est capturé et reconstruit, il peut être représenté sur une seule ligne, comme le montre la Fig.2.9. Ce joint facial a une longueur totale  $L_j$  (en pixels) et une largeur variable qu'il est nécessaire de fixer. Cette largeur sera fixée par la largeur de la ROI. La prochaine étape consiste à diviser ce joint facial en  $N$  ROI. Ce découpage du joint

facial en  $N$  ROI permet d'étudier le signal de température sur chaque ROI, en se concentrant plus particulièrement sur les variations de température.

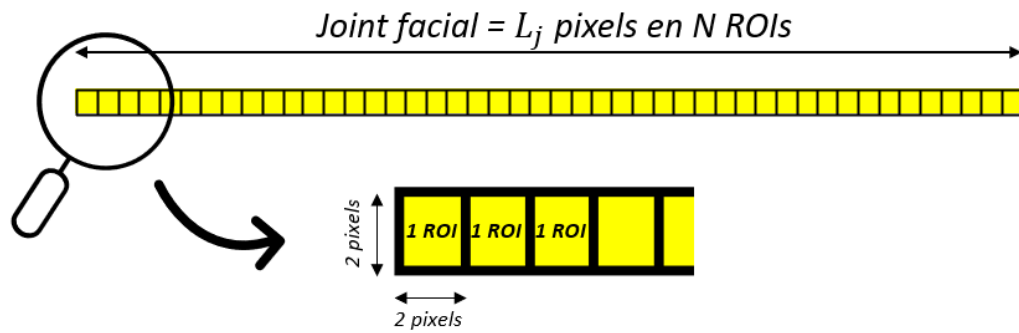


Figure 2.9 Méthode pour la division du joint facial

La valeur de  $N$  dépend de la longueur totale du joint facial  $L_j$ , qu'il est nécessaire de calculer. Cette valeur  $L_j$  est influencée par la résolution de la caméra utilisée. En effet, une caméra haute résolution, telle que celle utilisée dans nos travaux (1280\*1024 pixels), permet d'obtenir une valeur  $L_j$  suffisamment grande pour une analyse détaillée. À l'inverse, une caméra de plus basse résolution verra sa valeur de  $L_j$  du fait d'un nombre de pixels sur l'image plus bas.  $N$  et  $L_j$  sont donc directement liés, plus  $L_j$  est grand, plus nous pourrions subdiviser ce joint facial, et ainsi augmenter la valeur de  $N$ .

En ce qui concerne les ROI, il est crucial que chaque ROI comporte au moins deux pixels. En effet, si une ROI ne comprenait qu'un seul pixel (c'est-à-dire une ROI de taille 1x1 pixel), une défaillance de ce pixel pourrait conduire à des résultats erronés dans la détection des fuites. Afin de minimiser l'impact des pixels défaillants, la taille minimale d'une ROI doit être de deux pixels (longueur\*largeur = 2\*1 ou 1\*2 pixels). Une ROI de taille 2\*2 pixels, totalisant ainsi 4 pixels, comme illustrée dans la Fig.2.9, semble représenter un bon compromis pour limiter les erreurs et accroître la fiabilité des détections.

Une fois que la longueur du joint facial  $L_j$  est connu et la taille d'une ROI fixé, le nombre de ROI  $N$  se calcule comme ci-dessous :

$$N = \frac{\text{Longueur du joint facial}}{\text{Longueur d'une ROI}} = \frac{L_j \text{ (pixels)}}{2 \text{ (pixels)}} = \frac{L_j}{2} \quad (2)$$

Cette valeur  $N$  sera à calculer à chaque capture du joint facial que cela soit sur plan, mannequin ou sujets humains. Sur le plan, cette valeur sera quasiment invariable, car il n'y a aucun déplacement du dispositif entre les scénarios et le joint facial garde donc sa longueur constante pour chaque test. Pour le mannequin et les sujets humains, il est nécessaire de recalculer cette valeur pour chaque test car, une prise de vue du joint facial plus ou moins proche de la caméra exerce une grande influence sur la longueur du joint facial  $L_j$ .

Le joint facial étant à présent divisé en  $N$  ROI égaux en taille ( $2*2$  pixels), un traitement du signal *Température* basé sur la moyenne de ces 4 pixels est alors effectué pour chaque ROI afin d'extraire les variations de température.

### **2.3.2 Extraction et traitement du signal *Température* sur chaque ROI**

Pour illustrer cette méthode analytique, nous analyserons les signaux de température sur trois régions d'intérêt (ROI 1, ROI 2, et ROI 3) du scénario 77 du plan (Fig.2.10). Cette méthode est applicable aux scénarios impliquant un plan et un mannequin, mais pour des raisons de simplicité, nous utiliserons un scénario sur plan. En effet, seule une vue permet de capturer l'intégralité du joint facial, facilitant ainsi l'explication de la méthode. Chaque ROI fera l'objet d'un traitement de signal spécifique. Les ROI 1 et ROI 2 correspondent à des fuites de tailles respectives de 15G et 8G (voir Tableau 2.3). En revanche, la ROI 3 ne présente aucune fuite, ce qui permet de comparer les signaux de température entre une zone avec fuite et une zone sans fuite. Dans un cas général, toutes les ROIs sont étudiées et analysées afin de détecter toute fuite potentielle le long du joint facial.

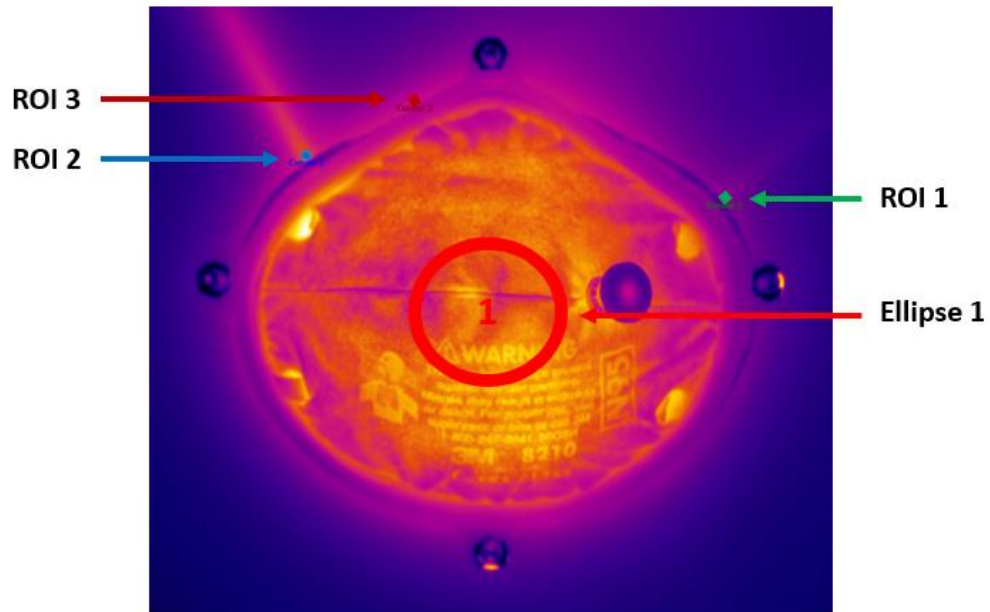


Figure 2.10 Positions des 4 ROI étudiés

Les trois ROI, de taille identique de  $2 \times 2$  pixels, sont toutes situées au niveau du joint facial. Une ROI supplémentaire, nommée Ellipse 1 et positionnée sur la PFF, sera également étudiée. L'objectif de cette dernière ROI est d'établir le lien entre le signal de température au niveau de la PFF et celui observé lors d'une fuite afin de faciliter le traitement de signal sur les ROI.

Pour chaque figure présentée ultérieurement, les températures et les amplitudes des trois ROI seront associées à l'axe y de droite, tandis que pour l'Ellipse 1, les températures et les amplitudes seront indiquées sur l'axe y de gauche. De plus, un choix a été fait quant à la représentation des signaux (en pointillés ou en continu) afin de garantir la clarté des graphiques. Les légendes sont indiquées en haut à gauche et à droite de chaque graphique.

Dans un premier temps, il est possible d'extraire les données brutes de températures sur ces 4 ROI (Fig.2.11a) et d'y tracer le spectre de Fourier des signaux de températures (Fig.2.11b). La composante continue n'a pas été représentée sur ces spectres de Fourier, car elle n'est pas intéressante pour l'étude, en effet ce sont les variations de températures qui sont étudiées ici.

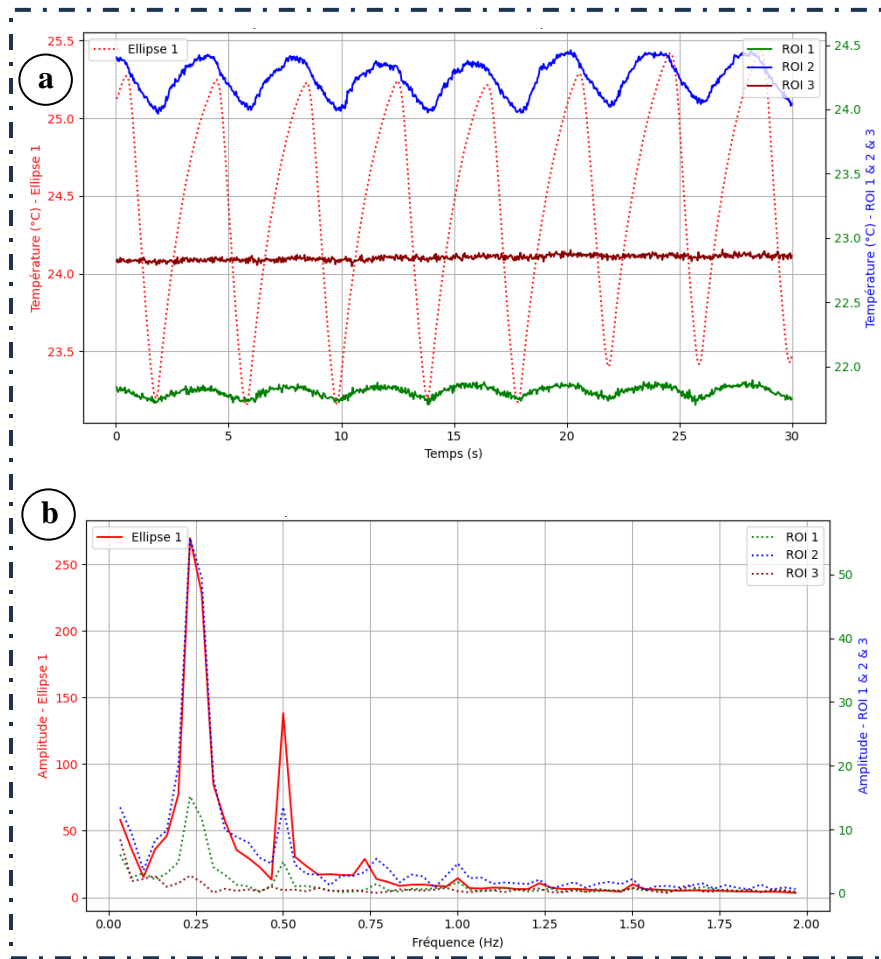


Figure 2.11 Analyse temporelle (a) et fréquentielle (b) de 4 ROI sans traitement de signaux

Du bruit est présent sur les signaux de température des trois ROI du joint facial, contrairement à celui sur l'Ellipse 1. Cela s'explique par le fait que nous observons la moyenne de température des pixels de chaque ROI. Les trois ROI du joint facial comprennent seulement quatre pixels chacun, contre des centaines de pixels pour l'Ellipse, rendant le signal de cette dernière beaucoup plus lisse une fois la moyenne calculée.

La fréquence fondamentale associée à chaque région d'intérêt (ROI) est établie à 0,25 Hz, une valeur cohérente avec la fréquence respiratoire ciblée de 15 respirations par minute, soit 0,25 respiration par seconde. Tous les signaux présentent des fréquences harmoniques, ce qui est également dû aux caractéristiques du simulateur respiratoire ASL 5000<sup>®</sup>. En effet, le cycle respiratoire n'est pas une sinusoïde pure (Fig.1.7 & courbe rouge en pointillées sur

la Fig.2.11a), donc les signaux ne sont pas représentés dans le spectre de Fourier par une seule fréquence fondamentale.

### 2.3.2.1 Lissage

Afin de supprimer ce bruit, il est possible d'appliquer un traitement informatique pour lisser les signaux des 3 ROI, aucun traitement ne sera réalisé sur l'Ellipse 1 (peu intéressant pour l'analyse du joint facial). Ce lissage consiste à prendre chaque point et à réaliser une moyenne sur les 10 points les plus proches de lui, c'est-à-dire les 5 précédents et les 5 suivants (Fig.2.12).

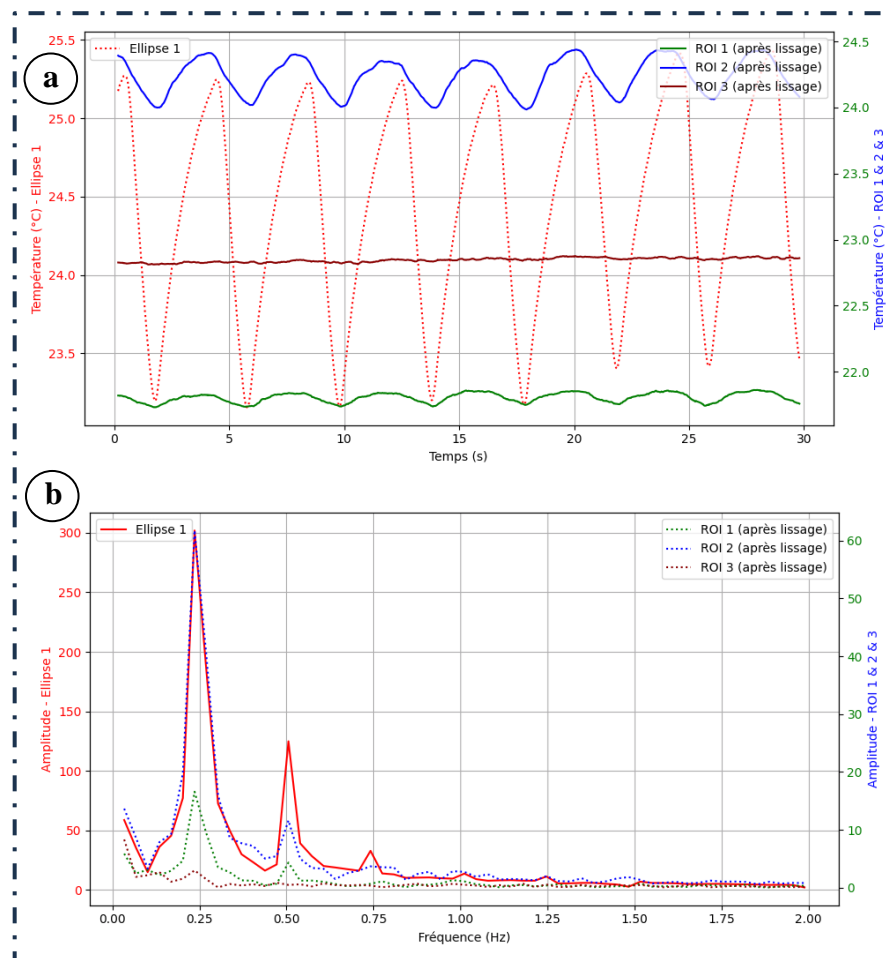


Figure 2.12 Analyse temporelle (a) et fréquentielle (b) de 4 ROI après lissage

Ce lissage est appelé moyenne mobile sur une fenêtre glissante, ici la fenêtre glissante est de 10 points. Cette fenêtre est choisie en fonction de la fréquence d'échantillonnage (ici 30Hz). En effet plus la fréquence d'échantillonnage est grande, plus il est possible de lisser sur une fenêtre glissante plus grande.

Le lissage permet d'atténuer le léger bruit mentionné précédemment, ce qui est observable à la fois sur l'analyse temporelle et sur l'analyse fréquentielle (Fig.2.12). Les amplitudes des fréquences supérieures à 1 Hz ont diminué, mais non pas disparu totalement. De plus, la composante continue persiste ainsi qu'un très léger bruit. Cependant, l'application d'un lissage plus fort, c'est-à-dire, avec une fenêtre glissante plus large, risquerait de compromettre la précision des résultats en altérant les variations de température.

#### 2.3.2.2 Filtrage

Une alternative consiste à filtrer les fréquences pertinentes pour notre étude. Grâce à l'Ellipse 1, il est possible d'identifier les fréquences influentes du signal, c'est-à-dire les fréquences avec une forte amplitude. Dans ce cas, la fréquence nominale de 0,25 Hz ainsi que ses 3 premières harmoniques à 0,5 Hz, 0,75 Hz et 1 Hz doivent être conservées. Un filtre passe-bande d'ordre 5, avec une bande passante entre 0,15 Hz et 1 Hz, permettra de supprimer les fréquences extérieures à cette plage et également la composante continue. L'ordre 5 de ce filtre est déterminé afin d'améliorer la précision de la sélection des fréquences spécifiques. Cet ordre semble être le plus efficace pour conserver les informations les plus pertinentes du signal.

La suppression de la composante absolue de la température permet de se concentrer uniquement sur les variations thermiques, indépendamment de la température cutanée. Pour le mannequin, la température cutanée de la partie supérieure est plus élevée que celle de la partie inférieure. Cette différence de température n'indique pas nécessairement des fuites. Pour les sujets humains, la température cutanée est influencée par divers facteurs tels que le sexe [54], la zone du visage [55], l'état de santé [56], ou les conditions environnementales (humidité, température, circulation de l'air, etc.). Ainsi, il est crucial de supprimer cette



composante constante afin de se focaliser exclusivement sur les variations thermiques liées aux fuites, sans être affectées par des paramètres externes.

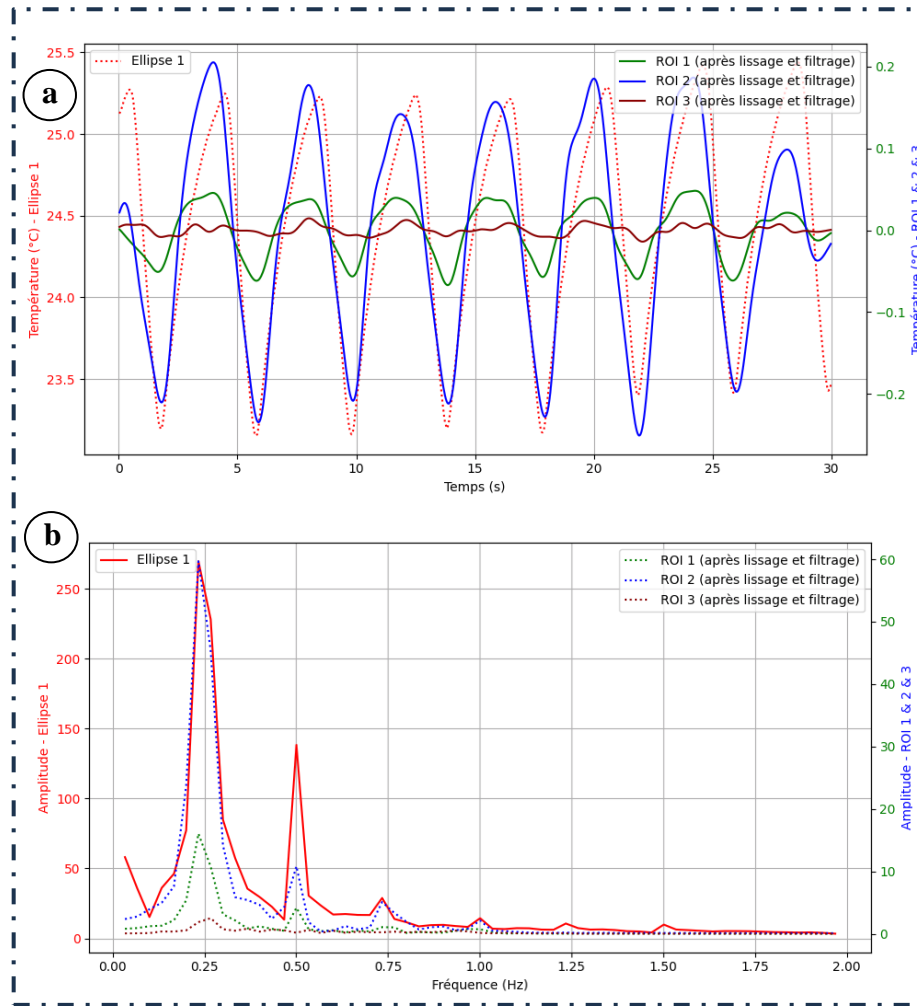


Figure 2.13 Analyse temporelle (a) et fréquentielle (b) de 4 ROI après lissage et filtrage

L'analyse fréquentielle (Fig.2.13b) confirme que toutes les fréquences situées en dehors de la bande passante ont été éliminées pour les 3 ROI (courbes en pointillées). Tandis que l'analyse temporelle (Fig.2.13a) confirme la suppression de la composante continue pour les ces mêmes ROI. Cette analyse temporelle permet à présent une meilleure analyse et une

meilleure évaluation des variations de température au niveau de chaque ROI. Pour caractériser chaque variation de température, il semble intéressant de calculer  $\Delta T$  pour chaque ROI :

$$\Delta T = T_{max} - T_{min} \quad (3)$$

Cependant, comme le montre la Fig.2.13, ce  $\Delta T$  n'est pas constant tout au long du test. Pour caractériser chaque variation par un unique  $\Delta T$ , une solution consiste à réaliser une moyenne des  $\Delta T_i$  sur chaque période  $i$  de ce test.

### 2.3.2.3 Moyennage des $\Delta T_i$

La formule (4) permettant de réaliser le calcul de la moyenne des  $\Delta T_i$  est la suivante :

$$\Delta T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta T_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{max,i} - T_{min,i}) \quad (4)$$

Avec :

- $\Delta T$  est la différence de température moyenne.
- $n$  est le nombre total des périodes mesurées.
- $T_{max,i}$  est la température maximale pendant la période  $i$ .
- $T_{min,i}$  est la température minimale pendant la période  $i$ .

Appliquons la formule (4) aux trois ROI étudiés précédemment. Pour chaque ROI, nous utilisons 7 périodes ( $n=7$ ), délimitées par les flèches rouges (Fig.2.14). Les points maximaux et minimaux sont représentés par les points bleus seulement pour le ROI 2.

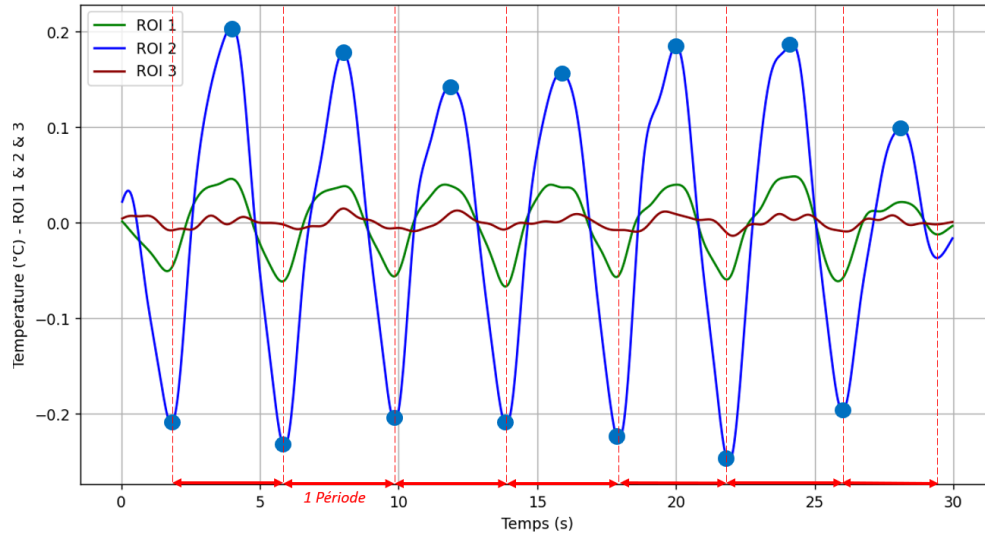


Figure 2.14 Représentation des points maximaux et minimaux pour réaliser le calcul de la moyenne des  $\Delta T_i$

Les résultats pour les  $\Delta T$  de chaque ROI sont les suivants :

- $\Delta T_{ROI1} = 0,1^{\circ}\text{C}$
- $\Delta T_{ROI2} = 0,38^{\circ}\text{C}$
- $\Delta T_{ROI3} = 0,01^{\circ}\text{C}$

Cet exemple se concentre uniquement sur ces trois ROI, mais il est nécessaire de calculer le  $\Delta T$  pour l'ensemble des ROI afin d'évaluer le  $\Delta T$  de chaque ROI du joint facial.

### 2.3.3 Exploitation du $\Delta T$

Une fois que toutes ces étapes sont réalisées pour chaque ROI d'un scénario, à savoir : la capture et la division du joint facial, l'extraction et le traitement du signal de température pour caractériser chaque ROI par un  $\Delta T$ , il est utile de résumer toutes ces informations dans un graphique. Ce graphique permettra de caractériser chaque scénario de manière concise et de faciliter une lecture rapide des résultats.

Ce graphique représente le  $\Delta T$  en fonction de l'indice de chaque ROI. La Fig.2.15 illustre ce graphique pour le scénario 77, avec les  $\Delta T$  des 3 ROI précédemment calculés. Le joint facial (jaune) ainsi que les trois ROI (bleu, vert, mauve) sont représentés sur l'abscisse de ce graphique. Chaque "pic" représenté sur cette figure correspond aux ROI 1 et 2, chacun indiquant une fuite. En revanche, les parties constantes de cette figure ne correspondent pas à des fuites, mais à des phénomènes convectifs, les variations de température induites par ces phénomènes restent très faibles. Ces phénomènes convectifs peuvent également être considérés comme des limites de nos mesures.

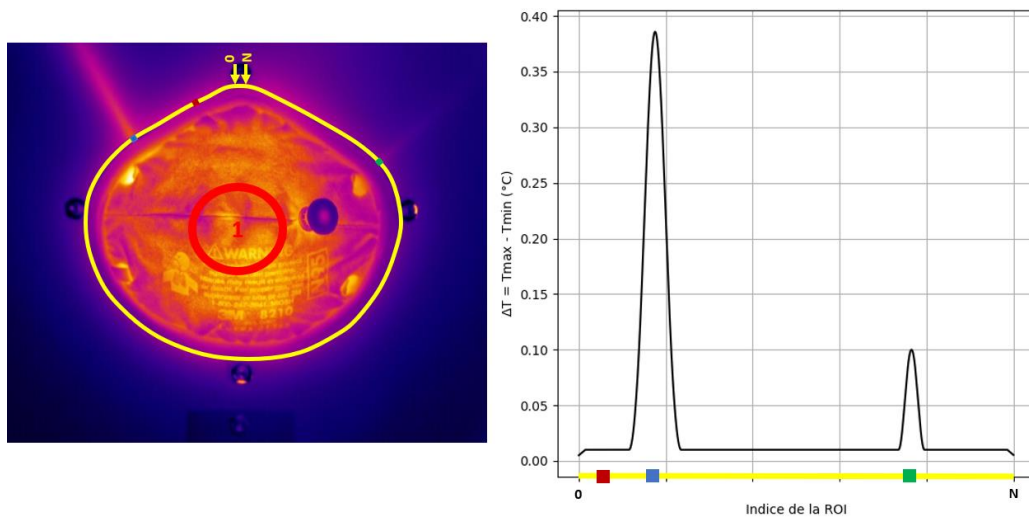


Figure 2.15 Graphique des  $\Delta T$  en fonction des ROI. Les trois ROI étudiées (rouge, bleue et verte) ainsi que le joint facial (jaune) sont visibles sur l'image IR à gauche et sur l'axe des abscisses du graphique à droite.

Ce graphique offre une représentation visuelle de la position, de la largeur et de l'intensité des fuites d'une PFF N95. L'intégration de ces données dans les modèles d'IA (voir Fig.2.16) pourrait faciliter l'apprentissage et la performance du système. Cette approche pourrait conduire à des performances améliorées dans la détection des fuites d'un masque N95.

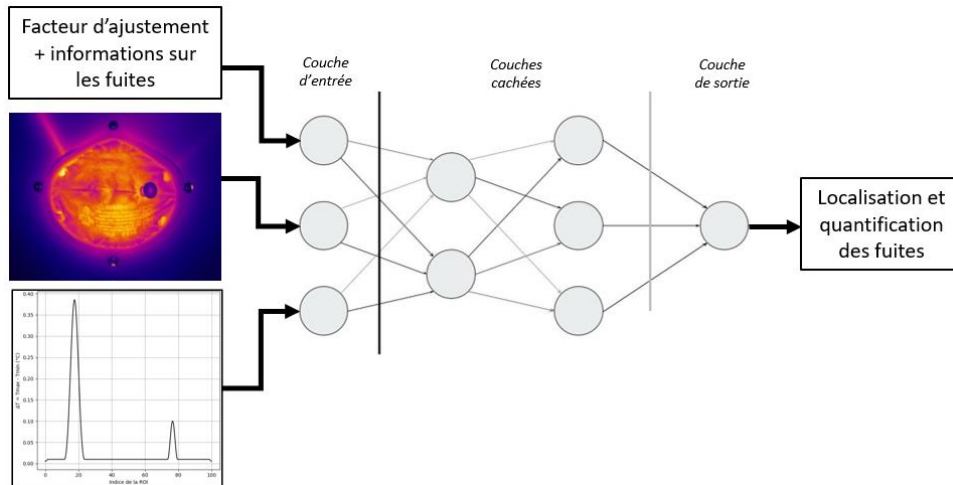


Figure 2.16 Nouvelle architecture d'un modèle d'IA avec l'ajout d'une nouvelle entrée

Pour aller encore plus loin, le graphique représentant les  $\Delta T$  en fonction des ROI ne permet pas de quantifier précisément l'ajustement de la PFF N95. Une méthode pour quantifier cet ajustement à l'aide de l'imagerie IR serait de calculer l'intégrale (aire sous la courbe) de la courbe des variations de température ( $\Delta T$ ) sur l'ensemble des ROI (zone bleue sur la Fig.2.17). Un nouveau facteur d'ajustement pour quantifier l'ajustement par IR pourrait être introduit, calculé comme suit :

$$FF_{IR} = \frac{1}{N} \int_0^N \Delta T di_{ROI} \quad (5)$$

Avec :

- $FF_{IR}$  est le facteur permettant de quantifier un ajustement par infrarouge
- $\Delta T$  est la différence de température moyenne.
- $N$  est le nombre de ROI.
- $i_{ROI}$  est l'indice de la ROI.

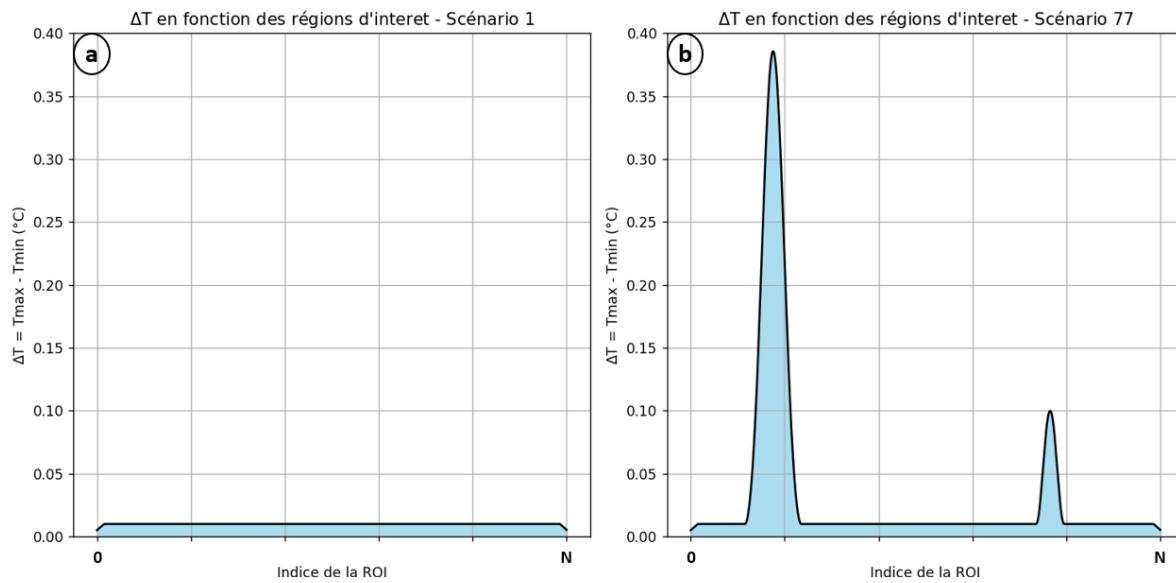


Figure 2.17 Aperçu de l'aire sous la courbe (zone bleue) des  $\Delta T$  en fonction des ROI pour le scénario 1 à gauche (sans fuite) et le scénario 77 à droite (2 fuites)

Si une PFF est parfaitement étanche et ne présente aucune fuite, aucune variation de température (ou très peu) ne sera détectée au niveau du joint facial. Dans ce cas, le graphique des " $\Delta T$  en fonction des ROI" sera représenté par une fonction nulle (Fig.2.17a), et la valeur de son intégrale sera également nulle,  $FF_{IR} \approx 0$ .

En revanche, si la PFF présente de nombreuses fuites, les variations de température au niveau du joint facial seront significatives (Fig.2.17b), conduisant à des valeurs élevées de  $\Delta T$  et donc à une augmentation de l'aire sous la courbe des " $\Delta T$  en fonction des ROI" par rapport à une PFF étanche,  $FF_{IR} \approx \alpha$ , avec  $\alpha$  non nul.

Il est essentiel de diviser cette valeur de l'intégrale par le nombre de ROI  $N$ , car ce dernier peut varier en fonction des tests effectués. Par exemple, un scénario présentant les mêmes fuites, mais avec un joint facial divisé en un nombre différent de ROI ( $N=100$  ROI et  $N=200$  ROI) ne donnera pas la même valeur d'intégrale, d'où la nécessité de normaliser la valeur de l'intégrale en fonction du nombre de ROI utilisé.

Cependant, ce coefficient  $FF_{IR}$  ne reflète pas l'évolution du FF tel que défini dans la norme actuelle [7]. En effet, pour une PFF bien ajustée,  $FF_{IR} \approx 0$  et  $FF > 200$ , tandis que pour une PFF mal ajustée, la situation est inversée. Si la corrélation entre ces deux facteurs se révèle être forte, avec  $r$  le coefficient de corrélation respectant l'inégalité suivante :

$$-0,8 > r > -1 \quad (6)$$

Il serait pertinent d'harmoniser l'évolution de  $FF_{IR}$  et FF. Une approche consisterait à déterminer le maximum de  $FF_{IR}$ , correspondant à une PFF mal ajustée selon la définition précédente, puis à réaliser la soustraction entre ce maximum et la valeur de l'intégrale (5). Cela permettrait à FF et  $FF_{IR}$  de progresser de manière cohérente, avec un facteur d'ajustement qui augmente à mesure que l'ajustement de la PFF s'améliore.

## 2.4 DISCUSSION

Une étude future pourrait être envisagée pour explorer une corrélation entre ce facteur  $FF_{IR}$  et le FF déterminé par le PortaCount<sup>®</sup>. Pour les tests effectués sur le plan et le mannequin, un seul type de PFF N95, une seule géométrie du dispositif, et un seul mode de respiration ont été utilisés pour la collecte des données. Cette uniformité simplifie considérablement l'étude de la corrélation entre les deux facteurs, puisque la plupart des paramètres sont maintenus constants.

Cependant, pour les sujets humains, il existe de nombreux paramètres pouvant générer de la variabilité dans l'étude de la corrélation entre le FF et le  $FF_{IR}$  : cycle respiratoire, morphologie du visage, type de PFF N95 utilisé... En effet, chaque individu présente une respiration unique [35] ainsi qu'une morphologie du visage propre. Il est possible de classifier les visages selon différentes catégories. Par exemple, NIOSH utilise des panels à 5 ou 10 catégories pour couvrir la diversité des visages [49]. Concernant les modèles PFF N95, il en existe une grande variété, avec des géométries différentes, certains avec valves et d'autres sans. Plusieurs corrélations entre les facteurs  $FF_{IR}$  et FF pourront être étudiés, selon :

- Le type de PFF N95

- La catégorie NIOSH du visage humain

En ce qui concerne la respiration propre à chaque sujet humain, elle se caractérise principalement par deux paramètres : la fréquence respiratoire et le débit respiratoire, lesquels sont reliés par la formule (1) mentionnée dans le chapitre 1. La méthode de traitement des signaux décrite précédemment reste applicable à l'analyse de la fréquence respiratoire. En examinant les variations de température au niveau de l'Ellipse 1 (Fig.2.10) et le spectre de Fourier du signal de température, il est possible d'identifier les fréquences à filtrer pour le traitement du signal thermique de chaque région d'intérêt (ROI). Ce filtrage personnalisé permet d'extraire le graphique des  $\Delta T$  en fonction des ROI (Fig.2.15) pour chaque sujet humain portant une PFF N95 sur une période déterminée.

L'étude du delta de température au niveau de l'Ellipse 1 (Fig.2.10) permet de quantifier le débit respiratoire pour chaque individu. Les personnes avec un débit respiratoire élevé montreront des variations de température plus prononcées dans cette ROI. Il est crucial de maintenir cette ROI (Ellipse 1) à la même taille (en nombre de pixels) et à la même position pour tous les sujets humains. Cela permet de comparer le même delta de température au niveau du masque pour tous les sujets humains.

L'intelligence artificielle peut être une solution efficace pour gérer cette variabilité. En complément du  $FF_{IR}$ , il est possible d'intégrer des données supplémentaires tels que le modèle du masque, les dimensions faciales, certaines caractéristiques du cycle respiratoire, ainsi que le delta de température du masque (Ellipse 1). L'IA pourrait utiliser ces informations enrichies pour quantifier avec précision les fuites, tenant compte des variations individuelles et des spécificités de chaque utilisateur. La méthode proposée dans ce chapitre ouvre la voie à des réflexions sur les différentes approches pour traiter les données et ainsi améliorer l'efficacité des modèles d'IA. Il est très probable qu'il existe d'autres méthodes à explorer.

En conclusion, ce chapitre introduit les deux bases de données élaborées à l'aide des dispositifs plan et mannequin, comprenant divers scénarios de fuites contrôlées en termes de



nombre, position et taille. Il explore également des pistes pour la localisation et la quantification des fuites via l'imagerie infrarouge, ainsi que l'intégration de modèles d'intelligence artificielle dans cette même démarche.

Le prochain chapitre se concentre sur la mise en place de l'installation destinée à la collecte de données sur des sujets humains. L'objectif de cette collecte est de constituer une base de données complète, permettant de tester les méthodes proposées dans ce chapitre dans un environnement plus réaliste.



**CHAPITRE 3 :**  
**SAFERESPIRATOR : BASE DE DONNÉES COMPLÈTE POUR LA**  
**DÉTECTION DES FUITES D'UNE PIÈCE FACIALE FILTRANTE N95**  
**COMPRENANT DES VIDÉOS INFRAROUGES, RGB ET DES TESTS**  
**D'AJUSTEMENT QUANTITATIFS**

**Titre : SafeRespirator: Comprehensive Database for N95 Filtering Facepiece  
Respirator Leak Detection Including Infrared, RGB Videos, and Quantitative Fit  
Testing**

G. Marchais<sup>1</sup>, M. Arbane<sup>1</sup>, B. Topilko<sup>1</sup>, J. Brousseau<sup>1</sup>, C. Brochot<sup>3</sup>, Y. Yaddaden<sup>1</sup>,  
A. Bahloul<sup>1,3</sup>, X. Maldague<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université du Québec à Rimouski, Rimouski, Canada

<sup>2</sup>Université Laval, Québec, Canada

<sup>3</sup>Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité au travail, Montréal, Canada

*Conférence : IEEE-EMBS International Conference on Biomedical and Health Informatics  
(BHI'24) – Soumis le 13 juin 2024*

### **3.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU DEUXIÈME ARTICLE**

La pandémie de COVID-19 a mis en évidence la difficulté de réaliser les tests d'ajustement quantitatifs (QNFT) nécessaires pour tous les professionnels de la santé, révélant en particulier les limites des vérifications d'ajustement effectuées par les individus eux-mêmes avant de commencer leur travail. Il semble donc important de développer une nouvelle méthode permettant de détecter complètement (localiser et quantifier) une fuite d'une pièce faciale filtrante (PFF), afin que les porteurs sachent s'ils sont en sécurité ou non. La technologie infrarouge (IR), en étudiant les variations de température autour du joint

facial, a déjà démontré sa capacité à localiser une fuite, mais pas encore à la quantifier automatiquement. Dans le but de montrer la capacité de la technologie infrarouge à détecter de manière totale et automatique une fuite en utilisant l'intelligence artificielle (IA), un ensemble complet de données composé de vidéos IR et RVB (Rouge Vert Bleu) synchronisées et calibrées ainsi que des QNFT de 62 participants portant 4 FFR N95 différents dans 4 positions différentes a été créé. Cet article présente un protocole développé et testé qui a permis de réaliser cette collecte de données. Au cours de cette collecte de données, deux caméras, infrarouge et visible, haute performance ont été utilisées pour étudier précisément les variations de température autour du joint facial. Un instrument PortaCount® a également été utilisé comme référence pour quantifier la qualité de l'ajustement de la PFF pour chaque test. Les résultats préliminaires montrent la capacité des images à surveiller avec précision les variations de température tout au long du joint facial. Cette base de données sera mise à la disposition de la communauté scientifique dans le but de faire progresser la recherche dans ce domaine ainsi que dans d'autres domaines.

Cet article, intitulé « *SafeRespirator : Comprehensive Dataset for N95 Filtering Facepiece Respirator Leak Detection Including Infrared, RGB Videos, and Quantitative Fit Testing* », a été soumis le 13 juin 2024 à la conférence *IEEE-EMBS International Conference on Biomedical and Health Informatics* (IEEE BHI 2024). Si ce papier est considéré de très haute qualité par les correcteurs, cet article scientifique sera publié dans le journal : *Journal of Biomedical and Health Informatics* (facteur d'impact = 7,7). Étant donné que la conférence se déroule à Houston, l'article utilise l'anglais américain. Tous les auteurs de cet article font partie de l'équipe de recherche travaillant sur le projet plus global visant à localiser et quantifier les fuites d'une PFF N95 par imagerie infrarouge et par intelligence artificielle. Les trois premiers auteurs sont des étudiants à la maîtrise à l'UQAR, tandis que les cinq auteurs suivants sont des professeurs ou des chercheurs.

En tant que premier auteur, j'ai conduit la majorité des recherches pour cet article, j'ai recruté les 62 participants, collecté la totalité des données et rédigé une grande partie de cet article, excepté la partie *V. Preliminary Results*. Mohamed Arbane, second auteur, a

contribué aux travaux de recherche présentés dans cet article en développant les différents codes utilisés pour synchroniser et calibrer les vidéos RGB et IR et également pour mesurer les dimensions des visages des participants. Il a également implémenté le code MediaPipe dans le but de faire un suivi de température sur quelques ROI. Il a contribué à l'écriture de ce papier en rédigeant la partie 3.2.6. *Preliminary Results*. Barthélemy Topilko, troisième auteur, a participé à l'élaboration du protocole (voir annexe I) en venant faire la personne test à plusieurs reprises dans le laboratoire pour tester le protocole et s'assurer que celui-ci fonctionnait. Le professeur et chercheur, Jean Brousseau, quatrième auteur, a contribué à la rédaction de la demande auprès du Comité d'Éthique de la Recherche de l'Université du Québec à Rimouski (CER-UQAR) ainsi qu'un suivi hebdomadaire des données collectées. La chercheuse, Clothilde Brochot, cinquième auteure, m'a conseillé sur l'élaboration du protocole, les temps importants à respecter lors des tests d'ajustement. Elle a également réalisé une partie de la revue de la littérature au tout début du projet, l'article reprend quelques éléments de cette revue de la littérature. Le professeur et chercheur, Yacine Yaddaden, sixième auteur, a proposé la rédaction de cet article pour présenter cette base de données et a supervisé la création du site web présentant cette base de données. Il a également permis, grâce à son expérience dans la collecte de données sur sujets humains d'excellents conseils dans ce domaine. Le chercheur, Ali Bahloul, septième auteur, a fourni le matériel nécessaire à la réalisation de cette collecte de données (pièces faciales filtrantes, générateur de particules, PortaCount®...). Le professeur et chercheur, Xavier Maldague, huitième auteur, a permis la réalisation de cette collecte de données dans l'un de ses laboratoires et a fourni les caméras IR nécessaires. Tous les auteurs ont également participé à la révision de cet article et à des réunions hebdomadaires pour me conseiller sur ces travaux.

Cette collecte de données a pu être possible grâce à l'approbation CER-UQAR (voir annexe II) et à l'approbation du Comité d'Éthique de la Recherche l'Université Laval (CERUL). Ce deuxième article présentant la base de données n'évoque ni les outils de recrutement (voir annexe III), ni les outils de consentement (voir annexe IV) utilisés pour réaliser cette collecte de données. Une fois cette collecte de données effectuée, les données ont été classées sur le serveur sabre de l'UQAR. L'organisation de ce serveur est présentée

en annexe (voir annexe V). Un des objectifs de cette collecte de données était la diffusion de la base de données résultante à la communauté scientifique. Pour cela, Inès Maaroufi, étudiante à l'UQAR, a développé un site web : <https://saferespirator.uqar.ca> (voir annexe VI) dans le but de présenter un échantillon et également la façon de procéder pour avoir accès à cette base de données. Pour avoir accès à cette base de données, un formulaire doit être rempli (voir annexe VII), un deuxième document présentant le consentement de chaque participant dans le partage de son image dans des publications scientifiques est également disponible (voir annexe VIII). Ces deux documents sont disponibles en anglais comme en français sur le site web comme sur les annexes. La conception ainsi que le fonctionnement du système de synchronisation des deux caméras, IR et RGB, ne sont pas présentés dans cet article. Ils sont présentés en annexe (voir annexe XIX).

## **3.2 SAFE RESPIRATOR: COMPREHENSIVE DATASET FOR N95 FILTERING FACEPIECE RESPIRATOR LEAK DETECTION INCLUDING INFRARED, RGB VIDEOS, AND QUANTITATIVE FIT TESTING**

### **3.2.1 Abstract**

The COVID-19 pandemic highlighted the difficulty of conducting necessary Quantitative Fit Testing (QNFT) for all healthcare professionals and the limitations of their self-administered fit checks before starting work. It therefore seems important to develop a new method, faster and more efficient, to fully detect (locate and quantify) a filtering facepiece respirator (FFR) leak, enabling wearers to know whether they are safe. The infrared (IR) technology, using the study of temperature variations around the face seal, has already shown its capacity to locate a leak but not yet to quantify a leak automatically. To demonstrate the capability of IR technology to fully and automatically detect leaks using artificial intelligence (AI), a comprehensive database has been developed. This database comprises synchronized and calibrated IR and RGB videos, along with QNFT data, from 62 participants wearing four different N95 FFR in four different positions. This paper presents a developed and tested protocol which has enabled to carry out this data collection. During this data collection, two high-performance IR and RGB cameras were used to study precisely temperature variations around the face seal. A PortaCount<sup>®</sup> Instrument has also been used as a reference to quantify the N95 FFR fit of each test. Preliminary results show the ability of images to monitor temperature variations throughout the facial seal accurately. This database is available to the scientific community to advance research in this area as in other areas.

*Keywords:* Database, Deep learning, Infrared imaging, N95 FFR leakage, Occupational Health and Safety, Quantitative Fit Testing

### **3.2.2 Introduction**

An N95 filtering facepiece respirator (N95 FFR) is a device that protect the wearer from inhaling harmful aerosols. However, only N95 FFR devices correctly adapted to the

wearer's face can offer adequate protection. For N95 FFR, which are the most frequently used in healthcare [36], the biggest contributory factor to the loss of protection is a leak through the face seal [14,15]. This implies that the protection offered by an FFR is significantly affected by the impaired fit between the FFR and the face [16]. FFR fit can be determined by qualitative or quantitative methods [7]: Quantitative Fit Testing (QNFT) or Qualitative Fit Testing (QLFT). These methods enable to choose the N95 FFR best suited to the wearer's facial morphology. Once the N95 FFR has been selected, the wearer must perform a self-test named fit check or user-seal-check each time it is used. This test checks the tightness of the N95 FFR through positive and negative pressure tests.

Concerning QNFT and QLFT, these methods enable the choice of the best-suited N95 FFR to the wearer's facial morphology. The distinction between QLFT and QNFT lies in both the method and the Pass/Fail criteria. In QLFT, the tester must verify the subject's ability to detect the challenge agent (sensitivity test) during breathing exercises. The subject must indicate if he detects the challenge agent during the QLFT; it is deemed "Pass" when the challenge agent is not detected. Conversely, QNFT employs a particle counter to calculate a fit factor. To obtain a test labeled "Pass", it requires a minimum fit factor of 100 for half facepieces [7]. However, these different methods have shown some limits. Indeed, they are not used for locating and quantifying leaks from an N95 FFR because they cannot do so. Furthermore, fit testing is very expensive in terms of money and time [10].

Concerning the fit check, before COVID-19, Huh et al. [8] have already studied the accuracy of this fit check and have shown that almost 50% of N95 wearers don't perform an adequate verification. Lam et al. [9] and Regli et al. [10] have both concluded that the user-seal-check has low sensitivity, accuracy, and predictive value in determining the fit of N95 FFR. It is unreliable in detecting a proper fit or identifying leaks. Furthermore, many healthcare workers have been extensively exposed to COVID-19, and a significant proportion of them have contracted the virus [37,38].

All things considered, it seems important to find alternative methods to conventional fit testing and fit checking. These methods should enable the detection of N95 FFR leakage,



specifically by locating and quantifying leaks automatically to reduce costs and save time. Infrared (IR) technology has already demonstrated its capacity to detect leaks. Indeed, studying temperature variations at the face seal can help identify FFR leaks. These temperature changes arise from the contrast between the ambient air and the warm exhaled air [18].

### **3.2.3 Related Works**

Some studies have investigated leak detection on N95 FFR using IR imaging [16,19]. These studies have shown that IR imaging can assess whether an FFR is properly worn and can have a complementary role in QNFT. Harber et al. [20] have also shown that there is a correlation between FF and IR Imaging, but it was insufficiently strong to substitute for QNFT.

Other studies have focused on the integration of deep learning models for N95 FFR leak detection using IR imaging [22,23,24]. All these studies have shown the potential of artificial intelligence in detecting air leakage for FFR wearers. Characteristics of the database used for their study and their model's training are given in Tableau 3.1. Several limitations of their database are mentioned in their respective study. Indeed, Chapman et al. [24] have only used one P2 FFR type, the flat fold FFR. They have observed temperature changes only in the nose area when studying the temperature gradient on the FFR. Bari et al. [23] have shown that the biggest challenge for IR image recording is the immobilization of the participant. They concluded that human movements influence image processing and results. For their part, Siah et al. [22] faced several limitations, including a small sample size of participants, an imbalance in the number of female and male participants, and, similar to Chapman et al. [24], the use of only one type of N95 FFR. To these observations, it could be added as a limitation that the study of Siah et al. [22] does not provide an FF for each test. All participants failed the QLFT, and there are no IR images of participants wearing FFR after a 'Pass' QLFT test. Finally, none of these studies share its database.

Tableau 3.1

Information about database used to develop their deep learning models

Studies	Chapman et al. [24]	Bari et al. [23]	Siah et al. [22]
Participants (Female/Male)	48 (36/12)	8 (2/6)	17 (15/2)
Fit Test Type	QNFT	QNFT	QLFT
Fit Test Device	TSI Portacount Model 8048	TSI Portacount Model 8038	N/A
IR Camera Model	FLIR One Gen3 - iOS	Jenoptik VarioCam <sup>®</sup>	FLIR T365
IR Camera Resolution	160*120 pixels	640*480 pixels	320*240 pixels
Points of View recorded	(1) front	(5) top, left, bottom, front, right	(5) top, left, bottom, front, right
IR Images used	48	462	N/A

Taking into account the context as well as the various limitations mentioned above of the previous studies, the objective of this present study is the construction of a complete and comprehensive database following several criteria:

- Collect data on a large and balanced number of participants;
- Include participants with diverse facial morphologies wearing different types of N95 FFR;
- Record high-definition IR and RGB videos from multiple angles of participants wearing N95 FFR;
- Conduct two QNFT for each N95 worn by a participant, one at the beginning and one at the end;
- Make the database accessible to the scientific community.

The addition of RGB video recording enables the tracking of various points on the face of a moving person wearing an N95. For instance, Jiang et al. [39] have used RGB and IR sensors to detect respiratory infections by first identifying face and mask regions in the RGB frames, then mapping these regions to the thermal frames, and finally capturing the regions of interest (ROI) in the thermal frames. Some computer codes such as MediaPipe [40] enable human face tracking on RGB videos, which will eliminate the problem of movements, as quoted by Bari et al. [23]. The version of MediaPipe that can create landmarks on the face cannot work on IR images due to the nature of IR sequences and because the MediaPipe face

mesh was trained on RGB visual datasets. This is primarily because IR imagery captures thermal radiation, significantly differs from the visual light spectrum in RGB images. In addition, IR and RGB data can be merged for face tracking in IR videos. Numerous studies have explored this fusion using RGB and IR cameras [41,42], as well as methods to calibrate these cameras with a checkerboard [43,44].

### 3.2.4 Materials and Methods

#### 3.2.4.1 Material

1) *Imaging System Configuration*: The study aims to investigate temperature variations of a human face wearing an N95 FFR during normal breathing, considering human movement. For that, a complete imaging system was developed to study these variations, including four different elements: an RGB camera, an IR camera, a synchronization system, and a Stereo camera calibration system [23]. The two cameras used, are detailed in Tableau 3.2. They were chosen for their high-resolution level and frame rate similarity. A 50 mm lens was chosen to operate with the IR camera because this lens enables a display similar to that of the RGB camera.

Tableau 3.2  
Characteristics of two cameras used to collect data

Cameras	RGB	IR
Manufacturer	GoPro Inc.	FLIR Systems
Model	Hero 9	X8501sc
Resolution	1920*1080 pixels	1280*1024 pixels
Sensitivity		<20mK
Frame Rate	30 Hz	(20 to 30) <sup>a</sup> Hz
Software used	OBS Studio	ResearchIR Max

<sup>a</sup>Frame rate for the IR camera was no constant, varying from 20Hz to 30Hz.

The imaging system was developed on the CAO software, SolidWorks® 2022 (Dassault Systems, Waltham, MA) and was printed with the Ultimaker S5 3D Printer (Ultimaker B.V., Utrecht, Netherlands) as shown in black in the Fig.3.1.

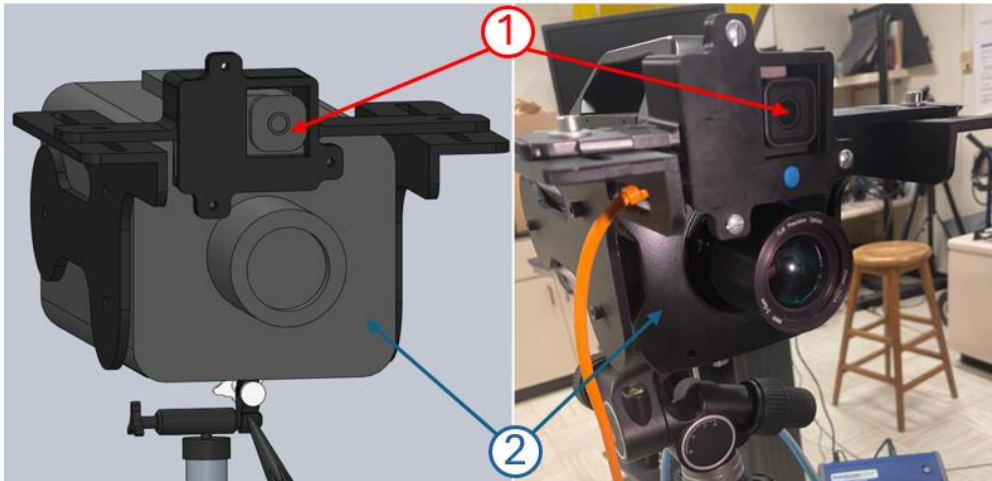


Figure 3.1 Modeling and design of the imaging system, 1) RGB camera, 2) IR camera

A RGB camera deep adjustment was added to this system for a better alignment between the two lenses. The main requirement of this imaging system was the necessity to create a system where the lenses of the cameras were as close as possible to minimize the distance between these lenses [43]. Indeed, it enables the recording of similar videos and facilitates calibration between these two cameras. Another requirement was that each camera should not move relative to the other during all data collection to avoid a remaking of calibration.

2) *Imaging System Calibration*: Once the cameras were installed, immobile and ready for use, they needed to be calibrated. Stereo camera system calibration involves aligning two cameras to capture the same scene accurately and reconstructing it in 3D, using a known pattern like an 8x8 checkerboard to determine intrinsic and extrinsic parameters. The calibration used an aluminum checkerboard, made by sticking adhesive vinyl on an aluminum sheet, with the checkerboard pattern cut into the vinyl. Aluminum's low emissivity ( $\approx 0,02$  at  $20^{\circ}\text{C}$  [46]) contrasts with vinyl's high emissivity ( $\approx 0,95$  at  $20^{\circ}\text{C}$  [47]), allowing an IR camera to capture the difference when a lamp heats the checkerboard. The process starts

by capturing multiple images of the checkerboard from different angles to calculate intrinsic parameters like focal length and optical center and then estimating extrinsic parameters such as relative position and orientation. Using about 10 pairs of IR and RGB images of the checkerboard in different positions enhances accuracy (Fig.3.2). Regular recalibration is recommended to account for changes in camera positions, lens focus, and ambient conditions, ensuring optimal 2D correspondences and precise 3D reconstruction for high-precision 3D imaging [48]. Ten pairs of images were captured daily for calibration during each day of data collection.

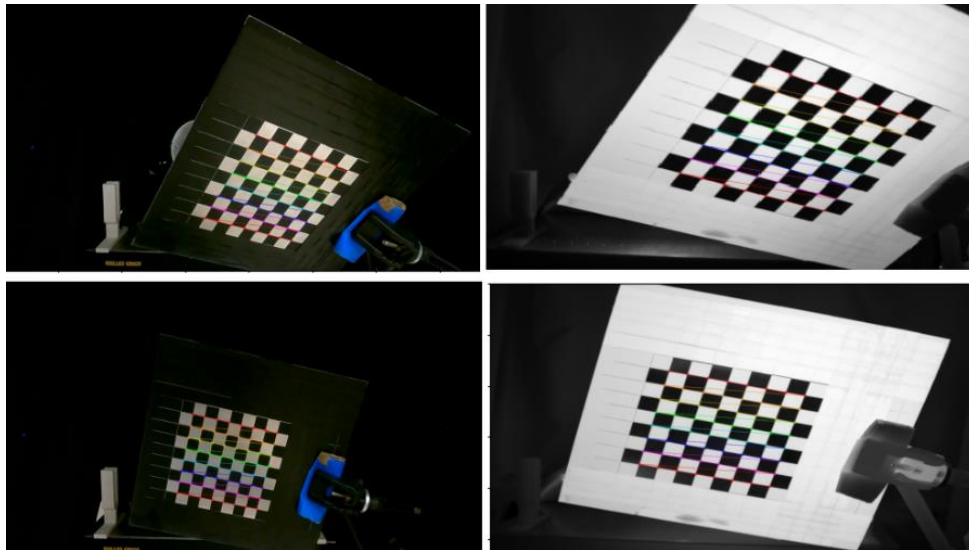


Figure 3.2 Two IR and RGB image pairs of the aluminum checkerboard in 2 different positions for calibration

3) *Imaging System Synchronization*: Once IR and RGB cameras were fixed and calibrated, it was important to synchronize the recordings from each camera to avoid a time difference between IR and RGB videos. The two cameras work with different software, each with a different time delay at the start of recording, making automatic synchronization complicated. A synchronization system was developed to solve this issue, controlled by Bluetooth, and composed of a halogen lamp, an electromagnet, an Arduino Uno, and 3D-printed pieces. This system was placed just behind the participant on a wood panel. For each video recording start, a 10-second delay allowed the lamp to heat up. At the end of this period,

a pulse of heat and light was visible to the two cameras, as shown in Fig.3.3. Furthermore, a computer code was developed to recognize this pulse and synchronize the IR and RGB videos.



Figure 3.3 Two IR and RGB image pairs with and without pulse of heat and light (encircled in red) for synchronization

4) *Quantitative Fit Testing*: To detect an N95 FFR leak with IR technology, it was essential to rely on a technology that is already used daily by professionals and has already proven its efficiency. The reference instrument that was used in this study is the PortaCount<sup>®</sup> Instrument, Model 8038 (TSI Incorporated, Shoreview, Minnesota, USA). It enables the performance of a QNFT by counting particles inside and outside the N95 FFR during 8 breathing exercises as described by OSHA. The Fit Factor (FF) is then calculated by dividing the number of particles outside the N95 FFR by the number of particles inside. The

PortaCount<sup>®</sup> Model 8038 measures FF from 1 to 200. For an N95 FFR, the success criterion to pass a QNFT is an FF higher than 100 [7]. The instrument must be used in a controlled environment with enough particles in the ambient air. For that, a particle generator, the 24 Jet Collision Nebulizer (BGI, Inc) was used. It operates with different pressures and solutions but in the context of the present data collection, a pressure of 30 PSI and a salt solution ( $c = 0,05 \text{ g/mL}$ ) were chosen. These parameters enabled constant particle generation around 10000 particles/cm<sup>3</sup> in ambient air and were safe for participants' health. The average diameter of the generated particles was less than 100 nanometers.

5) *Overall Installation:* The installation integrated the various instruments and allowed one participant to sit in front of the cameras. As shown in Fig.3.4, it consisted of a dark tent, a swivel chair and the imaging system. The dark tent served two purposes. It minimized reflectivity and prevented external disturbances during data collection and calibration on the checkerboard, as done by Roberge et al. [16]. The dark tent also created a smooth bottom on videos, making the synchronization easier. The swivel chair allowed participants to rotate with the chair instead of turning their heads, thus limiting their head movements. Indeed, head movements can change N95 FFR fit and by the same way affect correlation between FF and IR evaluation. The tripod of the imaging system and the swivel chair were fixed to the ground. This helped to maintain a constant distance of 50 centimetres between the participant's face and the camera lenses. Keeping this distance constant helped reduce the need for frequent adjustments of the IR camera lens and, consequently, minimized the number of camera calibrations required.

This installation was set up in a laboratory with controlled temperature and relative humidity. During the data collection, the temperature varied from 20°C to 22,5°C, and the relative humidity varied from 17% to 23%.



Figure 3.4 Final installation including the imaging system, the PortaCount<sup>®</sup>, the dark tent and the swivel chair

#### 3.2.4.2 Methods

*1) Participants:* The ethical approvals to conduct the data collection on participants were obtained by the University of Quebec at Rimouski (UQAR) and Laval University Research Ethics Committees (approval number 2024-276) in the fall of 2023. Participant recruitment was done in the student community of Laval University. To be recruited, the participant had to meet the following eligibility criteria, like those for a QNFT [7]: Not show flu-like symptoms, not have skin irritation or inflammation on the face, not have eaten, drunk, or smoked 1 hour before the event, for men, be clean-shaven at least 24 hours beforehand.



62 participants participated, 36 women (58%) and 26 men (42%). Before starting data collection, each one signed two consent papers, one to participate in the data collection and another to give agreement for image sharing in publications or reports. Refusing to share their data did not result in the cancellation of data collection.

2) *Protocol* : After the consent papers were signed and following an explanation of the protocol for data collection, the data collection process began. Each participant tested 4 different N95 FFR out of 7 available options (Tableau 3.3).

Tableau 3.3  
N95 FFR Characteristics tested during data collection

Manufacturer	N95 Type	Valve	Size	Number of tests
3M	8210	No	Standard	62
3M	8210V	Yes	Standard	12
3M	VFlex 9105	No	Standard	27
Moldex	2200	No	M/L	62
Moldex	2300	Yes	M/L	12
Honeywell	DC300	No	One Fit	61
Honeywell	DC300V	Yes	One Fit	12

Each N95 FFR are Molded Cup shaped, except 3M VFlex 9105, which is a V-shaped pleat. Total tests conducted = 248.

The N95 FFR from different manufacturers were chosen for their different geometries to create different leak situations. Indeed, one objective of this study is to observe different leak situations occurring in various locations around the face seal. One can reach this objective by multiplying N95 FFR geometries and participant facial morphologies. It is important to notice that the data collection was not performed to test the N95 FFR's performance to fit. The participants did not receive instructions about wearing an N95 FFR. Therefore, the participants created leaks unintentionally.

As illustrated in Fig.3.5, participants followed a test sequence that involved setting up an N95 FFR, undergoing an initial QNFT, breathing in front of the imaging system, and finally, completing a second QNFT.

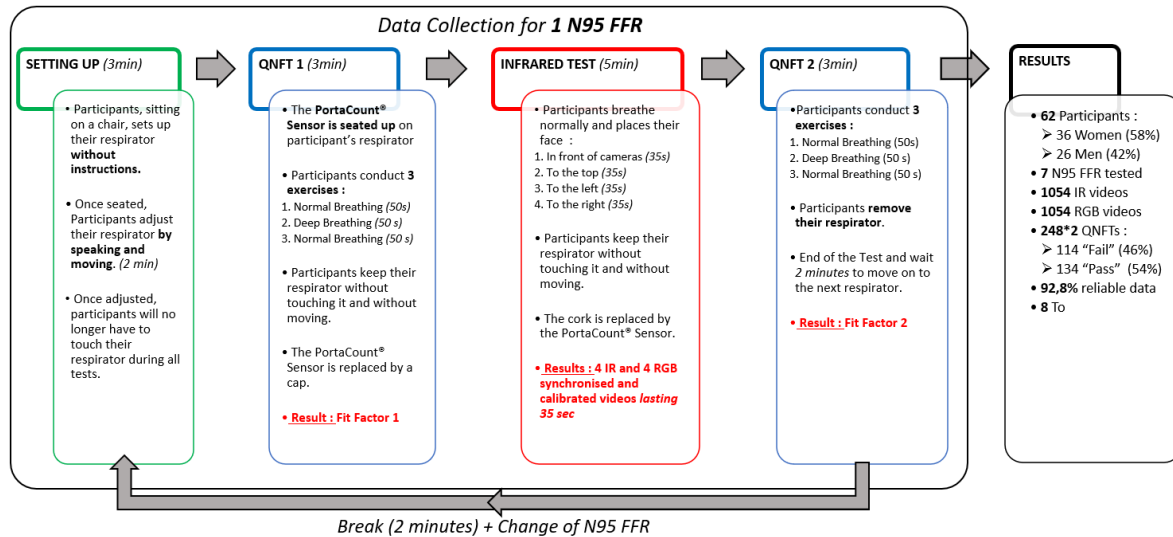


Figure 3.5 Detailed data collection protocol for 1 N95 FFR tested

Data collection operated in the following sequence. First, participants, seated in front of the cameras, were given two minutes to put on and adjust an N95 FFR. QNFT tests were carried out at the beginning and end of the collection. It consisted of three exercises: normal breathing (50 seconds), deep breathing (50 seconds), and normal breathing (50 seconds). The two QNFT allowed verification that the N95 FFR fit did not change during the collection. The difference  $X$  ( $X = |FF1 - FF2|$ ) and the average between these two FF were then calculated. The difference enabled to class reliability of each test. The greater difference, the less reliable the data. Indeed, a large difference meant the N95 FFR fit had changed during test. On the other hand, the average gave a global FF of the test.

The aim of the database is to correlate FF with IR videos, so 3 exercises were selected to observe the same leak(s) during the IR test. Exercises and sample time were selected from the eight exercises outlined in the OSHA protocol as they are less likely to modify the face seal during testing.

During the IR test, the subject breathed normally and assumed four different positions over 35 seconds, positioning their face in front of the cameras, upwards, to the left, and finally

to the right. These positions enabled to capture exactly and totally the participant face seal. Indeed, with one view, for example in front of cameras, IR camera can't capture the entire face seal. To take these positions, the participants used the swivel rotation to avoid breaking the face seal and not changing their N95 FFR fit. Between QNFT and IR test, a replacement between a cap and the PortaCount<sup>®</sup> sensor was done. It was enabled to capture IR videos without the PortaCount<sup>®</sup> sensor influencing temperature variations on the N95 FFR or the face seal in IR videos. A cap was used because a QNFT requires the N95 FFR to be perforated to accommodate the PortaCount<sup>®</sup> sensor. Time recording was chosen to capture enough breathing cycle to study them. For a normal human breathing, frequency breathing is comprised between 12 and 20 cycles per minutes [33]. So, a time recording equal to 35 seconds represents several cycles captured between 7 and 12 cycles. At the end of each N95 FFR (starting from the 11th participant) a question about a possible feeling of leak was asked to the participant. Their answer enables cross-reference information between an IR video, an FF and a participant's feelings. This information makes it easier to locate a leak or leaks with certainty.

Between each N95 FFR, the participant had a break of 2 minutes to breathe normally without N95 FFR. When the participant's face temperature was back to normal at the end of data collection, a last IR and RGB video recording of the participants without wearing an N95 FFR was done. This last recording enabled the evaluation of the size of the participant's face with an algorithm which calculates the number of pixels compared to a known face reference. Face length and face width of each participant were measured, and so it enabled the placement of each participant in the bivariate NIOSH Panel (Fig.3.6). This figure shows the diversity of participant facial morphologies in this data collection, which is one of the aims of this study.

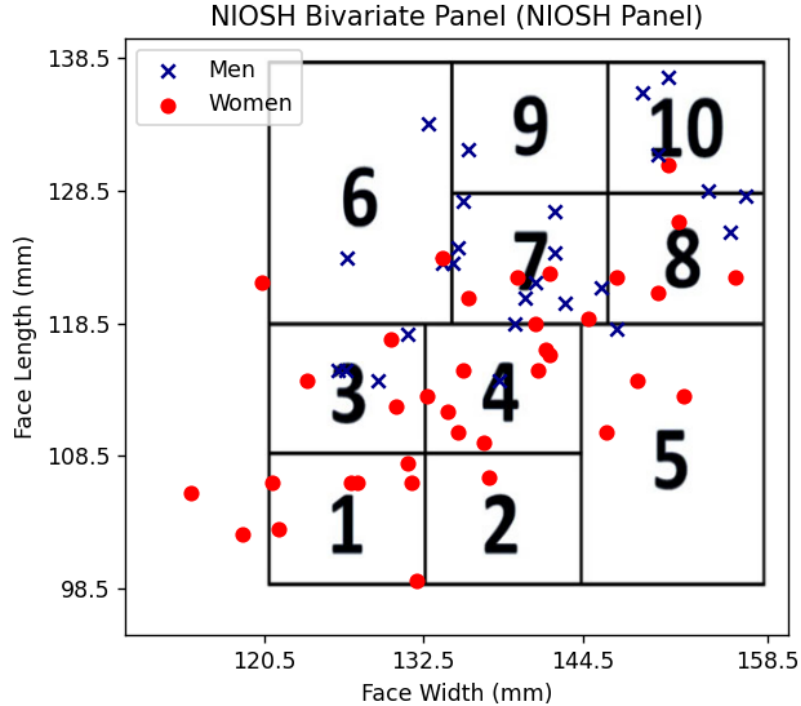


Figure 3.6 NIOSH bivariate panel as determined by Zhuang et al. [49] and distribution of 62 participants' face length and width

### 3.2.5 Data

#### 3.2.5.1 Recording visualizations

As described previously, for each participant and each N95 FFR, IR and RGB videos lasting 35 seconds were captured in four different positions as shown in Fig.3.7. OBStudio Software [50] (OBStudio, Inc.) enables the recording and export of RGB video in MP4 format, while ResearchIR Max [51] (FLIR Systems, Inc., Wilsonville, Oregon, USA) records in ATS format, a proprietary ResearchIR format that is unusable in algorithms. The TIFF format, known for its high-quality images, was finally used to export these videos to avoid information and quality loss. For each participant, 34 videos were recorded, 17 IR videos (.tiff or .ats), and 17 RGB videos (.mp4): 4 positions for each of 4 N95 FFR = 16 videos + 1

video without an N95 FFR. As mentioned before, the four positions allow visualization of the face seal entirely. Additionally, the IR camera's high sensitivity and high acquisition frame rate provide very precise monitoring of temperature variations around the face seal.



Figure 3.7 Visualization of IR and RGB images in 4 different positions : front, top, left, right

#### 3.2.5.2 Test Reliability

In addition to IR and RGB videos, each N95 FFR tested by a participant involved two QNFT, resulting in two measured fit factors. The difference and the average of the fit factors were calculated to classify each test. The difference  $|FF1 - FF2|$  was used to classify the reliability of a test, as shown in Tableau 3.4. There were, in totality, 62 participants, and each one wore 4 N95 FFR, so there were 248 ( $62 \times 4$ ) tests. This classification was decided according to the accuracy of PortaCount<sup>®</sup> which is  $\pm 20$  when the higher fit factor measurable is 200 [52]. With this classification, more than 92,8% of data collected are considered as reliable or very reliable. A difference between FF1 and FF2 greater than 100 indicates that

the N95 FFR fit changed significantly during data collection. This classification helps determine which data will be used first and which will be discarded.

Tableau 3.4

Test reliability classification according to the difference between FF1 and FF2

Reliability	Difference X	Number of tests	Percentage(%)
Very reliable	$0 \leq X \leq 25$	212	85,5
Reliable	$25 < X \leq 50$	18	7,3
Little reliable	$50 < X \leq 100$	14	5,6
Unreliable	$100 < X \leq 200+$	4	1,6
Total	$0 \leq X \leq 200+$	248	100

### 3.2.5.3 Test Classification

Regarding the average between FF1 and FF2, this value was used to classify each test according to the FF. A distribution of the number of QNFT based on FF is presented in Fig.3.8. This distribution can also be used to count how many tests are classified as 'Pass' and 'Fail.' A test is considered a 'Pass' if its FF is higher than 100 [7]. In these tests, 114 (46%) are considered as "Fail" and 134 (54%) as "Pass". The database is then constituted for each test by the bivariate parameter of the participant, 17 IR videos, 17 RGB videos, 2 FF labels and a test reliability.

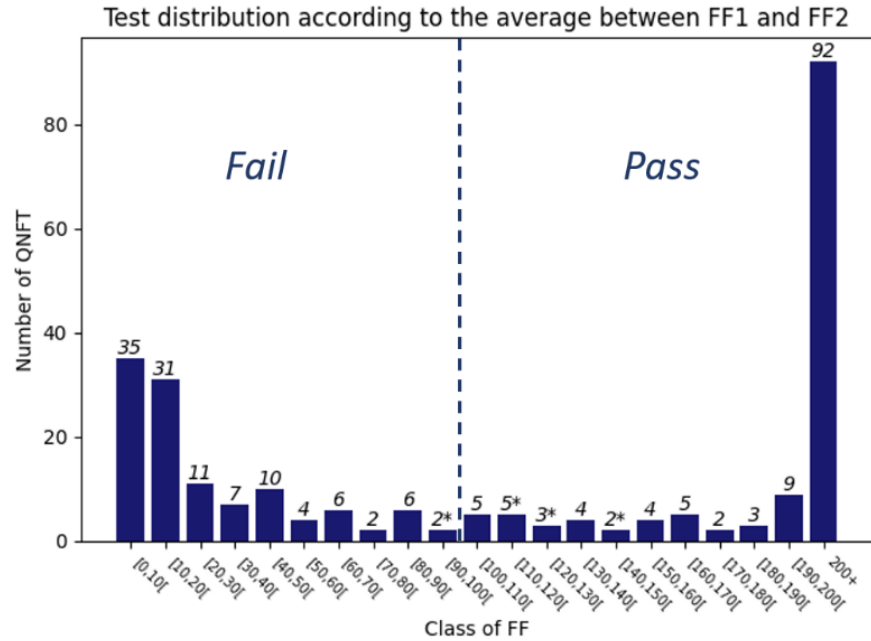


Figure 3.8 Test distribution according to the average between FF1 and FF2

### 3.2.6 Preliminary Results

To demonstrate the quality of the collected data, two sequences, from two different participants, were processed and compared. The sequences from participants number 60 and 41 are used as example. The information regarding these tests is detailed in Tableau 3.5.

Tableau 3.5

Example of 2 tests for 2 participants

Participant N°	N95 Type	Fit Factor	Leak Area Feeling <sup>a</sup>
60	3M 8210	10.5	Left Nose
41	3M 8210	200+	No Feeling

<sup>a</sup>The point of view on the leak area feeling is always given by the data tester namely observer.

After synchronizing both RGB-visual and IR sequences and using the stereo camera system calibration [43,44]. MediaPipe [40] is applied on the RGB images, as shown in

Fig.3.9 (left side). The information is then transferred to the IR sequence, where the landmarks of the face mesh detected by MediaPipe are mapped onto the IR images, as illustrated in Fig.3.9 (right side). This process ensures accurate correspondence between the RGB and IR data, enabling robust facial feature detection across both modalities.

After identifying the landmarks, it is possible to extract the temperature at specific points on the face Fig.3.9. In this case, landmarks numbers 56 and 464 are used. The results of the temperature measurements at these points are shown in Fig.3.10. This approach allows for precise thermal analysis of the face based on accurately mapped landmarks from the RGB images, even when the participant moves during the record.

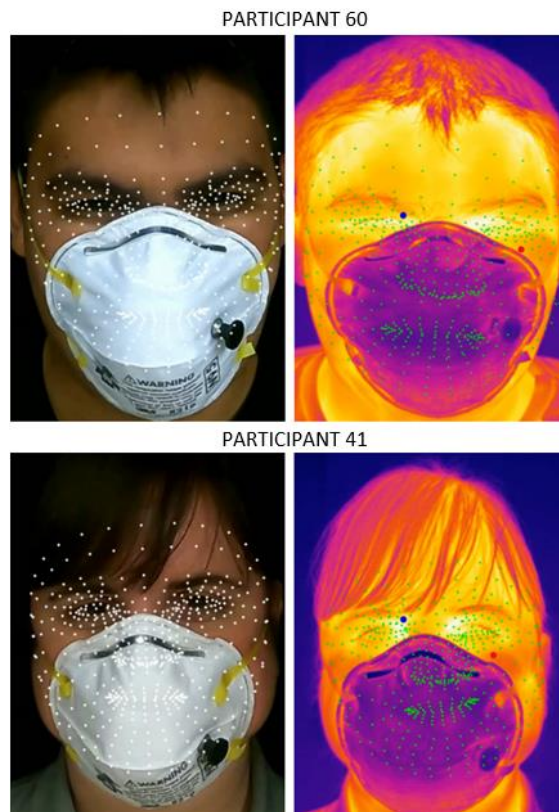


Figure 3.9 Application of MediaPipe on RGB/ IR Images after synchronization and calibration. Landmark 56: blue point on the left side, at eye level; Landmark 464: red point on the right side, at cheek level. The size of the landmarks is enlarged for better; their original size is 4\*4 pixels



After extracting the landmarks on the IR images, landmarks that could potentially indicate thermal leaks were selected. This selection allows us to visualize the temperature at these critical points. Fig.3.9 shows the locations of these selected landmarks (blue point for landmark 56 on the left side, at eye level, and orange point for landmark 464 on the right side, at cheek level). While Fig.3.10 presents a diagram of the temperature changes over time at these two points for participants 60 and 41. This analysis helps in understanding the thermal behavior of the face at specific landmarks under different conditions.

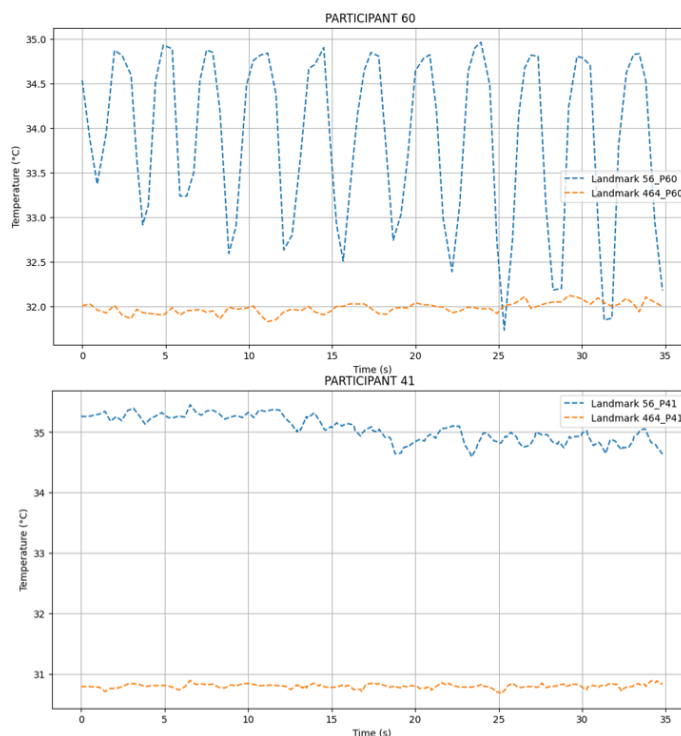


Figure 3.10 Comparative analysis of temperature variations between two participants at identical landmarks. Landmark 56 : blue curve; Landmark 464 : orange curve

This diagram is consistent with the leak feeling by participants 60 in the area of the left nose. Indeed, landmark 56 shows a greater temperature variation than landmark 464. This presence of a leak is also consistent with the low Fit Factor collected for Participant 60 wearing a 3M 8210 N95 (Tableau 3.5). It is also noticeable that the mean temperature

fluctuates over the recording period depending on the landmark. Landmark 56 registers a higher mean temperature compared to landmark 464. For the same landmark, this mean temperature also varies between participants. As for temperature fluctuations, they are not constant throughout the test, as illustrated by the blue curve for participant 60. The preliminary results therefore show that the method is capable of showing the presence of potential leaks.

### **3.2.7 Discussion**

The development of the testing installation has allowed for the collection and compilation of a database of participants wearing N95 FFR in various positions. Preliminary results demonstrate the method's capacity to detect potential leaks. Concerning the reliability of data collected, based on the difference between FF1 and FF2, 85,5% of the data are considered very reliable, 7,3% are considered reliable, 5,6% are considered little reliable and 1,6% (four tests) are considered unreliable. The unreliable data is explained by change in the FFR fit during the recording of IR and RGB videos. These videos are still usable but the labeling of the FF on these tests remains unreliable.

Recording videos to accurately capture the face seal proved complex during data collection. Positioning the participant with meticulous precision is imperative to obtain appropriate data. Excessive rotation of the chair results in partial capture of the face seal. Using four views of the participant's face ensured capturing the entire face seal. However, achieving adequate capture may require fewer views.

The objective is not only to locate the leaks, but also to quantify them. Labeling each test using the FF will allow leak-level classes to be created. Currently, the two main existing classes are "Pass" and "Fail", for the two fit testing methods: QNFT and QLFT. However, given the distribution of PortaCount<sup>®</sup> measures (Fig.3.8), there is potential for refining and multiplying these classes.

### 3.2.8 Conclusion

A database of high-quality IR and RGB videos was created. 62 participants, 36 women and 26 men, each tested 4 FFR in 4 different positions (front, top, left, right) and they performed 2 QNFT for each FFR tested: one before video recording and one after. This database comprises 1054 IR, 1054 RGB videos, and 496 QNFT, totaling 8To. To our knowledge, it currently represents the most comprehensive database in the field of N95 FFR leak detection using IR imaging. This database has been specifically created to develop deep learning models for comprehensive N95 FFR leak detection. These models could automatically locate and quantify leaks across the entire face seal of N95 masks. This deep learning technology has the potential to provide an alternative to current methods, ensuring adequate respiratory protection for all N95 FFR users, particularly healthcare workers.

A website<sup>1</sup> has been developed to showcase a sample database and the procedure to follow to obtain it. This site also presents the team's progress regarding the research project, its publications, and participation in conferences, forums, etc. The website provides information about the database, including rules of use, the license to be signed and returned, and data organization.

<sup>1</sup><https://saferespirator.uqar.ca/>



## CONCLUSION GÉNÉRALE

### Sommaire

Les objectifs principaux de ce sous-projet étaient de mettre en place deux installations permettant de collecter des données utiles pour la suite l'étude des fuites d'une PFF N95 par imagerie IR. Pour cela, trois systèmes ont été étudiés : un plan, un mannequin et des participants humains, ces trois systèmes permettent de collecter des données dans des environnements contrôlés (plan, mannequin) et non contrôlés (participants humains).

Pour les deux premiers systèmes, une installation complète reproduisant une respiration humaine a été mise en place, accompagnée de deux dispositifs permettant un contrôle total sur le nombre, la taille et la position des fuites d'une PFF. Ces dispositifs, intégrés à l'installation mentionnée précédemment, ont permis la collecte de données de plusieurs scénarios de fuites contrôlés. Plusieurs scénarios, allant de 0 à 3 fuites d'un diamètre variant de 0,84 mm à 3,5 mm, ont été étudiés. Un total de 67 scénarios pour le plan et 32 pour le mannequin ont été collectés, suivant un protocole spécialement élaboré à cet effet. Ces deux bases de données comprennent, pour chacun des scénarios, des vidéos IR ainsi que des données résultant de QNFT. Elles sont actuellement disponibles sur un serveur de l'UQAR.

Ces données ouvrent la voie à deux méthodes pour localiser et quantifier les fuites d'un masque de protection respiratoire (PFF). La première méthode s'appuie exclusivement sur des modèles d'IA utilisant les données brutes des bases de données. En revanche, la seconde méthode est analytique et utilise des outils de traitement du signal (lissage, filtrage, moyennage, etc.) pour extraire les données de température au niveau du joint facial. Cette approche analytique permettrait de localiser et de quantifier chaque fuite de la PFF, introduisant ainsi un nouveau facteur d'ajustement infrarouge, le  $FF_{IR}$ . Ces informations supplémentaires serviront à enrichir les entrées des modèles d'IA, augmentant ainsi la

précision de la détection des fuites sur une PFF N95. Des travaux supplémentaires seront nécessaires pour évaluer l'efficacité de chaque approche et déterminer la méthode la plus appropriée. Cependant, des méthodes alternatives pourraient être envisagées, telle que l'utilisation d'autres techniques pour traiter les signaux *Température* ou pour entraîner les modèles d'IA.

Dans un second temps, une installation visant à accueillir des participants humains a été mise en place. Cette installation comprend un système d'imagerie rigide composé d'une caméra IR et d'une caméra RGB, ainsi qu'un système de calibration et de synchronisation. Cette installation a permis de collecter des données sur 62 participants portant des PFF N95 basées sur un protocole développé à cet effet. Cette base de données inclut les données suivantes : données IR, données RGB et données de QNFT.

Un site web a été développé pour présenter un échantillon de cette base de données et pour donner accès à celle-ci à la communauté scientifique. Ce site web présente également les progrès du projet ainsi que la participation de l'équipe à des congrès, forums et conférences pour présenter ce dernier.

## **Contribution**

La contribution majeure de ce projet réside dans la création et le partage d'une base de données complète sur les participants humains. À notre connaissance, aucune base de données aussi vaste et complète n'a été présentée auparavant. Cette base de données ouvre la voie à d'autres études, comme par exemple, la détection de problèmes respiratoires par imagerie IR. En outre, l'étude de l'ajustement d'une PFF sur un mannequin par imagerie IR représente également une contribution significative. En effet, les études actuelles sur l'ajustement des masques avec la présence d'un mannequin se sont principalement limitées à l'utilisation d'instruments pour réaliser des essais d'ajustement quantitatif, ce qui rend cette approche novatrice. De plus, les deux installations ainsi que la totalité des fichiers pour la conception des pièces 3D ont été gardées et seront réutilisées par les étudiants continuant le projet.

Les deux installations ainsi que les trois bases de données créées appartiennent à l'UQAR, l'Université Laval ainsi qu'à l'IRSST. Ces travaux de recherche permettent de faire avancer la recherche sur la protection respiratoire au Québec.

## **Limites de l'étude**

En ce qui concerne les limites de cette étude, l'installation permettant de reproduire une respiration humaine est encore au stade de prototype. En effet, la chambre chauffante de l'air expiré a été réalisée en impression 3D, et une température de chauffe excessive pourrait potentiellement détériorer cette pièce. Dans le futur, il serait judicieux d'envisager le remplacement de cette chambre chauffante par un instrument spécialement conçu à cet effet, permettant ainsi un meilleur contrôle des paramètres respiratoires (température et humidité de l'air expiré et inspiré). Un contrôle plus précis de ces paramètres permettrait d'étudier l'influence de l'humidité (négligée dans ce projet) ainsi que la température de l'air expiré sur l'impact thermique d'une fuite d'un masque N95. À l'Institut national de recherche et de sécurité (INRS) en France, les chercheurs utilisent le simulateur respiratoire DBM-01 Digital Breathing Machine de chez i-bodi pour contrôler les paramètres respiratoires mentionnés précédemment. Ce simulateur peut être équipé d'un humidificateur et d'un réchauffeur de l'air expiré, permettant ainsi un contrôle précis de ces paramètres. En ce qui concerne les deux dispositifs de contrôle des fuites, garantir la tangence de l'aiguille par rapport au dispositif représentait parfois un défi. En effet, l'utilisation de gomme pour fixer l'aiguille n'est pas nécessairement la méthode optimale, et il conviendrait d'explorer d'autres approches pour assurer cette tangence de manière plus fiable dans le futur.

Pour ce qui est de la partie concernant les participants humains, la collecte de données a représenté un investissement considérable en termes de temps, que ce soit pour la mise en place de l'installation, le recrutement des participants, ou encore la collecte de données elle-même. À l'avenir, il serait pertinent de développer une méthode permettant d'automatiser et d'accélérer ce processus. Le développement d'une station d'analyse pourrait grandement

faciliter cette automatisation en standardisant la prise de données IR et RGB. Pour optimiser le recrutement, il serait envisageable de placer cette station d'analyse dans les halls d'hôpitaux ou de laboratoires, permettant ainsi de réaliser les collectes de données directement auprès des passants, qui signeraient un formulaire de consentement sur place.

D'un point de vue qualitatif, les données récoltées sont globalement très satisfaisantes. Cependant, dans certains cas, la capture du joint facial dans sa totalité a échoué en raison d'une rotation excessive de la chaise du participant. Concernant la capture du joint facial, seulement deux vues pourraient suffire à permettre de le capturer entièrement. La vue de gauche et la vue de droite permettent de couvrir l'entièreté du joint facial (Fig.3.7). Cependant, l'angle de prise de ces vues doit être précis. Les mouvements des participants lors des prises d'images IR et RGB compliquent l'analyse des variations de température. Bien que des outils informatiques tels que MediaPipe puissent suivre les ROI pendant un mouvement de tête, ces solutions ne sont pas totalement fiables et limitent le nombre de ROI pouvant être étudiés. Il est donc crucial de réduire ces mouvements, car ils peuvent compromettre la précision des résultats.

## **Perspectives**

Les travaux à réaliser pour poursuivre ce projet sont les suivants :

- Tester les méthodes évoquées dans ce mémoire pour la détection complète des fuites d'une PFF par imagerie infrarouge (IR) sur les trois systèmes présentés, afin de déterminer laquelle est la plus efficace. Cela inclut l'analyse des données collectées sur différents supports : plan, mannequin et sujets humains. Ce mémoire constitue une première exploration des variations de température sur ces trois systèmes. Cependant, des études futures devront approfondir cette analyse en examinant de manière plus détaillée chaque système, notamment en étudiant la corrélation entre le FF mesuré et les variations de température observées.
- Concevoir une station d'analyse portable intégrant la méthode optimale pour la détection complète des fuites d'une PFF N95. Cette station devra permettre plusieurs choses :



### **[1]. Assurer le bon positionnement du sujet humain**

Pour garantir une capture optimale des angles nécessaires à la détection des fuites d'un masque N95, il est crucial de positionner correctement le sujet humain. Voici une méthode proposée :

Utiliser un dispositif semblable à une cabine photo, où le sujet place son visage dans un cadre, assurant ainsi une immobilité relative pendant toute la durée du test et réduisant les mouvements du sujet. Pour ajuster la hauteur pour différents participants, une chaise fixée au sol, mais réglable en hauteur permettra à chaque sujet de positionner son visage correctement dans le cadre. Une fois que le sujet a maintenu son visage dans le cadre pendant au moins 5 secondes pour valider le test de positionnement, la prise d'images commencera automatiquement.

### **[2]. Capturer l'entièreté du joint facial**

Pour satisfaire à cette exigence, il est nécessaire de développer un système garantissant la capture complète du joint facial, sans faille et sans blocage du visage. Un système de travelling circulaire se déplaçant autour du participant serait une idée pour capturer le joint facial dans son intégralité. Le nombre de prises de vue nécessaires pour capturer l'intégralité du joint facial pourrait être réduit à deux au lieu de quatre. En effet, en choisissant stratégiquement deux angles (vue de gauche et vue de droite), il est possible de visualiser l'ensemble du joint facial, chaque vue couvrant 50 % de sa surface.

De plus, bloquer le visage pour éviter les mouvements du sujet humain lors de la prise d'images IR pourrait limiter la flexibilité de la technologie développée. En effet, si cette technologie montre des résultats très prometteurs, elle pourrait être directement intégrée sur les postes de travail afin de détecter les fuites des PFF N95 d'un porteur dans son environnement de travail.

### **[3]. Rendre la prise d'images rapide et automatique**

Pour alléger la charge de travail des collecteurs de données, l'automatisation de la prise d'images permettrait de gagner un temps précieux et faciliterait la collecte des données sur les participants. Cette automatisation permettra également de multiplier les données récoltées et d'accroître la précision des modèles d'IA développés. Cela permettra également d'alléger le protocole utilisé pour la collecte de données avec des sujets humains (voir annexe I).

#### **[4]. Permettre l'interchangeabilité de la caméra infrarouge**

Répondre à cette exigence permettrait de tester plusieurs caméras IR de différentes qualités pour évaluer l'efficacité de la détection et déterminer si elle reste fiable avec des caméras de moindre qualité. Il faudra donc cibler quelques caméras de prix et qualités différentes à tester ;

Une caméra de moindre qualité entraînera inévitablement une perte de résolution. Il conviendra également de réfléchir à une optimisation de la capture du joint facial. Une optimisation de la capture du joint facial permettra de maximiser le nombre de pixels étudié, ce qui augmentera la précision des résultats. Pour rendre cette technologie accessible aux industries, hôpitaux et laboratoires, il est crucial de réduire le coût des caméras IR.

#### **[5]. Continuer d'alimenter la base de données existante**

Bien que la base de données existante soit déjà conséquente, l'entraînement des modèles d'IA requiert de grandes quantités de données pour fonctionner efficacement. Les données collectées par cette nouvelle station doivent donc continuer à enrichir l'ensemble de données utilisé pour l'entraînement des modèles d'IA.

Pour cela, il est crucial de prendre en compte deux aspects : l'emplacement et le format de sauvegarde des fichiers. Le format de sauvegarde des vidéos IR varie selon chaque caméra. Par exemple, la caméra IR x8501sc utilise un format constructeur (.ats), mais il est possible d'exporter les vidéos dans un format utilisable par tous (le format .tiff). Il sera nécessaire de choisir soigneusement le format de sauvegarde et potentiellement de

développer un script pour automatiser l'exportation des données dans le format requis. Pour assurer l'enregistrement et l'exportation des données, un ordinateur dédié sera nécessaire.

Le Tableau 4.1 récapitule les différentes exigences à considérer, ainsi que des solutions potentielles pour la conception de la station d'analyse, afin d'assurer une capture infrarouge efficace du joint facial.

Tableau 4.1

Exigences et solutions potentielles pour la conception de la station d'analyse

Exigence	Solution potentielle
Assurer le bon positionnement du sujet humain	Mise en place d'un test de positionnement précis et efficace
Capter l'entièreté du joint facial	Conception d'un système de travelling pour une capture complète et précise
Rendre la prise d'images rapide et automatique	Développement d'un script informatique automatisant la prise d'images IR et RGB
Permettre l'interchangeabilité de la caméra infrarouge	Conception d'un support adaptable à différentes caméras IR
Continuer d'alimenter la base de données existante	Développement d'un script informatique garantissant la sauvegarde correcte des vidéos IR et RGB

- Tester cette station portable sur le terrain : hôpitaux, laboratoires, universités...

Une fois qu'un prototype de cette station sera réalisé et fonctionnel, il sera nécessaire de le tester sur le terrain. Pour faciliter le recrutement des participants, il serait pertinent de tester ce prototype dans les halls d'hôpitaux, de laboratoires, d'universités et de réaliser des tests avec les passants. Cela permettra également de faire connaître le projet auprès des communautés hospitalière et étudiante. Il sera nécessaire de soumettre une demande aux comités d'éthique des institutions concernées (voir annexe II et annexe IV) afin d'obtenir leur approbation pour la réalisation de ces essais.

La détection des fuites sur les PFF N95 par imagerie IR présente un fort potentiel. Automatiser cette détection à l'aide de l'intelligence artificielle et l'intégrer à une station d'analyse représenterait un progrès significatif en matière de protection respiratoire. Cette station serait la première capable de localiser et de quantifier automatiquement les fuites sur les PFF N95 grâce à l'imagerie infrarouge.

En outre, si cette technologie montre des résultats prometteurs pour les PFF N95, il serait judicieux d'élargir l'étude aux PFF R95, P95, ainsi qu'à d'autres types d'APR (demi-masques, masques complets, etc.). En effet, une protection respiratoire efficace est cruciale pour les porteurs de ces autres types de masques. L'élargissement de l'étude à d'autres APR nécessitera la collecte de données sur des sujets humains portant ces dispositifs, afin d'entraîner les modèles d'IA spécifiquement pour ces appareils de protection respiratoire. La station d'analyse facilitera cette collecte de manière rapide et efficace.

# ANNEXE I - PROTOCOLES EXPÉRIMENTAUX – PLAN & MANNEQUIN / SUJETS HUMAINS



UNIVERSITÉ  
LAVAL



UQAR

## PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL – PLAN / MANNEQUIN

### Avant collecte :

- ✓ Checker l'étanchéité globale du système (Essai avec 0 fuite FF = 200+ ?)
- ✓ Lancer la RESPIRATION pour toute la journée avec les paramètres suivants :
  - Scénario sur le logiciel ASL 5000 : **Adulte Normale**
  - MV = **10L/min**
  - Fréquence respiratoire = **15 respirations/minute**
- ✓ Lancer la chauffe de la chambre chauffante, thermostat réglé à : **80°C**
- ✓ Fréquence d'échantillonnage = **30Hz**
- ✓ S'assurer d'avoir suffisamment de particules (Pression du générateur de particules : **30PSI** – nombre de particules = 10000 à 15000)

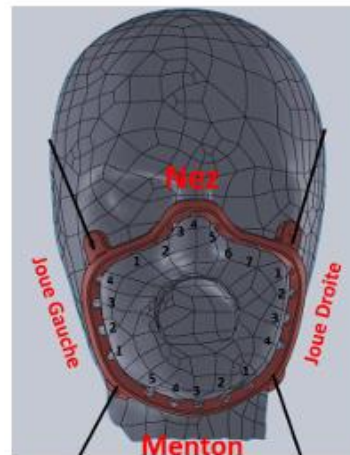
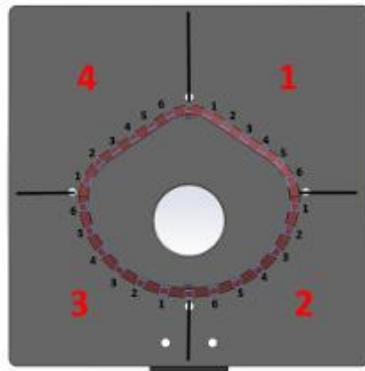
### POUR CHAQUE SCENARIO AVEC PLAN

1. Installer le **scénario**, s'assurer de la tangence de chaque aiguille avec un lampe torche.
2. Remettre le masque, s'assurer de l'étanchéité par à-coups sur le masque + regarder à l'infrarouge.
3. Réaliser **5 Tests d'ajustement** – Installation du régime permanent - *Attente 5 à 10 Minutes*.
4. Réaliser **1 Test Infrarouge** - Numéroté le Test – 30s.
5. Démontez Masque puis installer le prochain **scénario**.

### POUR CHAQUE SCENARIO AVEC MANNEQUIN

1. Installer le **scénario**, s'assurer de la tangence de chaque aiguille avec une lampe torche.
2. Remettre le masque, s'assurer de l'étanchéité par à-coups sur le masque + regarder à l'infrarouge.
3. Réaliser **5 Tests d'ajustement** – Installation du régime permanent - *Attente 5 à 10 Minutes*.
4. Réaliser **4 Tests Infrarouge** - Numéroté les Tests :
  - En face (30s) – *refaire la mise au point à chaque fois*
  - Gauche (30s) – *refaire la mise au point à chaque fois*
  - Droite (30s) – *refaire la mise au point à chaque fois*
  - Haut (30s) – *refaire la mise au point à chaque fois*
5. Démontez Masque puis installer le prochain **scénario**.

### Emplacement des fuites en fonction des scénarios :





## PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL – SUJETS HUMAINS

### AVANT COLLECTE :

- ✓ Cheveux attachés - Pas bouger / Pas parler / Pas toucher le masque
- ✓ Enlever l'auto-focus
- ✓ Fréquence d'échantillonnage = **30Hz**
- ✓ Distance du participant = **50cm**
- ✓ Enlever chapeau / lunettes / écharpes
- ✓ S'assurer d'avoir suffisamment de particules (Pression du générateur de particules : **30PSI** – nombre de particules = 10000 à 15000)

1. Le participant respire normalement en face des caméras (35 s) - **synchronisation**

### POUR 1 N95 POUR 1 PARTICIPANT

2. **Mise en place de l'N95 1 + adaptation : mouvements du visage (2min)**

#### Test Portacount 1 (durée : 3 min) :

3. Début du **Test Portacount 1**, le participant se tient assis sur une chaise :
  - Respiration normale (50s)
  - Respiration profonde (50 s)
  - Respiration normale (50 s)
4. Le participant garde le masque dans la même position sans y toucher.
5. Remplacement du capteur Portacount attaché sur le masque par un bouchon.
6. Fin du **Test Portacount 1**

#### Test Infrarouge (durée : 5 min) :

7. À la suite du test Portacount, le participant porte encore le masque sur lui
8. Début du **Test Infrarouge**, le participant respire normalement :
  - Visage en face des caméras (35 s) – **synchronisation / bouchon**
  - Visage vers le haut (35 s) - **synchronisation**
  - Visage côté gauche (35 s) - **synchronisation**
  - Visage côté droit (35 s) - **synchronisation**
9. Le participant garde le masque dans la même position sans y toucher.
10. Fin du **Test Infrarouge**, remplacement du bouchon par le capteur Portacount.

#### Test Portacount 2 (durée : 3 min) :

11. Début du **Test Portacount 2**, le participant se tient assis sur une chaise :
  - Respiration normale (50s)
  - Respiration profonde (50 s)
  - Respiration normale (50 s)
12. Le participant peut retirer son masque.
13. Fin du **Test Portacount 2**.

**Attente de 2 minutes pour passer à l'autre N95**

## ANNEXE II - APPROBATION DU CER-UQAR



Le 26 septembre 2023

À l'attention de :

Jean Brousseau  
Département de mathématiques, informatique et génie

**Titre** : Appareils de protection respiratoire - Développement d'une méthode simple d'utilisation pour détecter et localiser les fuites et pour évaluer l'étanchéité du joint facial à l'aide de l'imagerie infrarouge

**# Projet** : 2024-276

**Objet** : Approbation éthique de votre projet de recherche

---

Bonjour,

Votre projet de recherche a fait l'objet d'une évaluation en matière d'éthique de la recherche avec des êtres humains par les membres du sous-comité délégué à l'évaluation des demandes soumises au Comité d'éthique de la recherche de l'Université du Québec à Rimouski (CER-UQAR) ainsi que moi-même, à titre de président de ce comité. Nous sommes heureux de vous annoncer qu'un certificat d'éthique peut vous être délivré pour votre projet de recherche, à risque minimal, intitulé : Appareils de protection respiratoire - Développement d'une méthode simple d'utilisation pour détecter et localiser les fuites et pour évaluer l'étanchéité du joint facial à l'aide de l'imagerie infrarouge.

Un certificat d'approbation éthique qui atteste de la conformité de votre projet de recherche à la [Politique d'éthique de la recherche avec des êtres humains](#) de l'UQAR est émis en date du 26 septembre 2023. Vous pouvez dès maintenant débiter vos activités de recherche. Prenez note que ce certificat est valide jusqu'au **26 septembre 2024**.

Selon la [Politique d'éthique de la recherche avec des êtres humains](#), il est de la responsabilité des chercheurs d'élaborer des projets de recherche qui respectent l'ensemble des principes éthiques et d'assurer le respect et la protection des droits des personnes qui participent à la recherche. Vous devrez obtenir le renouvellement de votre approbation éthique avant l'expiration de ce certificat. Vous devez soumettre à l'approbation du CER-UQAR, toute modifications dans le déroulement d'une activité qui touche la nature de la participation des personnes. De plus, vous devez signaler tout incident significatif dès qu'il survient ainsi que les modifications apportées à votre projet.

Enfin, puisque votre demande d'approbation pourrait être liée à un financement, le Décanat de la recherche est mis en copie conforme.

Dans le cadre de l'Entente pour la reconnaissance des certificats d'éthique des projets de recherche à risque minimal, il est de votre responsabilité d'informer vos cochercheurs de l'obtention de votre certification et de leur transmettre les documents addérants le cas échéant.

En vous souhaitant le meilleur des succès dans la réalisation de votre recherche, veuillez recevoir nos salutations distinguées.

**Le CER-UQAR**

Bruno Bouchard, Ph. D., CPA

Président du Comité d'Éthique de la Recherche - UQAR (CER-UQAR)

Professeur, Unité départementale des sciences de la gestion

[cer@uqar.ca](mailto:cer@uqar.ca)

### CERTIFICAT D'APPROBATION ÉTHIQUE

Le Comité d'éthique de la recherche de l'Université du Québec à Rimouski (CER-UQAR), certifie, conjointement avec la personne titulaire de ce certificat, que le présent projet de recherche prévoit que les êtres humains qui y participent seront traités conformément aux principes de l'Énoncé de politique des trois Conseils : Éthique de la recherche avec des êtres humains ainsi qu'aux normes et principes en vigueur dans la Politique d'éthique avec les êtres humains de l'UQAR (C2-D32).

---

**Projet # :** 2024-276

**Titre du projet de recherche :** Appareils de protection respiratoire - Développement d'une méthode simple d'utilisation pour détecter et localiser les fuites et pour évaluer l'étanchéité du joint facial à l'aide de l'imagerie infrarouge

**Chercheur principal à l'UQAR**

Jean Brousseau,

Département de mathématiques, informatique et génie

**Direction / Codirection de recherche**

En provenance de l'UQAR: (donnée introuvable)

En provenance de l'externe: (donnée introuvable)

**Cochercheur(s)**

En provenance de l'UQAR: Yacine Yaddaden; Xavier Maldague; Ali Bahloul; Clothilde Brochot; Geoffrey Marchais; Barthélemy Topilko; Mohamed Arbane

En provenance de l'externe: Yacine Yaddaden; Xavier Maldague; Ali Bahloul; Clothilde Brochot; Geoffrey Marchais; Barthélemy Topilko; Mohamed Arbane

**Financement :**

**Date d'approbation du projet :** 26 septembre 2023

**Date d'entrée en vigueur du certificat :** 26 septembre 2023

**Date d'échéance du certificat :** 26 septembre 2024

*N.B. Un rappel automatique vous sera envoyé par courriel quelques semaines avant l'échéance de votre certificat afin de remplir le formulaire F7 - Renouvellement annuel.*



- Si votre projet se termine avant la date du prochain renouvellement, veuillez remplir le formulaire **F9 - Fin de projet**.
- Si des modifications sont apportées à votre projet avant l'échéance du certificat, veuillez remplir le formulaire **F8 - Modification de projet**.
- Tout nouveau membre de votre équipe de recherche devra être déclaré au CER-UQAR lors de votre prochaine demande de renouvellement ou lors de la fin de votre projet si le renouvellement n'est pas requis. ATTENTION: Vous devez faire signer une déclaration d'honneur aux personnes ayant accès aux participants (ou à des données nominatives sur les participants) et la conserver dans vos dossiers de recherche.

---

Bruno Bouchard

Signé le 2023-09-26 à 08:17

## ANNEXE III - LES OUTILS DE RECRUTEMENT



### Outils de recrutement

#### Déroulé du recrutement :

Le recrutement se fera en plusieurs temps, tout d'abord il est nécessaire d'avoir l'accord du comité d'éthique de l'Université Laval pour recruter des participants dans leur communauté étudiante. Une fois l'accord obtenu, nous commencerons notre recrutement, celui-ci se fera à l'aide d'une affiche (fichier : 1. Affiche). Cette affiche sera partagée sur les babillards de l'Université Laval, sur les tables des cafétérias. En parallèle, nous diffuserons une annonce de recrutement à l'aide d'un de l'Université Laval. Cet outil est un mail groupé à la communauté étudiante de l'Université Laval qui répertorie les annonces de recrutement, nous utiliserons cet outil pour diffuser cette affiche (fichier : 3. Mail\_de\_recrutement) en suivant les différentes instructions obligatoires (fichier : instructions-diffusion-annonces-de-recrutement-recherche)

Sur cette affiche, sera noté un lien et un QR code à ouvrir/scanner afin d'avoir accès au formulaire (fichier : 2. Formulaire\_prise\_de\_contact) dans le but d'être contacté si le/la participant(e) est intéressé(e) par cette collecte de données. La personne intéressée remplit ce formulaire (adresse mail/ numéro de téléphone) en précisant son consentement d'être contactée.

Ensuite, le responsable de la collecte de données prendra contact (fichier : 4. Mail\_prise\_de\_contact) avec cette personne en lui expliquant brièvement le déroulement de la collecte de données. Le responsable fournira également dans le mail une copie du formulaire de consentement de la collecte de données pour une première lecture par le/la participant(e). Enfin, une prise de rendez-vous pour la collecte de données sera faite grâce à un lien Doodle qui sera également fourni.

#### 1. Affiche : (pièce ci-après)

- Dans le haut de l'affiche : Le titre du projet : *Développement d'une méthode simple pour détecter et localiser les fuites et pour évaluer l'étanchéité d'un masque N95 à l'aide de l'imagerie infrarouge.*
- Au centre haut : Une explication de l'objectif, du besoin de la collecte de données et des critères d'admissibilité.
- Au centre bas : Une explication du déroulement de l'étude avec une brève description de ce que le participant aura à faire plus les informations de durée et de compensation.
- Dans le bas : Un QR code et un lien de l'adresse du formulaire pour la prise de contact.

#### 2. Formulaire prise de contact : (pièce ci-dessous)

Ce formulaire comporte seulement 1 page, ce formulaire permet de recueillir les informations suivantes : nom, prénom, numéro, adresse mail, de s'assurer du consentement du participant à être contacté, du choix de préférence pour la prise de contact.

Prise de contact pour l'étude sur les fuites d'un  
masque N95

1. Indiquez votre prénom + nom \*\*
2. Indiquez votre numéro de téléphone \*\*
3. Indiquez votre adresse courriel \*\*
4. Dites-moi si vous consentez à ce que nous vous contactions en lien avec cette étude?  
 Oui  
 Non
5. De quelle façon préférez-vous être contacté?  
 Téléphone  
 Mail
6. Vous pouvez laisser vos questions et commentaires ici \*\*

### 3. Mail de recrutement : (pièce fournie dans la demande)

Dans le mail de recrutement, sera affiché seulement l'affiche avec comme destinataire la communauté étudiante de l'Université Laval et comme objet le titre du projet : *Développement d'une méthode simple pour détecter et localiser les fuites et pour évaluer l'étanchéité d'un masque N95 à l'aide de l'imagerie infrarouge.*

### 4. Mail de prise de contact : (pièce fournie ci-dessous)

Le mail prise de contact est le mail qui débutera l'échange entre le collecteur de données et le participant. Dans celui-ci nous pouvons retrouver une brève explication du début de la collecte et également une invitation à lire le formulaire de consentement joint. De plus, le participant pourra également prendre un rendez-vous en suivant un lien Doodle.





## Recherche de participants

### Appareils de protection respiratoire Développement d'une méthode simple d'utilisation pour détecter et localiser les fuites et pour évaluer l'étanchéité du joint facial à l'aide de l'imagerie infrarouge

Nous recherchons des volontaires pour réaliser une étude quantitative sur **le campus de l'Université Laval** (Pavillon Adrien Pouliot) qui vise à localiser et quantifier les fuites d'un masque N95 à l'aide de la technologie infrarouge et d'une intelligence artificielle. Cette collecte de données débute le **30 octobre 2023**. La recherche se déroulera dans des conditions sanitaires normales et saines, n'impliquant aucun risque pour la santé.

#### Critères d'admissibilité

- Ne pas présenter de symptômes grippaux
- Ne pas présenter d'irritation ou d'inflammation de la peau au niveau du visage
- Ne pas avoir bu, mangé, fumé 1 h avant la rencontre
- Pour les hommes, être rasé de près, 24h avant au minimum

#### Déroulement de l'étude

- L'étude est d'une durée approximative de **1 h 15**.
- Elle consiste à porter plusieurs masques N95 et à réaliser deux tests : un test d'ajustement et un test infrarouge. Le test d'ajustement consiste à relever le nombre de particules à l'intérieur et à l'extérieur du masque au cours de deux épisodes de respiration normale et d'un épisode de respiration profonde. Tandis que le test infrarouge consiste à respirer normalement devant une caméra infrarouge en maintenant son visage dans quatre positions différentes (en face, vers le haut, à gauche et à droite par rapport à la caméra).
- Une compensation monétaire de **20\$** vous sera offerte.
- Cette étude vous apportera des connaissances sur les différentes possibilités de vérifier la qualité de l'étanchéité d'un masque N95 mais également vous permettra de contribuer au développement d'une méthode pour aider les porteurs de masque N95 à bien l'ajuster.

#### Votre participation



Pour être contacté, visitez :  
<https://forms.office.com/r/HVWBf4H7My>



Pour toute question, écrivez à :  
[geoffrey.marchais.1@ulaval.ca](mailto:geoffrey.marchais.1@ulaval.ca)



Ce projet est sous la responsabilité de Geoffrey Marchais, étudiant à la Maîtrise en Ingénierie (Msc), supervisé par le professeur Jean Brousseau, Ph. D., à l'Université du Québec à Rimouski et co-dirigé par le professeur Xavier Maldague, Ph. D., à l'Université Laval. Approuvé le 26-09-2023 par le Comité d'éthique de la recherche de l'Université du Québec à Rimouski (CER-UQAR). No de référence : 2024-276. Ce projet a été approuvé par le Comité d'éthique de la recherche de l'Université Laval : No d'approbation 2023-352 / 31-10-2023





## Guide pour se rendre au laboratoire **PLT-00117**

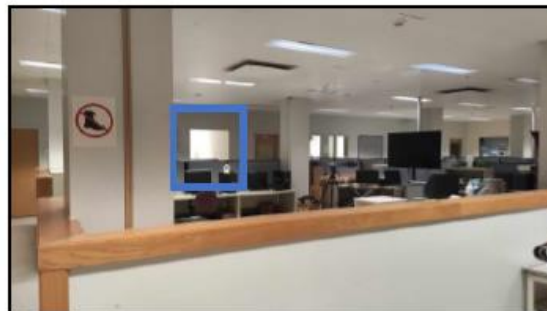
- Rentrez par l'entrée ci-jointe (point rouge) du Pavillon Adrien-Pouliot (adresse : 1050 Avenue de la Médecine, Québec, QC G1V 0A6)



- Ensuite passez par la porte de gauche (numéro : 1100-A) puis descendez tout en bas, vous trouverez la porte (numéro : 00100 – A, normalement ouverte)



- Une fois dans le Laboratoire de Vision Numérique (photo ci-joint), empruntez le couloir (encadré en bleu), puis sur votre gauche vous trouverez la porte du laboratoire **PLT - 00117**.



- Si la première entrée est fermée, utilisez les portes situées à droite de l'entrée, puis dirigez-vous vers la gauche pour ensuite emprunter la porte pour le tunnel en direction du Pavillon Alexandre Vachon (**Pavillon Alexandre-Vachon via couloir**).



- Juste après cette porte, prenez directement à la porte de droite (**flèche orange**), puis passez par la porte **numéro : 0119 – A**, puis descendez jusqu'en bas des escaliers



- Passez par la porte puis tournez directement à droite, continuez dans le couloir puis sur votre droite vous trouverez la porte du **laboratoire PLT - 00117**.



Si jamais vous êtes bloqués devant une porte fermée à clé, appelez-moi au numéro suivant : 450-328-6151

## ANNEXE IV - LES OUTILS DE CONSENTEMENT

**UQAR**

Comité d'éthique de la recherche  
Université du Québec à Rimouski

### DÉCLARATION D'HONNEUR

Je, soussigné(e) Geoffrey Marchais, à titre de co-chercheur, pour le projet de recherche intitulé : **Appareil de protection respiratoire - Développement d'une méthode simple d'utilisation pour détecter et localiser les fuites et pour évaluer l'étanchéité du joint facial à l'aide de l'imagerie infrarouge**, m'engage à respecter le caractère confidentiel de toute information nominative à laquelle j'aurai accès dans le cadre du projet de recherche ci-haut mentionné et à ne pas divulguer, reproduire ou utiliser, d'une quelconque manière, cette information autrement que pour les fins pour lesquelles elle m'est communiquée.

Je m'engage également à respecter la *Politique d'éthique de la recherche avec des êtres humains* de l'Université du Québec à Rimouski, *l'Énoncé de politique des trois conseils : éthique de la recherche avec des êtres humains 2* (2018) ainsi que la loi et les règles de l'art en matière d'éthique de la recherche avec des êtres humains et ce, tant au niveau de la cueillette d'information confidentielle, de son traitement que de sa diffusion.

J'ai signé à Québec, ce 6 jour du mois de juillet de l'an 2023.

**Nom**  
Geoffrey Marchais

**Adresse**  
345 rue Richelieu, G1R 1J9, Québec, Canada

**Téléphone**  
+450 328 6151

**Courriel**  
geoffreymarchais@outlook.fr

**Barthélemy Topilko**

Témoin

Signature

*Marchais*



Signature

## FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT (FIC) CONCERNANT LA PARTICIPATION

### 1 TITRE DU PROJET

Appareils de protection respiratoire - Développement d'une méthode simple d'utilisation pour détecter et localiser les fuites et pour évaluer l'étanchéité du joint facial à l'aide de l'imagerie infrarouge

### 2 RESPONSABLE(S) DU PROJET DE RECHERCHE

#### 2.1 Responsable

- Jean Brousseau, professeur en génie mécanique, département de mathématiques, d'informatique et de génie, UQAR

#### 2.2 Cochercheur

- Ali Bahloul, Chercheur, Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST)
- Xavier Maldague, Professeur, Département de génie et électrique et de génie informatique, Université Laval
- Yacine Yaddaden, Professeur en informatique, département de Mathématiques, d'informatique et de génie, UQAR
- Clothilde Brochot, Professionnelle de recherche, Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST)
- Geoffrey Marchais, étudiant à la maîtrise en ingénierie, UQAR
- Barthélemy Topilko, étudiant à la maîtrise en ingénierie, UQAR
- Mohamed Arbane, étudiant à la maîtrise en ingénierie, UQAR

### 3 FINANCEMENT

INSTITUT DE RECHERCHE ROBERT-SAUVÉ EN SANTÉ ET EN SÉCURITÉ DU TRAVAIL (IRSST)

---

### 4 CONFLIT D'INTÉRÊTS

Il n'y a aucun conflit d'intérêts.

---

### 5 PRÉAMBULE

Madame, Monsieur,  
Nous sollicitons votre participation au projet de recherche en titre, en tant que personne majeure apte à consentir librement.

Nous sollicitons votre participation à un projet de recherche. Avant d'accepter de participer à ce projet, veuillez prendre le temps de lire, de comprendre et de considérer attentivement les renseignements qui suivent. Ce formulaire de consentement peut contenir des mots que vous ne comprenez pas. Nous vous invitons à poser toutes les questions que vous jugerez utiles et à demander de vous expliquer tout mot ou renseignement qui n'est pas clair lors de votre entretien avec un membre de l'équipe de recherche. Ce dernier prendra le temps de lire avec vous le présent document.

### 6 NATURE, OBJECTIFS ET DÉROULEMENT DU PROJET DE RECHERCHE

#### 6.1 Description du projet de recherche



Un appareil de protection respiratoire (APR) est un dispositif destiné à protéger le porteur de l'inhalation d'aérosols nocifs, l'APR qui a été le plus utilisé en Amérique du Nord lors de la covid-19 a été le masque N95. Toutefois, une protection adéquate ne peut être fournie que par des respirateurs bien ajustés au visage du porteur, c'est-à-dire un respirateur qui ne comporte pas de fuite et qui est étanche lors de son utilisation. L'étanchéité du masque sur un porteur peut être déterminé par des tests qualitatifs ou quantitatifs (test d'ajustement). La méthode qualitative consiste en un test d'odeur lors d'une utilisation d'un APR. Si le porteur de l'APR détecte une odeur (préalablement connue), alors l'APR n'est pas bien ajusté. Quant à la méthode quantitative, celle-ci consiste à étudier le rapport (facteur d'ajustement) entre le nombre de particules à l'extérieur et à l'intérieur d'un APR grâce à un compteur de particules de type PortaCount. Les particules en question peuvent être générées par un générateur de particules ou encore être déjà présentes en quantité dans la pièce. Par ailleurs, le porteur doit aussi effectuer, avant chaque utilisation, un autotest d'étanchéité (fit check). Cela consiste à expirer ou à inspirer profondément puis à tenir sa respiration 5 secondes, ensuite l'individu doit observer la réaction de l'APR, si l'APR garde sa position pendant ces 5 secondes alors il est bien ajusté. Des études sur le succès ces autotests d'étanchéité ont montré qu'un grand nombre d'utilisateurs ne font pas une vérification adéquate. Il paraît donc essentiel de trouver des méthodes alternatives aux tests d'ajustement conventionnels, en simplifiant et écourtant ces essais.

## 6.2 Objectif(s) spécifique(s)

Le but du projet est de développer une méthode capable d'évaluer l'étanchéité du joint facial, de localiser les fuites et d'en déterminer l'importance à l'aide de l'imagerie infrarouge. Nous utiliserons l'imagerie infrarouge puisque notre projet repose sur un principe physique simple : l'air expiré (température de corps : 37°C) est à plus haute température que l'air inspiré (température de la pièce où se trouve l'individu : 22-23°C). Si un APR présente une fuite, nous serons capable de détecter les variations de température sur le visage d'un individu à l'endroit de la fuite. De façon plus spécifique, les objectifs du projet sont : i) de détecter et localiser les zones de fuite par l'imagerie infrarouge ; ii) de quantifier l'importance des fuites et iii) de travailler dans la perspective de développer une station d'évaluation du joint facial adaptée aux différents milieux de travail et en proposer une conception préliminaire.

Pour atteindre ces objectifs, la méthodologie se présente sous quatre volets interreliés. 1) Nous adapterons une installation expérimentale et définirons une démarche permettant de corréler les résultats infrarouges et les mesures obtenus à partir de compteurs de particules du type Portacount. 2) Nous explorerons différentes approches de traitement numérique de l'information (traitement d'image et intelligence artificielle) permettant d'exploiter le potentiel de l'imagerie infrarouge. 3) Nous élaborerons un modèle numérique multiphysique pour étudier l'influence des nombreux paramètres et pour générer des images qui enrichiront la base de données qui sera utilisée en apprentissage profond. 4) Nous développerons la méthode d'analyse du joint facial en nous basant sur la meilleure approche ou une combinaison d'approches de traitement numérique des images infrarouge.

Pour atteindre les objectifs du projet, nous avons besoin de constituer une base de données d'images visibles et infrarouges de personnes portant des APR. La base de données servira à entraîner et à tester différentes approches de traitement numérique et à corréler les mesures infrarouges et les données expérimentales obtenues à partir de compteurs de particules du type Portacount. Nous n'utiliserons en aucun cas des aérosols nocifs pour les personnes. Les particules nécessaires pour réaliser ces tests d'ajustement d'APR sont déjà présentes dans les pièces où nous évoluons. L'efficacité des APR sera observée simplement par la respiration normale. La recherche se déroulera dans des conditions sanitaires normales et saines, n'impliquant aucun risque pour la santé.

Nous voulons que la base de données puisse être utilisées par d'autres équipes de recherche via un License qui restreint l'utilisation aux équipes de recherche qui en font la demande et qui accepte les termes du document de licence (Annexe page 8).

Il s'agit de la première base de données constituée de séquences vidéos dans le visible et l'infrarouge de porteurs d'APR. La base de données peut aider la communauté des chercheurs à réaliser des travaux visant à accroître la sécurité des porteurs

d'APR. La nouvelle base de données pourra être une ressource précieuse pour l'évaluation d'algorithmes permettant d'évaluer l'étanchéité des APR.

### 6.3 Déroulement

Votre participation à ce projet de recherche consistera à porter quatre modèles d'appareil de protection respiratoire (APR) et à respirer une dizaine de fois devant une caméra visible et une caméra infrarouge qui capteront l'exercice. Pour chaque modèle d'APR, le participant prend part à une séance de mesure du facteur d'ajustement à l'aide d'un appareil utilisé dans le milieu de la santé (PortaCount Pro+ modèle 8038, TSI, USA). Le temps nécessaire pour participer à l'expérimentation est d'environ une heure et 15 minutes. Le tableau ci-dessous présente plus en détail le déroulement de la séance de mesure.

Tableau 1 : Déroulement et durée de l'expérimentation

Activité	Description	Temps
1. Description de la séance	Présentation du déroulement et signature du consentement	10 minutes
2. Captation des images sans APR	Pour commencer, le participant se place devant les deux caméras sans APR et respire normalement.	35 secondes
3. Mise en place de l'APR 1	Sous la supervision de la personne qui dirige la séance de mesure, le participant met en place l'APR en suivant les directions du constructeur de l'APR et s'assure qu'il est correctement porté.	1 minutes
4. Mesure du facteur d'ajustement pour l'APR 1 – Test Portacount	Le participant s'assoit sur une chaise puis réalise trois exercices successivement : respiration normale (45 secondes), respiration profonde (40 secondes) puis respiration normale (45 secondes).	3 minutes
5. Captation des images pour l'APR 1 – Test Infrarouge	Le participant se place devant les deux caméras et réalise 1 exercice de respiration normale pendant 35 secondes et il réalise cet exercice dans 4 positions différentes successivement.	6 minutes
6. Attente	Le participant attend quelques instants pour refaire les deux tests avec un nouveau APR	5 minutes
7. Reprise des étape 2, 3, 4 et 5 pour l'APR 2	La mise en place d'un nouveau modèle d'APR et la captation des cycles de respiration et la mesure du facteur d'ajustement.	15 minutes
8. Reprise des étape 2, 3, 4 et 5	La mise en place d'un nouveau	15 minutes

Approuvé le 26-09-2023 par le Comité d'éthique de la recherche de l'Université du Québec à Rimouski (CER-UQAR). No de référence : 2024-276. Pour toutes questions touchant l'éthique de cette recherche, vous pouvez contacter le CER-UQAR par mail : cer@uqar.ca ou par téléphone : 418-723-1986. Ce projet a été approuvé par le Comité d'éthique de la recherche de l'Université Laval : No d'approbation 2023-352 / 31-10-2023

pour l'APR 3	modèle d'APR et la captation des cycles de respiration et la mesure du facteur d'ajustement.	
9. Reprise des étapes 2, 3, 4 et 5 pour l'APR 4	La mise en place d'un nouveau modèle d'APR et la captation des cycles de respiration et la mesure du facteur d'ajustement.	15 minutes
10. Retour sur la séance et réponse aux questions		5 minutes

## 7 AVANTAGES, RISQUES ET/OU INCONVÉNIENTS ASSOCIÉS AU PROJET DE RECHERCHE

La recherche n'entraîne pas de risque ou de désavantage prévisible pour le participant, hors d'avoir à consacrer le temps nécessaire pour participer à ce projet. En effet, l'inconvénient pour cette collecte de données est le temps requis, il faut compter 1h15 par individu pour collecter la totalité des données nécessaires pour notre étude. Cependant, cette expérience vous permettra d'en apprendre un peu plus sur les facteurs à respecter lors du port d'un appareil de protection respiratoire et de la possibilité de vérifier la qualité du joint facial en utilisant l'imagerie infrarouge. Le projet de recherche contribuera à l'avancement des connaissances et au développement d'une méthode simple et rapide pour aider les porteurs d'un appareil respiratoire à vérifier la qualité d'ajustement de leur APR.

## 8 CONFIDENTIALITÉ, CONSERVATION ET ADMINISTRATION DES DONNÉES & DIFFUSION

### 8.1 Confidentialité

Les images visibles (RGB) et infrarouges (IR) et les mesures du facteur d'ajustement seront recueillies par des étudiants gradués travaillant sur le projet de recherche.

Pour pouvoir retrouver facilement les données recueillies lors d'une séance avec un participant, une liste contenant les noms des participants et les noms de fichiers qui contiennent les données brutes de chaque participant sera conservée dans le respect de la politique de conservation des données de l'UQAR.

C'est le chercheur principal qui est responsable de contrôler l'accès au matériel brut, à la liste des participants et aux formulaires de consentement.

Les images visuelles et infrarouges seront mises à la disposition des chercheurs du projet en utilisant la solution infonuagique proposée par l'UQAR et seront intégrées à une base de données qui servira aux développements prévus dans le cadre du projet. Les images en format visible des participants seront rendues non identificatoires avant d'être utilisées dans une publication.

Le participant pourra consulter les données le concernant en adressant sa demande au chercheur principal.

À la fin du projet, la base de données ne sera pas détruite. Les données demeureront disponibles pour la recherche et seront sauvegardées dans l'entrepôt de données institutionnelles sécurisées de l'UQAR (SABRE).

## 8.2 Diffusion

**Les données recueillies seront regroupées dans une base de données. L'équipe de recherche s'engage lors de toute diffusion des résultats dans des rapports ou article à n'utiliser que des images non identificatoires.**

Les images visibles seront rendues non identificatoires par floutage et caviardage.

Sur demande et au cas par cas, la base de données sera mise à la disposition de la communauté des chercheurs qui travaillent à améliorer la sécurité des porteurs d'APR. Les chercheurs pourront avoir accès aux données à condition de signer une licence d'accès aux données qui les engage à respecter les trois conditions suivantes :

- 1- La base de données ne sera pas distribuée, publiée, copiée ou diffusée ultérieurement, de quelque manière ou sous quelque forme que ce soit, que ce soit à des fins lucratives ou non. Cela inclut la distribution, la copie ou la diffusion ultérieure à une unité de l'université, de l'organisation ou de la société requérante.
- 2- Seules des images non identificatoires apparaîtront dans des rapports techniques, des articles techniques et des documents techniques traitant de la recherche sur la reconnaissance des visages.
- 3- Tous les documents et articles qui rendent compte d'une recherche utilisant la base de données doivent mentionner l'utilisation de la base de données. L'utilisation de la base de données sera reconnue comme suit : "Des parties de la recherche dans ce document utilisent la base de données de séquences vidéos dans le visible et dans l'infrarouge de porteurs d'APR recueillies dans le cadre d'un projet de développement d'une méthode de détection, localisation et d'évaluation des fuites chez les porteurs d'APR et financé par l'RSSST. On peut obtenir plus d'informations sur cette base de données en contactant : Geoffrey Marchais, étudiant, UQAR, geoffrey.marchais.1@ulaval.ca

En ce qui concerne les conclusions de l'étude et l'utilité de cette collecte de données, nous rédigerons des articles techniques où nous montrerons une utilisation de cette base de données. Nous recontacterons les participants par courriel et nous leur transmettrons les articles techniques rédigés, les conclusions de nos travaux et les suites qui seront données à notre projet.

Ces articles techniques seront également publiés dans des conférences et des journaux.

## 9 PARTICIPATION VOLONTAIRE ET DROIT DE RETRAIT

Votre participation à ce projet de recherche est volontaire. Vous êtes donc libre de refuser d'y participer. Vous pouvez également arrêter de participer à l'expérimentation sans avoir à donner de raisons, simplement en faisant connaître votre décision à la personne responsable de la collecte de données. En cas de retrait, les données recueillies seront détruites si vous le demandez, à condition que votre demande soit faite dans un délai n'excédant pas six mois après la séance d'expérimentation.

## 10 INDEMNITÉ COMPENSATOIRE

Vous recevrez une somme forfaitaire de 20\$ en compensation des frais encourus et des contraintes subies. En cas de retrait du projet avant qu'il ne soit complété, un montant proportionnel à la durée de la participation sera offert. Par exemple si vous décidez de cesser votre participation après la moitié de la séance, vous recevrez la moitié de la compensation.

## 11 PERSONNES-RESSOURCES

Si vous avez des questions concernant le projet de recherche ou si vous éprouvez un problème que vous croyez relié à votre participation au projet de recherche, vous pouvez communiquer avec le responsable du projet de recherche aux coordonnées suivantes :

- Responsable de la collecte de donnée : Geoffrey Marchais, étudiant, UQAR, geoffrey.marchais.1@ulaval.ca
- Responsable du projet : Jean Brousseau, professeur, UQAR, jean\_brousseau@uqar.ca

---

Approuvé le 26-09-2023 par le Comité d'éthique de la recherche de l'Université du Québec à Rimouski (CER-UQAR). No de référence : 2024-276. Pour toutes questions touchant l'éthique de cette recherche, vous pouvez contacter le CER-UQAR par mail : cer@uqar.ca ou par téléphone : 418-723-1986. Ce projet a été approuvé par le Comité d'éthique de la recherche de l'Université Laval : No d'approbation 2023-352 / 31-10-2023



Pour toute question d'ordre éthique concernant votre participation à ce projet de recherche, vous pouvez communiquer avec le Comité d'éthique de la recherche de l'Université du Québec à Rimouski par mail : [cer@uqar.ca](mailto:cer@uqar.ca) ou par téléphone : 418-723-1986.

## 12 REMERCIEMENTS

Nous tenons à vous remercier d'accepter de participer au projet. Votre collaboration est précieuse pour la réalisation de la recherche et nous apprécions le temps vous consacrez à la collecte de données.

### 13 CONSENTEMENT DU PARTICIPANT

Dans le cadre du projet intitulé : « Appareils de protection respiratoire - Développement d'une méthode simple d'utilisation pour détecter et localiser les fuites et pour évaluer l'étanchéité du joint facial à l'aide de l'imagerie infrarouge », j'ai pris connaissance du formulaire d'information et de consentement et je comprends suffisamment bien le projet pour que mon consentement soit éclairé. Je suis satisfait des réponses à mes questions et du temps que j'ai eu pour prendre ma décision. Je consens donc à participer à ce projet de recherche aux conditions qui y sont énoncées. Je comprends que je suis libre d'accepter de participer et que je pourrai me retirer en tout temps de la recherche si je le désire, sans aucun préjudice ni justification de ma part. Une copie signée et datée du présent formulaire d'information et de consentement m'a été remise.

**Comme nous vous l'avons mentionné, les données recueillies dans le cadre d'autres projets de recherche pourront être utilisées pour d'autres recherches menées par la même équipe de chercheurs ou d'autres équipes ayant accepté les conditions stipulées dans la licence d'accès (voir annexe 1).**

- Je consens à ce que les données recueillies soient utilisées dans le cadre d'un autre projet de recherche selon les conditions décrites à l'annexe 1.

---

Nom et signature du participant

Date

J'ai expliqué au participant à la recherche les termes du présent formulaire d'information et de consentement et j'ai répondu aux questions qu'il m'a posées.

*Marchais*

2023-11-07

---

Nom et signature de la personne qui obtient le consentement

Date

#### Signature et engagement du chercheur responsable du projet

Je certifie avoir moi-même, ou un membre autorisé de l'équipe de recherche, expliqué au participant les termes du présent formulaire d'information et de consentement, répondu aux questions qu'il a posées et lui avoir clairement indiqué qu'il pouvait à tout moment mettre un terme à sa participation, et ce, sans préjudice. Je m'engage, avec l'équipe de recherche, à respecter ce qui a été convenu au formulaire d'information et de consentement et à en remettre une copie signée au participant à cette recherche.

*Jean Brousseau*

2023-11-07

---

Nom et signature du chercheur responsable du projet de recherche

Date

---

Approuvé le 26-09-2023 par le Comité d'éthique de la recherche de l'Université du Québec à Rimouski (CER-UQAR). No de référence : 2024-276. Pour toutes questions touchant l'éthique de cette recherche, vous pouvez contacter le CER-UQAR par mail : cer@uqar.ca ou par téléphone : 418-723-1986. Ce projet a été approuvé par le Comité d'éthique de la recherche de l'Université Laval : No d'approbation 2023-352 / 31-10-2023

**14 CONSENTEMENT DU PARTICIPANT (Copie de l'équipe de recherche)**

**ATTENTION : Cette section doit être identique à la précédente. Elle permet à l'équipe de recherche de conserver une preuve de la participation en gardant uniquement la dernière page signée du Formulaire d'information et de consentement (FIC) tout en permettant au participant de conserver une copie signée du FIC et en évitant de devoir effectuer une copie entière de celui-ci. Puisqu'une copie électronique du FIC est enregistrée dans votre dossier, cela est tout à fait acceptable et contribue à la préservation de l'environnement.**

Dans le cadre du projet visant le développement d'une méthode permettant d'évaluer l'étanchéité d'un APR à l'aide de l'imagerie infrarouge, j'ai pris connaissance du formulaire d'information et de consentement et je comprends suffisamment bien le projet pour que mon consentement soit éclairé. Je suis satisfait des réponses à mes questions et du temps que j'ai eu pour prendre ma décision. Je consens donc à participer à ce projet de recherche aux conditions qui y sont énoncées. Je comprends que je suis libre d'accepter de participer et que je pourrai me retirer en tout temps de la recherche si je le désire, sans aucun préjudice ni justification de ma part. Une copie signée et datée du présent formulaire d'information et de consentement m'a été remise.

---

 Nom et signature du participant

Date

**Signature de la personne qui a obtenu le consentement [Seulement si cette personne est différente du chercheur responsable. Dans le cas contraire, veuillez retirer cette section]**

J'ai expliqué au participant à la recherche les termes du présent formulaire d'information et de consentement et j'ai répondu aux questions qu'il m'a posées.

*Marchais*

2023-11-07

---

 Nom et signature de la personne qui obtient le consentement

Date

**Signature et engagement du chercheur responsable du projet**

Je certifie que j'ai (ou un membre autorisé de l'équipe de recherche) expliqué au participant les termes du présent formulaire d'information et de consentement, répondu aux questions qu'il a posées et lui ai clairement indiqué qu'il pouvait à tout moment mettre un terme à sa participation, et ce, sans préjudice. Je m'engage, avec l'équipe de recherche, à respecter ce qui a été convenu au formulaire d'information et de consentement et à en remettre une copie signée au participant à cette recherche.

*Jean Brousseau*

2023-11-07

---

 Nom et signature du chercheur responsable du projet de recherche

Date

## ANNEXE

Licence pour avoir l'accès à la base de données.

Séquences vidéos visibles et infrarouges de porteurs d'APR participant à des exercices de respiration – Vidéos RGB-IR Porteurs d'APR (UQAR / ULaval / IRSST).

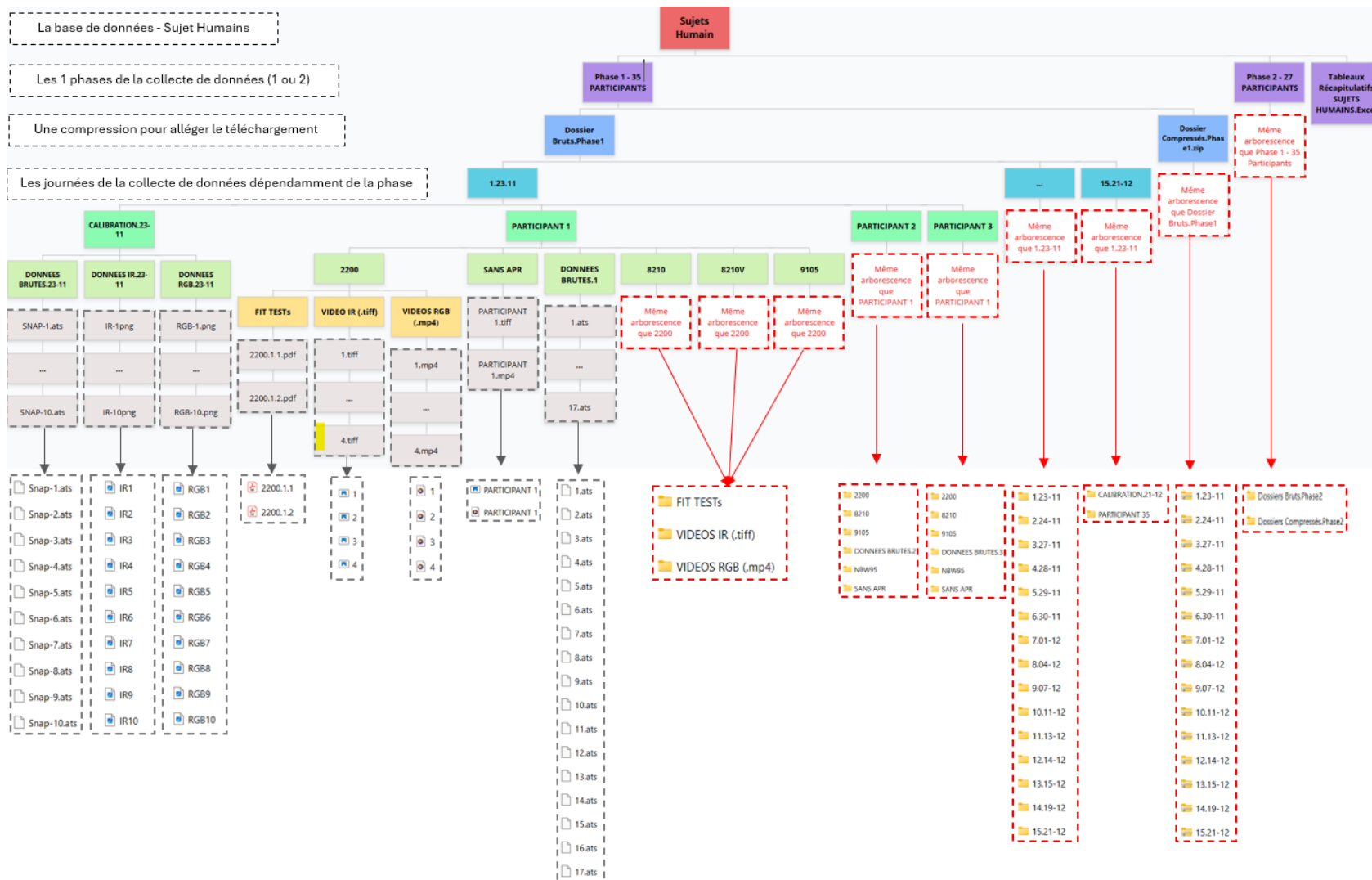
Pour faire progresser la sécurité des porteurs d'APR, la base de données des séquences vidéos visibles (RGB) et infrarouges de porteurs d'APR sera mis à la disposition des chercheurs en reconnaissance faciale, au cas par cas uniquement.

Toutes les demandes concernant cette base de données doivent être soumises via le site web du projet portant sur l'utilisation des infrarouges pour améliorer la protection respiratoire des porteurs d'APR. Pour recevoir une copie de la base de données, le chercheur doit signer ce document et s'engager à respecter les restrictions énumérées dans le présent document. Le non-respect des restrictions de ce document entraînera la suppression du droit d'utilisation. La base de données sera disponible pour les chercheurs uniquement par téléchargement sur le site web du NIST. Les images sont disponibles en format [À spécifier]. Le(s) chercheur(s) accepte(nt) les restrictions suivantes concernant la base de données.

- 1- La base de données ne sera pas distribuée, publiée, copiée ou diffusée ultérieurement, de quelque manière ou sous quelque forme que ce soit, que ce soit à des fins lucratives ou non. Cela inclut la distribution, la copie ou la diffusion ultérieure à une unité de l'université, de l'organisation ou de la société requérante.
- 2- Les images apparaîtront uniquement dans des rapports techniques, des articles techniques et des documents techniques traitant de la recherche sur la reconnaissance des visages.
- 3- Tous les documents et articles qui rendent compte d'une recherche utilisant la base de données doivent mentionner l'utilisation de la base de données. L'utilisation de la base de données sera reconnue comme suit : "Des parties de la recherche dans ce document utilisent la base de données de séquences vidéos dans le visible et dans l'infrarouge de porteurs d'APR recueillies dans le cadre d'un projet de développement d'une méthode de détection, localisation et d'évaluation des fuites chez les porteurs d'APR et financé par l'RSST. On peut obtenir plus d'informations sur cette base de données en contactant : Geoffrey Marchais, étudiant, UQAR, geoffrey.marchais.1@ulaval.ca



## ANNEXE V - ORGANISATION DES DONNÉES AVEC SUJETS HUMAINS



## ANNEXE VI - APERÇU DU SITE WEB : SAFERESPIRATOR

Accès : <https://saferespirator.uqar.ca>

The screenshot displays the SafeRespirator website interface. At the top, a blue navigation bar includes the logo, menu items (Accueil, Équipe, Contributions, Actualités, Matériel, Téléchargement), and a language selector (Français). The main content area features a hero section with the heading "Qu'est-ce que SafeRespirator ?" and a brief description of the research project. Below this is a "Caractéristiques" section with four icons and corresponding statistics: 62 participants tested (36 women, 26 men), 4 FFR N95 tested per participant (7 FFR N95 total), 1000 fit tests (500 real, 500 virtual), and 1920x1080 RGB and 1280x1024 video files. The "Objectives" section lists three goals: developing a method for N95 leak localization, automating leak detection, and professionalizing the method. An "Exemple de visualisation" section shows a video player with IR and RGB views and camera angle options (Face, Haut, Gauche, Droite, Sans). The "Nos partenaires" section features logos for UQAR, Université Laval, IRSST, and Mitacs. A footer contains copyright information for 2014 Université Laval, UQAR, and IRSST, crediting Imés Maaroufi.

## ANNEXE VII - FORMULAIRE D'ACCÈS À LA BASE DE DONNÉES



---

### Licence d'accès pour la base de données SafeRespirator

Dernière mise à jour : 22/04/2024

---

#### Règle d'utilisation de la base de données :

- Vous devez être âgé d'au minimum 18 ans pour télécharger cette base de données.
- Il est interdit de partager le type de masque ou le nom du fabricant du masque utilisé dans la collecte de données pour tirer des conclusions sur l'efficacité du masque dans toute publication ou rapport.
- Cette base de données ne doit pas être utilisée à des fins illégales, commerciales ou immorales.
- Il est interdit de partager les visages des participants qui n'ont pas donné leur consentement pour apparaître dans toute publication ou rapport (la liste des participants ayant donné leur accord ou leur désaccord est disponible sur le site web : «Utilisationd'Images\_Consentement... » ). **Pour les participants qui consentent à partager leur visage, les données utilisées doivent être rendues non identifiables dans les publications ou les rapports.**
- Une copie ou un partage de cette base de données être soumis à la signature de cette licence.
- Les publications suivantes doivent être citées chaque fois que cette base de données est utilisée dans une publication ou un rapport de la manière suivante : "Des parties de la recherche présentée dans ce document utilisent la base de données de séquences vidéo visible et infrarouge des porteurs de APR, recueillies dans le cadre d'un projet visant à développer une méthode de détection, de localisation et d'évaluation des fuites parmi les porteurs de APR et financées par l'IRSST. Plus d'informations sur cette base de données peuvent être obtenues en contactant : Jean Brousseau, professeur et chercheur, UQAR, jean\_brousseau@uqar.ca ou Yacine Yaddaden, professeur et chercheur, UQAR, yacine\_yaddaden@uqar.ca"

- Marchais, G., Arbane, M., Topilko, B., Brousseau, J., ... Crafting a Dataset through Infrared Imaging and Fit Testing for a Complete Filtering Facepiece Respirator Leak Detection. *(Pas encore publié)*

#### Accès à la base de données :

- Cette base de données est uniquement disponible pour les étudiants, les groupes de recherche ou les institutions de recherche. C'est pourquoi nous n'accepterons pas les demandes provenant d'adresses électroniques génériques (gmail.com, hotmail.com, ...); seules les demandes provenant d'adresses électroniques d'institutions à but non lucratif telles que les écoles ou les instituts de recherche seront acceptées.
- Pour accéder à cette base de données, veuillez remplir les champs suivants :

1. Une courte présentation sur vous :

---

---

---

---

---

Licence d'accès SafeRespirator

1

---

---

---

2. Une courte présentation sur votre groupe de recherche :

---

---

---

---

---

---

3. But d'utilisation de cette base de données :

---

---

---

---

---

---

4. Informations : *(La personne responsable et le point de contact peuvent être la même personne).*

Informations	Personne responsable	Point e contact
Nom		
Organisation		
Courriel		
Titre		

**Demande pour l'accès :**

- S'il vous plait signer cette licence d'accès et l'envoyer aux mails suivants :
  - [jean\\_brousseau@uqar.ca](mailto:jean_brousseau@uqar.ca)
  - [yacine\\_yaddaden@uqar.ca](mailto:yacine_yaddaden@uqar.ca)

Avec ma signature, je demande par la présente à obtenir et à utiliser cette base de données SafeRespirator, et j'autorise mon équipe à demander et à utiliser cette base de données SafeRespirator conformément aux règles et limitations énumérées dans cette licence d'accès

Avec ma signature, je déclare également avoir l'autorité pour accepter les termes énoncés dans cette licence d'accès.

\_\_\_\_\_  
Signature de la personne responsable

\_\_\_\_\_  
Signature du point de contact

\_\_\_\_\_  
Date

2

*Licence d'accès SafeRespirator*

---

## User License Agreement for SafeRespirator Dataset

Last update : 22/04/2024

---

### Dataset Usage Rules :

- You must be 18 or older to download this dataset
- It is not allowed to share mask type or fabricant mask name used in data collection to make conclusion on mask efficiency in any publication or report.
- This dataset must not be used for any illegal, commercial or immoral purposes.
- It is not allowed to share faces of participants who didn't give their consent to appear in any publication or report (the list of participants agree and disagree is available on the website: «ImageUse\_Consent...»). For participants who are consenting for share their face, data used must be made unidentifiable in publications or report.
- A copy or a sharing of this dataset must be subject to the signing of this license.
- These following publications must be cited whenever making use of this dataset in any publication or report by this way: "Parts of the research in this document use the database of visible and infrared video sequences of APR wearers collected as part of a project to develop a method of detection, localization and evaluation of leaks among APR wearers and financed by the IRSST. More information on this database can be obtained by contacting: Jean Brousseau, professor and researcher, UQAR, [jean\\_brousseau@uqar.ca](mailto:jean_brousseau@uqar.ca) or Yacine Yaddaden, professor and researcher, UQAR, [yacine\\_yaddaden@uqar.ca](mailto:yacine_yaddaden@uqar.ca)"
  - Marchais, G., Arbane, M., Topilko, B., Brousseau, J., ... Crafting a Dataset through Infrared Imaging and Fit Testing for a Complete Filtering Facepiece Respirator Leak Detection. *(Not yet published)*

### Dataset Access :

- This database is only available for students, research groups or research institutions, that is why we will not accept application from generic email addresses (gmail.com, hotmail.com, ...), only application from email addresses non-profit institutions such as schools or research institutes are accepted.
- To have access to this database, please fill the following fields:

1. A brief introduction of yourself:

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

1

2. A brief introduction of your research group:

---



---



---



---



---

3. Purpose of using this dataset:

---



---



---



---



---

4. Information: *(Responsible party and the Point of Contact may be the same person).*

Information	Responsible party	Point of contact
Name		
Organization		
E-mail		
Title		

**Request to Access:**

- Please sign this *User License Agreement* and send it to theses following emails:
  - [jean\\_brousseau@uqar.ca](mailto:jean_brousseau@uqar.ca)
  - [yacine\\_yaddaden@uqar.ca](mailto:yacine_yaddaden@uqar.ca)

With my signature, I hereby request to obtain and use the SafeRespirator dataset, and I am authorizing my team to apply and use the SafeRespirator dataset according to the rules and limitations listed in this *User License Agreement*.

With my signature, I also state that I have the authority to accept the terms stated in this *User License Agreement*.

\_\_\_\_\_  
Signature of Responsible party

\_\_\_\_\_  
Signature of Point of Contact

\_\_\_\_\_  
Date

# ANNEXE VIII - CONSENTEMENT DE CHAQUE PARTICIPANT À L'UTILISATION DE LEUR VISAGE DANS DES PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES



## Consentement des participants dans l'utilisation de leur visage dans des publications scientifiques

Dernière mise à jour : 19/03/2024

Vous pouvez seulement utiliser les données d'un participant s'il y consent (cf. "yes" dans le tableau des consentements ci-dessous). Ces données doivent être rendues non identifiables dans les publications ou dans les rapports. Nous considérons que les images infrarouges sont déjà non identifiables, cependant pour les images RGB, il faut les censurer ainsi :



Figure 1 : Exemple d'images non identifiables du participant consentant n°29

Participant Number	Consent ?	Participant Number	Consent ?
1	Yes	32	No
2	No	33	No
3	Yes	34	Yes
4	No	35	Yes
5	No	36	Yes
6	No	37	Yes
7	No	38	Yes
8	No	39	Yes
9	No	40	Yes
10	No	41	Yes
11	Yes	42	Yes
12	No	43	Yes
13	No	44	Yes
14	No	45	Yes
15	No	46	Yes
16	Yes	47	Yes
17	No	48	Yes
18	No	49	Yes
19	Yes	50	Yes
20	Yes	51	Yes
21	No	52	Yes
22	Yes	53	Yes
23	Yes	54	Yes
24	Yes	55	Yes
25	Yes	56	No
26	Yes	57	Yes
27	No	58	Yes
28	Yes	59	Yes
29	Yes	60	Yes
30	Yes	61	Yes
31	No	62	Yes

Figure 1 : Tableau des consentements

Consentement des participants pour l'utilisation de leur visage SafeRespirator

## Participant Consent's in the Use of their Face in Publications

Last update : 22/04/2024

You can only use data of a participant if he is consenting (cf. "Yes" in Consents Table below). Those data must be made unidentifiable in publications or report. We consider that infrared images are already unidentifiable, however for RGB images, they must be censored like that:



Figure 1 : Example of unidentifiable images of consenting participant n°29

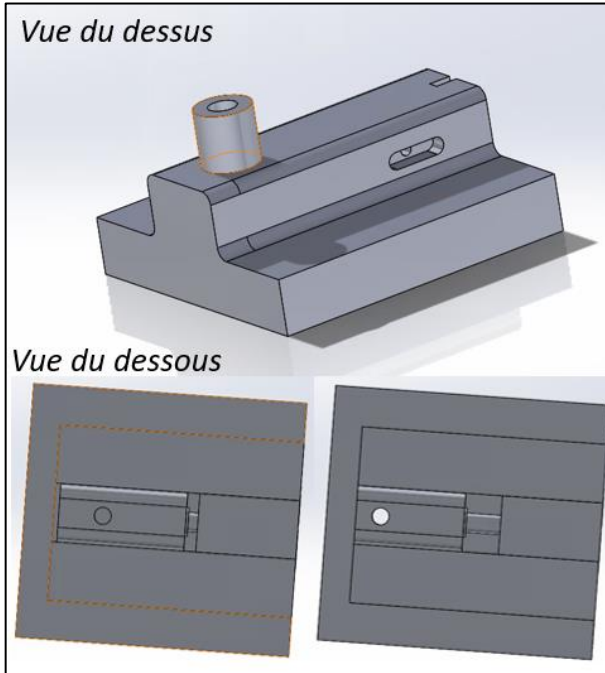
Participant Number	Consent ?	Participant Number	Consent ?
1	Yes	32	No
2	No	33	No
3	Yes	34	Yes
4	No	35	Yes
5	No	36	Yes
6	No	37	Yes
7	No	38	Yes
8	No	39	Yes
9	No	40	Yes
10	No	41	Yes
11	Yes	42	Yes
12	No	43	Yes
13	No	44	Yes
14	No	45	Yes
15	No	46	Yes
16	Yes	47	Yes
17	No	48	Yes
18	No	49	Yes
19	Yes	50	Yes
20	Yes	51	Yes
21	No	52	Yes
22	Yes	53	Yes
23	Yes	54	Yes
24	Yes	55	Yes
25	Yes	56	No
26	Yes	57	Yes
27	No	58	Yes
28	Yes	59	Yes
29	Yes	60	Yes
30	Yes	61	Yes
31	No	62	Yes

Figure 2 : Consents Table

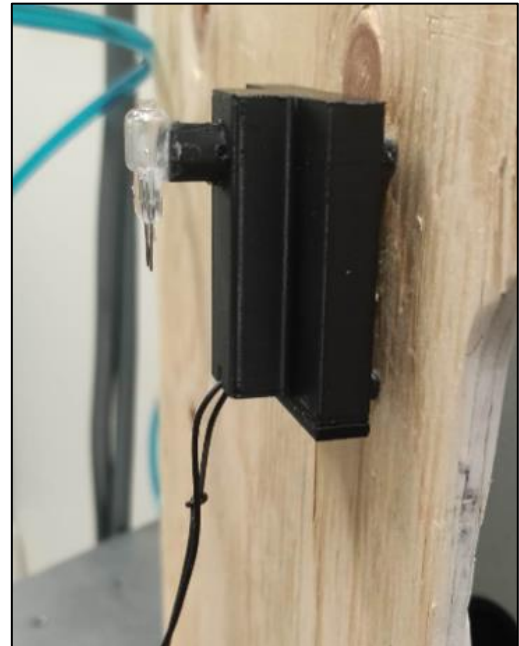
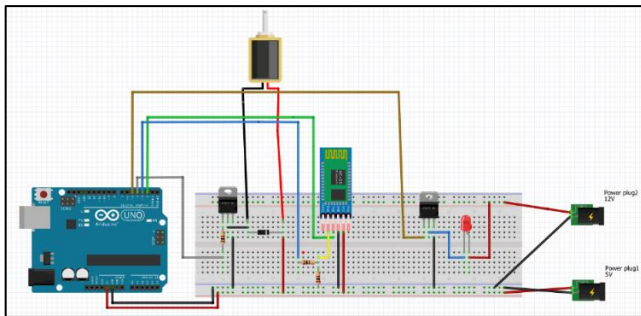
Image Use Consent SafeRespirator



## ANNEXE XIX – CONCEPTION, CODE ET MONTAGE DU SYSTÈME DE SYNCHRONISATION



```
Code_synchro_modulebluetooth.ino
1  #include <SoftwareSerial.h>
2  SoftwareSerial MyBlue(2, 3); // RX | TX
3  int flag = 0;
4  int solenoidPin = 4;
5  int LED = 5;
6  void setup()
7  {
8    Serial.begin(9600);
9    MyBlue.begin(9600);
10   pinMode(solenoidPin, OUTPUT);
11   pinMode(LED, OUTPUT);
12   Serial.println("Ready to connect\nDefault password is 1234 or 000");
13 }
14 void loop()
15 {
16   digitalWrite(LED, LOW);
17   digitalWrite(solenoidPin, HIGH);
18   if (MyBlue.available())
19     | flag = MyBlue.read();
20   if (flag == '1')
21   {
22     digitalWrite(LED, HIGH); //LED ALLUME
23     delay(10000); //wait 1 Second;
24     digitalWrite(solenoidPin, LOW); //Switch Solenoid sortie
25     delay(1000); //wait 0.5 Second
26     digitalWrite(solenoidPin, HIGH); //Switch Solenoid rentré
27     digitalWrite(LED, LOW); //LED ETEINTE
28   }
29 }
```



## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. Gouvernement du Québec. (1979). Loi sur la santé et la sécurité du travail [L.R.Q., chapitre S-2.1]. <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/showdoc/cs/S-2.1>
- [2]. Gouvernement du Québec. (2001). Règlement sur la santé et la sécurité au travail [R.R.Q., chapitre S-2.1, r.13]. <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/showdoc/cr/S-2.1,%20r.%2013>
- [3]. CSA Z94.4-93 : Selection, use, and care of respirators [Standard CSA Z94.4-93]. (1993).
- [4]. Wu, B. (2018). Ensuring respiratory protection through respirator fit testing and real-time monitoring [Doctoral dissertation, University of Cincinnati].
- [5]. Lara, J., & Vennes, M. (2003). Guide pratique de protection respiratoire—2e éd. CSST ; IRSST. / Ouellet, C., & Labrecque, C. (2022). Guide pratique de protection respiratoire – Mise à jour –2e éd. CSST ; IRSST.
- [6]. Coffey, C. C., Lawrence, R. B., Campbell, D. L., Zhuang, Z., Calvert, C. A., & Jensen, P. A. (2004). Fitting characteristics of eighteen n95 filtering-facepiece respirators. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 1(4), 262–271.
- [7]. 1910.134 App A - Fit Testing Procedures (Mandatory). — Occupational Safety and Health Administration. (n.d.). Retrieved April 4, 2024, from <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.134AppA>
- [8]. Huh, Y. J., Jeong, H. M., Lim, J., Park, H. Y., Kim, M. Y., Oh, H. S., & Huh, K. (2018). Fit characteristics of n95 filtering facepiece respirators and the accuracy of the user seal check among Koreans. *Infection Control & Hospital Epidemiology*, 39(1), 104–107.
- [9]. Lam, S., Lee, J., Yau, S., & Charm, C. (2011). Sensitivity and specificity of the user-seal-check in determining the fit of n95 respirators. *Journal of Hospital Infection*, 77(3), 252–256.
- [10]. Regli, A., Sommerfield, A., & von Ungern-Sternberg, B. (2021). The role of fit testing n95/ffp2/ffp3 masks: A narrative review. *Anaesthesia*, 76(1), 91–100.
- [11]. Centre de collaboration nationale en santé environnementale (CCNSE). (2021). Les masques et la pandémie de COVID-19 – État des connaissances (tech. rep.) (Dernière mise à jour : 20 mai 2021). <https://ccnse.ca/documents/guide/les-masques-et-la-pandemie-de-covid-19-etat-des-connaissances>
- [12]. INSPQ. (2020). Enquête épidémiologique sur les travailleurs de la santé atteints par la COVID-19 au printemps 2020 (tech. rep.). Gouvernement du Québec.

<https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/publications/3061-enquete-epidemiologique-travailleurs-sante-covid-19.pdf>

- [13]. Cousineau, M.-E. (2021). Difficile déploiement des masques n95 dans le réseau de la santé. <https://www.ledevoir.com/societe/sante/595195/sante-difficile-deploiement-des-masques-n95>
- [14]. Clayton, M., & Vaughan, N. (2005). Fit for purpose? The role of fit testing in respiratory protection. *Annals of Occupational Hygiene*, 49(7), 545–548.
- [15]. Grinshpun, S. A., Haruta, H., Eninger, R. M., Reponen, T., McKay, R. T., & Lee, S.-A. (2009). Performance of an n95 filtering facepiece particulate respirator and a surgical mask during human breathing: Two pathways for particle penetration. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 6(10), 593–603.
- [16]. Roberge, R. J., Monaghan, W. D., Palmiero, A. J., Shaffer, R., & Bergman, M. S. (2011). Infrared imaging for leak detection of n95 filtering facepiece respirators: A pilot study. *American Journal of Industrial Medicine*, 54(8), 628–636.
- [17]. Murthy, R., & Pavlidis, I. (2006). Noncontact measurement of breathing function. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 25(3), 57–67.
- [18]. Kerl, J., Wenzel, M., & Köhler, D. (2004). Thermal imaging of mask leakage during pressure-controlled ventilation (bipap therapy). *Somnologie*, 8(3), 83–86.
- [19]. Dowdall, J. B., Pavlidis, I. T., & Levine, J. (2005). Thermal image analysis for detecting facemask leakage. *Thermosense XXVII*, 5782, 46–53.
- [20]. Harber, P., Su, J., Badilla, A. D., Rahimian, R., & Lansey, K. R. (2015). Potential role of infrared imaging for detecting facial seal leaks in filtering facepiece respirator users. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 12(6), 369–375.
- [21]. Lei, Z., Yang, J., Zhuang, Z., & Roberge, R. (2013). Simulation and evaluation of respirator face seal leaks using computational fluid dynamics and infrared imaging. *Annals of Occupational Hygiene*, 57(4), 493–506.
- [22]. Siah, C.-J. R., Lau, S. T., Tng, S. S., & Chua, C. H. M. (2022). Using infrared imaging and deep learning in fit-checking of respiratory protective devices among healthcare professionals. *Journal of Nursing Scholarship*, 54(3), 345–354.
- [23]. Bari, A., Lamoureux-Lévesque, R., Ahmed Si, A., Brousseau, J., Bahloul, A., Clothilde, B., Yaddaden, Y., & Maldague, X. (2022). Covid-19, wearing n-95 masks in clinical environments: Thermographic detection of air leaks. *Proceedings of the 2022 International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*.

- [24]. Chapman, D., Strong, C., Tiver, K. D., Dharmapran, D., Jenkins, E., & Ganesan, A. N. (2023). Infra-red imaging to detect respirator leak in healthcare workers during fit-testing clinic. *IEEE Open Journal of Engineering in Medicine and Biology*.
- [25]. Bergman, M. S., He, X., Joseph, M. E., Zhuang, Z., Heimbuch, B. K., Shaffer, R. E., Choe, M., & Wander, J. D. (2015). Correlation of respirator fit measured on human subjects and a static advanced headform. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 12(3), 163–171.
- [26]. Bergman, M. S., Zhuang, Z., Hanson, D., Heimbuch, B. K., McDonald, M. J., Palmiero, A. J., Shaffer, R. E., Harnish, D., Husband, M., & Wander, J. D. (2014). Development of an advanced respirator fit-test headform. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 11(2), 117–125.
- [27]. Topilko, B., Marchais, G., Arbane, M., Brousseau, J., Bahloul, A., Maldague, X., Brochot, C., & Yaddaden, Y. (2024). Development of multiphysics models for the study of airflow and thermal effects during the use of filtering facepiece respirator. 2024 3rd International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE), 1–6.
- [28]. Hallett, S., Toro, F., & Ashurst, J. V. (2018). *Physiology, tidal volume*. StatPearls Publishing, Treasure Island (FL).
- [29]. Needham, C., Rogan, M. C., & McDonald, I. (1954). Normal standards for lung volumes, intrapulmonary gas-mixing, and maximum breathing capacity. *Thorax*, 9(4), 313.
- [30]. Jurion, M. (n.d.). H7g6.fr, le site des concepteurs. Retrieved April 4, 2024, from <https://www.h7g6.fr/data/article/79/les-plastiques-techniques>
- [31]. Rodríguez de Rivera, P. J., Rodríguez de Rivera, M., Socorro, F., Calbet, J. A., & Rodríguez de Rivera, M. (2022). Advantages of in vivo measurement of human skin thermal conductance using a calorimetric sensor. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147(18), 10027–10036.
- [32]. Rengasamy, S., Eimer, B. C., & Szalajda, J. (2014). A quantitative assessment of the total inward leakage of nacl aerosol representing submicron-size bioaerosol through n95 filtering facepiece respirators and surgical masks. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 11(6), 388–396.
- [33]. Yuan, G., Drost, N. A., & McIvor, R. A. (2013). Respiratory rate and breathing pattern. *McMaster Univ. Med. J*, 10(1), 23–25.
- [34]. Han, J., Stegen, K., Cauberghs, M., & Van de Woestijne, K. (1997). Influence of awareness of the recording of breathing on respiratory pattern in healthy humans. *European Respiratory Journal*, 10(1), 161–166.

- [35]. Benchetrit, G. (2000). Breathing pattern in humans: Diversity and individuality. *Respiration Physiology*, 122(2-3), 123–129.
- [36]. Pompeii, L. A., Kraft, C. S., Brownsword, E. A., Lane, M. A., Benavides, E., Rios, J., & Radonovich, L. J. (2020). Training and fit testing of health care personnel for reusable elastomeric half-mask respirators compared with disposable n95 respirators. *JAMA*, 323(18), 1849–1852.
- [37]. Sahu, A. K., Amrithanand, V., Mathew, R., Aggarwal, P., Nayer, J., & Bhoi, S. (2020). Covid-19 in health care workers—a systematic review and meta-analysis. *The American journal of emergency medicine*, 38(9), 1727–1731.
- [38]. Team, C. C.-1. R., Team, C. C.-1. R., Team, C. C.-1. R., Burrer, S. L., de Perio, M. A., Hughes, M. M., Kuhar, D. T., Luckhaupt, S. E., McDaniel, C. J., Porter, R. M., et al. (2020). Characteristics of health care personnel with covid 19—united states, february 12–april 9, 2020. *Morbidity and mortality weekly report*, 69(15), 477–481.
- [39]. Jiang, Z., Hu, M., Gao, Z., Fan, L., Dai, R., Pan, Y., Tang, W., Zhai, G., & Lu, Y. (2020). Detection of respiratory infections using rgb-infrared sensors on portable device. *IEEE Sensors Journal*, 20(22), 13674–13681.
- [40]. Google. (2023). Mediapipe face [Version 0.8]. <https://mediapipe.dev/>
- [41]. Richter, J., Wiede, C., Kaden, S., Weigert, M., & Hirtz, G. (2017). Skin temperature measurement based on human skeleton extraction and infra-red thermography—an application of sensor fusion methods in the field of physical training. *International Conference on Computer Vision Theory and Applications*, 7, 59–66.
- [42]. Brenner, M., Reyes, N. H., Susnjak, T., & Barczak, A. L. (2023). Rgb-d and thermal sensor fusion : A systematic literature review. *IEEE Access*.
- [43]. Chen, C., Yang, B., Song, S., Tian, M., Li, J., Dai, W., & Fang, L. (2018). Calibrate multiple consumer rgb-d cameras for low-cost and efficient 3d indoor mapping. *Remote Sensing*, 10(2), 328.
- [44]. Spremolla, I. R., Antunes, M., Aouada, D., & Ottersten, B. (2016). Rgb-d and thermal sensor fusion-application in person tracking. *International Conference on Computer Vision Theory and Applications*, 4, 610–617.
- [45]. Beschi, R., Feng, X., Melillo, S., Parisi, L., & Postiglione, L. (2021). Stereo camera system calibration : The need of two sets of parameters. *arXiv preprint arXiv:2101.05725*.
- [46]. Marinetti, S., & Cesaratto, P. G. (2012). Emissivity estimation for accurate quantitative thermography. *NDT & E International*, 51, 127–134.

- [47]. Rakrueangdet, K., Nunak, N., Suesut, T., & Sritham, E. (2016). Emissivity measurements of reflective materials using infrared thermography. *International MultiConference of Engineers and Computer Scientists (IMECS)*.
- [48]. Herakleous, K., & Poullis, C. (2014). 3dunderworld-sls : An open-source structured-light scanning system for rapid geometry acquisition. *arXiv preprint arXiv:1406.6595*.
- [49]. Zhuang, Z., Bradtmiller, B., & Shaffer, R. E. (2007). New respirator fit test panels representing the current us civilian work force. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 4(9), 647–659.
- [50]. OBStudio, Inc. (n.d.). OBStudio Software. <https://www.obstudio.com>
- [51]. FLIR Systems, Inc. (n.d.). ResearchIR Max software. <https://www.flir.com>
- [52]. TSI Incorporated. (2024). Manuel d'utilisation portacount pro 8030/8038 <https://tsi.com/getmedia/c8670f72-bd42-4281-9dac-42b09690adb2/8030-8038-PortaCountPro-Manual-FR-6001873?ext=.pdf>
- [53]. National Center for Biotechnology Information (NCBI). (2024). Pubmed <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov>
- [54]. Christensen, J., Væth, M., & Wenzel, A. (2012). Thermographic imaging of facial skin—gender differences and temperature changes over time in healthy subjects. *Dentomaxillofacial Radiology*, 41(8), 662–667.
- [55]. Haddad, D. S., Brioschi, M. L., Baladi, M. G., & Arita, E. S. (2016). A new evaluation of heat distribution on facial skin surface by infrared thermography. *Dentomaxillofacial Radiology*, 45(4).
- [56]. Mohammed, M., Syamsudin, H., Al-Zubaidi, S., AKS, R. R., & Yusuf, E. (2020). Novel covid-19 detection and diagnosis system using iot based smart helmet. *International Journal of Psychosocial Rehabilitation*, 24(7), 2296–2303
- [57]. Scheinherr, A., Bailly, L., Boiron, O., Lagier, A., Legou, T., Pichelin, M., Caillibotte, G., & Giovanni, A. (2015). Realistic glottal motion and airflow rate during human breathing. *Medical engineering & physics*, 37(9), 829–839

