



## Smart-Réno

### Fiabiliser, Professionnaliser, Valoriser la Rénovation Energétique

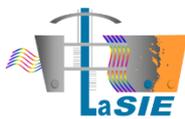
#### Troisième volet : Valoriser le confort

#### T3.4 – Mise en œuvre de la méthodologie proposée par simulations - Cahier des Charges.

Auteurs : Bénédicte WALL-RIBOT, Denis Covalet, Baptiste Forget, Marc Abadie, Charles-Florian Picard.

Contributeurs : Karim Limam, Adrien Dhalluin, Philippe Petiot, Jérôme Nicolle, Katia Cordeiro Mendonça, Florian Battezzati, Jérôme Le Dréau, Dominique Feldman, Hassan Bouia.

Décembre 2021





## Sommaire

Introduction.....	9
1 Description des maisons individuelles types.....	10
1.1 Cas 1 : Maisons Individuelles anciennes (avant 1948) .....	11
1.1.1 Description géométrique et orientation .....	11
1.1.2 Caractéristiques des parois .....	12
1.1.3 Chauffage et ventilation .....	12
1.2 Cas 2 : Maisons Individuelles non isolées (entre 1948 et 1974) .....	13
1.2.1 Description géométrique et orientation .....	13
1.2.2 Caractéristiques des parois .....	14
1.2.3 Chauffage et ventilation .....	14
1.3 Cas 3 : Maisons Individuelles isolées (après 1974).....	15
1.3.1 Description géométrique et orientation .....	15
1.3.2 Caractéristiques des parois .....	16
1.3.3 Chauffage et ventilation .....	16
2 Description de l'environnement intérieur.....	18
1.1 Sources de chaleur et d'humidité .....	18
1.1.1 Sources de chaleur .....	18
1.1.2 Sources d'humidité.....	18
2.2 Définition des sources des polluants.....	19
2.2.1 Sources intérieures de polluants .....	19
2.2.1.1 Emissions des sources de polluants .....	19
2.2.1.2 Surfaces d'émissions .....	21
2.2.1.3 Synthèse des sources de polluants par pièce.....	22
2.2.2 Vitesse de dépôt des particules PM <sub>2,5</sub> .....	24
2.2.3 Vitesse de dépôt du NO <sub>2</sub> .....	26
2.3 Scénarios d'occupation .....	28
3 Description de l'environnement extérieur .....	30
3.1 Localisation géographique .....	30
3.2 Pollution extérieure.....	30
4 Opérations de rénovation retenues pour les simulations.....	32
4.1 Remplacement des fenêtres ou ouvrants .....	33
4.2 Isolation thermique des parois et combles .....	33
4.3 Installation ou changement du système de ventilation.....	33
4.4 Rénovation de la décoration intérieure .....	33

5	Consolidation des données de simulation .....	34
5.1	Environnements de simulation .....	34
5.1.1	BuildSysPro QAI .....	34
5.1.2	TRNSYS-CONTAM .....	34
5.2	Cas simulés .....	36
5.3	Comparaison des variables thermiques et aérauliques .....	37
5.4	Comparaison des variables de Qualité de l'Air Intérieur .....	50
5.5	Comparaison des indicateurs de confort thermique et de QAI .....	73
	Conclusion/Synthèse .....	75
	Références.....	76
	ANNEXE A : Description des équipements de chauffage et des systèmes de ventilation .....	77
	Systèmes de chauffage.....	77
	Températures de consigne de chauffage.....	78
	Systèmes de ventilation .....	79
	ANNEXE B : Synthèse des réflexions concernant l'évaluation des indices de confort thermique et de QAI pour les simulations .....	84
	Indices de Confort Thermique.....	84
	Indices de QAI.....	85

## Liste des figures

Figure 1 : Plan de la maison individuelle de la période de construction d'avant 1948. ....	11
Figure 2 : Plan de la maison individuelle de la période de construction 1948-1974. ....	13
Figure 3 : Plan de la maison individuelle de la période de construction d'après 1974.....	15
Figure 4 : Procédure d'obtention d'une vitesse de dépôt globale pour les PM <sub>2,5</sub> . ....	25
Figure 5: Comparaison de la vitesse de dépôt globale obtenue dans la présente étude avec les données de la littérature.....	26
Figure 6 : Vitesse de dépôt de transport pour les gaz inorganiques (Modèle adapté de Lai et Nazaroff, 2000).....	26
Figure 7 : Influence de l'humidité relative sur la vitesse de dépôt de surface pour le NO <sub>2</sub> (Grøntoft et Raychaudhuri, 2004). ....	27
Figure 8 : Niveaux de pollution extérieure en benzène, NO <sub>2</sub> et PM <sub>2,5</sub> pour le site urbain, périurbain et rural. ....	31
Figure 9 : Représentation graphique des 7 cas de rénovation de l'étude numérique.....	32
Figure 10 : Couplage TRNSYS – CONTAM et échanges de données.....	35
Figure 11 : Tair dans le séjour - Cas 3 avant Réno.....	38
Figure 12 : Taux de Renouvellement d'Air (TRA) dans le séjour - Cas 3 avant Reno. ....	38
Figure 13 : Taux de Renouvellement d'Air (TRA) dans le séjour - Cas 3 avant Réno du 1 au 15 Janvier. ....	39
Figure 14 : Tair dans le séjour - Cas 3 après Réno #3 du 20 mai au 30 Septembre. ....	39
Figure 15 : Taux de Renouvellement d'Air (TRA) dans le séjour - Cas 3 après Réno #3.....	40
Figure 16 : Taux de Renouvellement d'Air (TRA) dans le séjour - Cas 3 après Réno #3 du 1 au 15 Janvier. ....	40
Figure 17 : Tair dans le séjour - Cas 3 après Réno #4 du 20 mai au 30 Septembre. ....	41
Figure 18 : Taux de Renouvellement d'Air (TRA) dans le séjour - Cas 3 après Réno #4.....	41
Figure 19 : Taux de Renouvellement d'Air (TRA) dans le séjour - Cas 3 après Réno #4 du 1 au 15 Janvier. ....	42
Figure 20 : Tair dans le séjour - Cas 3 après Réno #5.....	42
Figure 21 : Taux de Renouvellement d'Air (TRA) dans le séjour - Cas 3 après Réno #5.....	43
Figure 22 : Taux de Renouvellement d'Air (TRA) dans le séjour - Cas 3 après Réno #5 du 1 au 15 Janvier. ....	43
Figure 23 : Tair dans la Chambre 3 - Cas 3 avant Réno. ....	44
Figure 24 : Taux de Renouvellement d'Air (TRA) dans la Chambre 3 - Cas 3 avant Réno.....	44
Figure 25 : Taux de Renouvellement d'Air (TRA) dans la Chambre 3 - Cas 3 avant Réno du 1 au 15 Janvier.....	45
Figure 26 : Tair dans la Chambre 3 - Cas 3 après Réno #3 du 20 mai au 30 Septembre.....	45
Figure 27 : Taux de Renouvellement d'Air (TRA) dans la Chambre 3 - Cas 3 après Réno #3. ....	46
Figure 28 : Taux de Renouvellement d'Air (TRA) dans la Chambre 3 - Cas 3 après Réno #3 du 1 au 15 Janvier.....	46
Figure 29 : Tair dans la Chambre 3 - Cas 3 après Réno #4 du 20 mai au 30 Septembre.....	47
Figure 30 : Taux de Renouvellement d'Air (TRA) dans la Chambre 3 - Cas 3 après Réno #4. ....	47
Figure 31 : Taux de Renouvellement d'Air (TRA) dans la Chambre 3 - Cas 3 après Réno #4 du 1 au 15 Janvier.....	48
Figure 32 : Tair dans la Chambre 3 - Cas 3 après Réno #5. ....	48
Figure 33 : Taux de Renouvellement d'Air (TRA) dans la Chambre 3 - Cas 3 après Réno #5. ....	49
Figure 34 : Taux de Renouvellement d'Air (TRA) dans la Chambre 3 - Cas 3 après Réno #5 du 1 au 15 Janvier.....	49

Figure 35 : Concentration de CO2 dans le séjour – Cas 3 avant Réno. ....	51
Figure 36 : Concentration de CO2 dans le séjour – Cas 3 avant Réno du 1 au 15 Janvier. ....	51
Figure 37 : Concentration de NO2 dans le séjour – Cas 3 avant Réno.....	52
Figure 38 : Concentration de PM2,5 dans le séjour – Cas 3 avant Réno.....	52
Figure 39 : Concentration de Formaldéhyde dans le séjour – Cas 3 avant Réno.....	53
Figure 40 : Concentration de Benzène dans le séjour – Cas 3 avant Réno. ....	53
Figure 41 : Concentration de CO2 dans le séjour – Cas 3 après Réno #3.....	54
Figure 42 : Concentration de CO2 dans le séjour – Cas 3 après Réno #3 du 1 au 15 Janvier. ....	54
Figure 43 : Concentration de NO2 dans le séjour – Cas 3 après Réno #3. ....	55
Figure 44 : Concentration de PM2,5 dans le séjour – Cas 3 après Réno #3.....	55
Figure 45 : Concentration de Formaldéhyde dans le séjour – Cas 3 après Réno #3. ....	56
Figure 46 : Concentration de benzène dans le séjour – Cas 3 après Réno #3. ....	56
Figure 47 : Concentration de CO2 dans le séjour – Cas 3 après Réno #4.....	57
Figure 48 : Concentration de CO2 dans le séjour – Cas 3 après Réno #4 du 1 au 15 Janvier. ....	57
Figure 49 : Concentration de NO2 dans le séjour – Cas 3 après Réno #4. ....	58
Figure 50 : Concentration de PM2,5 dans le séjour – Cas 3 après Réno #4.....	58
Figure 51 : Concentration de Formaldéhyde dans le séjour – Cas 3 après Réno #4. ....	59
Figure 52 : Concentration de Benzène dans le séjour – Cas 3 après Réno #4. ....	59
Figure 53 : Concentration de CO2 dans le séjour – Cas 3 après Réno #5.....	60
Figure 54 : Concentration de CO2 dans le séjour – Cas 3 après Réno #5 du 1 au 15 Janvier. ....	60
Figure 55 : Concentration de NO2 dans le séjour – Cas 3 après Réno #5. ....	61
Figure 56 : Concentration de PM2,5 dans le séjour – Cas 3 après Réno #5.....	61
Figure 57 : Concentration de Formaldéhyde dans le séjour – Cas 3 après Réno #5. ....	62
Figure 58 : Concentration de Benzène dans le séjour – Cas 3 après Réno #5. ....	62
Figure 59 : Concentration de CO2 dans la Chambre 3 – Cas 3 avant Réno du 1 au 15 Janvier.....	63
Figure 60 : Concentration de NO2 dans la Chambre 3 – Cas 3 avant Réno. ....	63
Figure 61 : Concentration de PM2,5 dans la Chambre 3 – Cas 3 avant Réno. ....	64
Figure 62 : Concentration de Formaldéhyde dans la Chambre 3 – Cas 3 avant Réno. ....	64
Figure 63 : Concentration de Benzène dans la Chambre 3 – Cas 3 avant Réno.....	65
Figure 64 : Concentration de CO2 dans la Chambre 3 – Cas 3 après Réno #3.....	65
Figure 65 : Concentration de NO2 dans la Chambre 3 – Cas 3 après Réno #3.....	66
Figure 66 : Concentration de PM2,5 dans la Chambre 3 – Cas 3 après Réno #3. ....	66
Figure 67 : Concentration de Formaldéhyde dans la Chambre 3 – Cas 3 après Réno #3. ....	67
Figure 68 : Concentration de Benzène dans la Chambre 3 – Cas 3 après Réno #3.....	67
Figure 69 : Concentration de CO2 dans la Chambre 3 – Cas 3 après Réno #4.....	68
Figure 70 : Concentration de NO2 dans la Chambre 3 – Cas 3 après Réno #4.....	68
Figure 71 : Concentration de PM2,5 dans la Chambre 3 – Cas 3 après Réno #4. ....	69
Figure 72 : Concentration de Formaldéhyde dans la Chambre 3 – Cas 3 après Réno #4. ....	69
Figure 73 : Concentration de Benzène dans la Chambre 3 – Cas 3 après Réno #4.....	70
Figure 74 : Concentration de CO2 dans la Chambre 3 – Cas 3 après Réno #5.....	70
Figure 75 : Concentration de NO2 dans la Chambre 3 – Cas 3 après Réno #5.....	71
Figure 76 : Concentration de PM2,5 dans la Chambre 3 – Cas 3 après Réno #5. ....	71
Figure 77 : Concentration de Formaldéhyde dans la Chambre 3 – Cas 3 après Réno #5. ....	72
Figure 78 : Concentration de Benzène dans la Chambre 3 – Cas 3 après Réno #5.....	72
Figure 79 : Indicateurs de confort thermique et de QAI pour le Cas 3 (zone climatique H1, pollution urbaine) obtenus à partir des résultats de simulation de BuildSysPro (EDF) .....	74
Figure 80 : Indicateurs de confort thermique et de QAI pour le Cas 3 (zone climatique H1, pollution urbaine) obtenus à partir des résultats de simulation de TRNSYS-CONTAM (LaSIE) .....	74

Figure 81 : Exemple d'implémentation des entrées d'air et bouches d'extraction pour la ventilation naturelle par duit (et pour la ventilation mécanique hygroréglable en rénovation) pour le cas 2. ....	79
Figure 82 : Loi débit-pression d'un module M30 (module autoréglable). .....	80
Figure 83 : Entrées d'air hygroréglables.....	81
Figure 84 : Bouche d'extraction d'air hygroréglable placée en cuisine. ....	81
Figure 85 : Bouche d'extraction d'air hygroréglable placée en SdB. ....	82
Figure 86 : Bouche d'extraction d'air hygroréglable placée dans les WC. ....	82

### Liste des tableaux

Tableau 1 : Données TABULA des bâtiments résidentiels individuels pour les trois périodes concernées ainsi que le cas de modèle "idéal" les représentant au mieux. ....	10
Tableau 2 : Modèles de maisons individuelles de la base de données.....	10
Tableau 3 : Métré de la maison individuelle de la période de construction d'avant 1948.....	12
Tableau 4 : Composition des parois de la maison individuelle de la période de construction d'avant 1948.....	13
Tableau 5 : Métré de la maison individuelle de la période de construction 1948-1974. ....	14
Tableau 6 : Composition des parois de la maison individuelle de la période de construction 1948-1974. ....	15
Tableau 7 : Métré de la maison individuelle de la période de construction d'après 1974.....	16
Tableau 8 : Composition des parois de la maison individuelle de la période de construction d'après 1974.....	17
Tableau 9 : Sources de Production de chaleur (W).....	18
Tableau 10 : Sources de production d'humidité (g/h ou g/occupant).....	19
Tableau 11 : Emissions de formaldéhyde.....	20
Tableau 12 : Emissions de benzène.....	20
Tableau 13 : Emissions de toluène.....	20
Tableau 14 : Emissions de dioxyde d'azote.....	20
Tableau 15 : Emissions de PM2,5.....	20
Tableau 16 : Surfaces de meubles dans le séjour et la cuisine. ....	21
Tableau 17 : Surfaces de meubles pour l'entrée, les chambres, la SdB, le garage et les WC. ....	21
Tableau 18 : Taux d'émission global par pièce - Cas 1 avant rénovation.....	22
Tableau 19 : Taux d'émission global par pièce - Cas 2 avant rénovation.....	22
Tableau 20 : Taux d'émission global par pièce - Cas 3 avant rénovation.....	23
Tableau 21 : Taux d'émission global par pièce - Cas 1 après rénovation.....	23
Tableau 22 : Taux d'émission global par pièce - Cas 2 après rénovation.....	24
Tableau 23 : Taux d'émission global par pièce - Cas 3 après rénovation.....	24
Tableau 24 : Tableau récapitulatif des vitesses de dépôt pour les PM2,5.....	25
Tableau 25 : Scénarios d'occupation – jour type semaine.....	28
Tableau 26 : Scénarios d'occupation – jour type week-end. ....	29
Tableau 27 : Liste des fichiers de pollution extérieure (source : AASQA correspondantes).....	30
Tableau 28 : Puissances de Chauffage par pièce pour le Cas 1.....	77
Tableau 29 : Puissance de Chauffage par pièce pour le Cas 2. ....	77
Tableau 30 : Puissance de chauffage pour le Cas 3.....	77

Tableau 31 : Moyennes des températures de consigne en zone jour pour les logements individuels des différentes zones climatiques en fonction de l'âge du bâtiment et d'actes de rénovation (Données statistiques par sondages - source PHEBUS).....	78
Tableau 32 : Scénari de température de consigne. ....	78
Tableau 33 : Débits d'extraction pour la ventilation mécanique simple flux autoréglable. ....	79
Tableau 34 : Modules d'entrée d'air pour la ventilation mécanique simple flux autoréglable.....	80
Tableau 35 : débits de ventilation des systèmes autoréglable et hygroréglable.....	82
Tableau 36 : Tableau récapitulatif des indicateurs de confort hygrothermique décrits et des principaux paramètres et variables spécifiques à ces indicateurs.....	85
Tableau 37 : Tableau récapitulatif des indicateurs de QAI décrits et des principaux paramètres et variables spécifiques à ces indicateurs. Un « o » signifie que la variable est facultative pour le calcul de l'indicateur. Les variables en rouges sont les variables citées précédemment mais dont la prise en compte dans ce projet n'est pas prévue, leur présence permet cependant d'évaluer l'impact de leur absence sur le calcul de certains indicateurs. ....	87

## Introduction

Ce livrable constitue le livrable de la tâche 4 du volet 3 du programme Smart-Réno « Fiabiliser, Professionnaliser, Valoriser la Rénovation Énergétique ». Il est intitulé « Mise en œuvre de la méthodologie par simulations – cahier des charges. La première partie de ce document (quatre premiers chapitres) recense et décrit les différents cas simulés, et spécifie toutes les données et scénarii pris en compte dans les différentes simulations. Les choix effectués s'appuient sur les travaux réalisés dans les tâches précédentes du Volet 3 à savoir :

- Tâche 3.1 : Analyse du parc des bâtiments existants dans laquelle les caractéristiques relatives à l'étude thermique et de QAI des maisons individuelles ont été listés (Livrable 3.1).
- Tâche 3.2 : Analyse des opérations de rénovation par type et âge des bâtiments qui a permis de lister et classer selon leurs occurrences les actions de rénovation effectivement mises en œuvre sur le terrain (Livrable 3.2).
- Tâche 3.3 : Définition des indicateurs de confort et plus généralement sur les principes de bases, expressions mathématiques et indicateurs adaptés à la Qualité Environnementale Intérieure regroupant le confort hygrothermique, la QAI, l'acoustique, l'éclairage et l'environnement électromagnétique. Ce livrable (3.3) riche en information a permis en particulier de mettre en relation les interactions entre les actions de rénovation énergétique et les variables d'environnements et ainsi mettre en relief les interactions entre les opérations de rénovation et les différents indicateurs.

Dans la seconde partie de ce rapport (chapitre 5), sont présentés les résultats d'une inter comparaison sur un cas de référence. L'objectif consiste à s'assurer de la pertinence d'une méthodologie basée sur l'utilisation des deux environnements de simulation distincts. Ce travail a permis de valider ce choix. Les simulations ont alors été réparties entre les deux environnements. La totalité des résultats a alors été exploitée et analysée lors de la tâche 5 de ce volet (livrable 3.5).

## 1 Description des maisons individuelles types

Etant donné le cadre donné dans le livrable 3.1, concernant les maisons individuelles (MI) de trois époques distinctes (avant 1948, entre 1948 et 1974, après 1974), les recherches se sont focalisées sur la détection et l'uniformisation de modèles de maisons individuelles pouvant être appliqué comme référence pour la période concernée.

Ces recherches se sont majoritairement appuyées sur le programme PACTE (Programme d'action pour la qualité de la construction et la transition énergétique) et le référencement de bâtiment TABULA (Typologie des bâtiments résidentiels en France).

Au vu de la répartition sur le parc existant, les maisons modèles seront des maisons individuelles détachées (non mitoyennes), respectant au mieux les proportions géométriques (surface habitable, surface de façade, surface vitrée ...) et d'agencement (nombre de niveaux, facteur de forme, aménagement des pièces intérieures...). Le Tableau 1 présente les caractéristiques géométriques principales en fonction des périodes de construction des MI.

Tableau 1 : Données TABULA des bâtiments résidentiels individuels pour les trois périodes concernées ainsi que le cas de modèle "idéal" les représentant au mieux.

	Reference TABULA	% Parc existant	Niveaux	Surf. chauffée	Surf. vitrée	surf. facade	Svitrée/Sfacade	Svitrée/Schauffée
Avant 48	01-SFH	8.60%	2	88	15	207	0.07	0.17
	02-SFH	4.90%	2	86	15	178	0.08	0.17
	01-TH	2.60%	2	144	32	75	0.43	0.22
	02-TH	1.40%	2	88	10	145	0.07	0.11
IDEAL			2	86-90	12-15	140-180	0,06-0,08	0,11-0,17
Entre 48-74	03-SFH	5.00%	2	72	13	116	0.11	0.18
	04-SFH	4.10%	1+combles	119	19	104	0.18	0.16
	03-TH	1.30%	2	79	17	121	0.14	0.22
	04-TH	1%	2	105	21	49	0.43	0.20
IDEAL			2	75-100	15-17	100-115	0,11-0,15	0,17-0,2
Après 74	05-SFH	5.10%	1+combles	130	33	178	0.19	0.25
	06-SFH	5.10%	1+combles	144	15	121	0.12	0.10
	07-SFH	4.80%	1	97	15	133	0.11	0.15
	08-SFH	3.10%	1+combles	111	19	164	0.12	0.17
	09-SFH	4%	2	95	16	187	0.09	0.17
	10-SFH	0.80%	2	103	20	163	0.12	0.19
	05-TH	1.20%	1	75	15	73	0.21	0.20
	06-TH	1.10%	2	81	13	70	0.19	0.16
	07-TH	1.10%	2	155	14	72	0.19	0.09
	08-TH	0.70%	2	62	22	96	0.23	0.35
09-TH	1%	1	67	3	112	0.03	0.04	
10-TH	0.20%	1	93	16	84	0.19	0.17	
IDEAL			1+combles	100-120	16-19	130-160	0,12-0,17	0,15-0,19

On se propose donc d'utiliser des modèles de bâtiments préexistants dont les caractéristiques correspondraient au cas « idéal » pour chaque époque déterminée. Ces modèles préexistants, au nombre de trois, sont décrits dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Modèles de maisons individuelles de la base de données.

	Reference TABULA	% Parc existant	Niveaux	Surf. chauffée	Surf. vitrée	surf. facade	Svitrée/Sfacade	Svitrée/Schauffée
Maison Mozart	na	na	1	99.8	15	112.21	0.13	0.15
Puccini	na	na	2	85	11.2	143.74	0.08	0.13
Gershwin	na	na	2	158.5	21.12	143.3	0.15	0.13

On remarque que la maison Puccini correspond très bien aux spécifications d'une maison d'habitation d'avant 1948. La maison Mozart est représentative de la période 1948-1974, si on exclut le garage.

Pour ce qui est de la période après 1974, on se focalisera davantage sur une maison typique des années 1980 (représentative de 13 à 15% du parc français en maison individuelle, source DHUP de 2007 et 2011), possédant une configuration similaire à la maison Mozart, mais plus grande de 10% environ (soit surface habitable totale de 110 m<sup>2</sup>) et avec des matériaux correspondant à l'époque de construction.

Les trois modèles retenus sont décrits dans les sections suivantes.

## 1.1 Cas 1 : Maisons Individuelles anciennes (avant 1948)

### 1.1.1 Description géométrique et orientation

La MI de cette période est de type T4, d'environ 85 m<sup>2</sup>, comportant un RDC et un étage. L'agencement des pièces, surface des pièces, orientation, position et surface des parois opaques et vitrées sont présentés dans la Figure 1 et le Tableau 3.

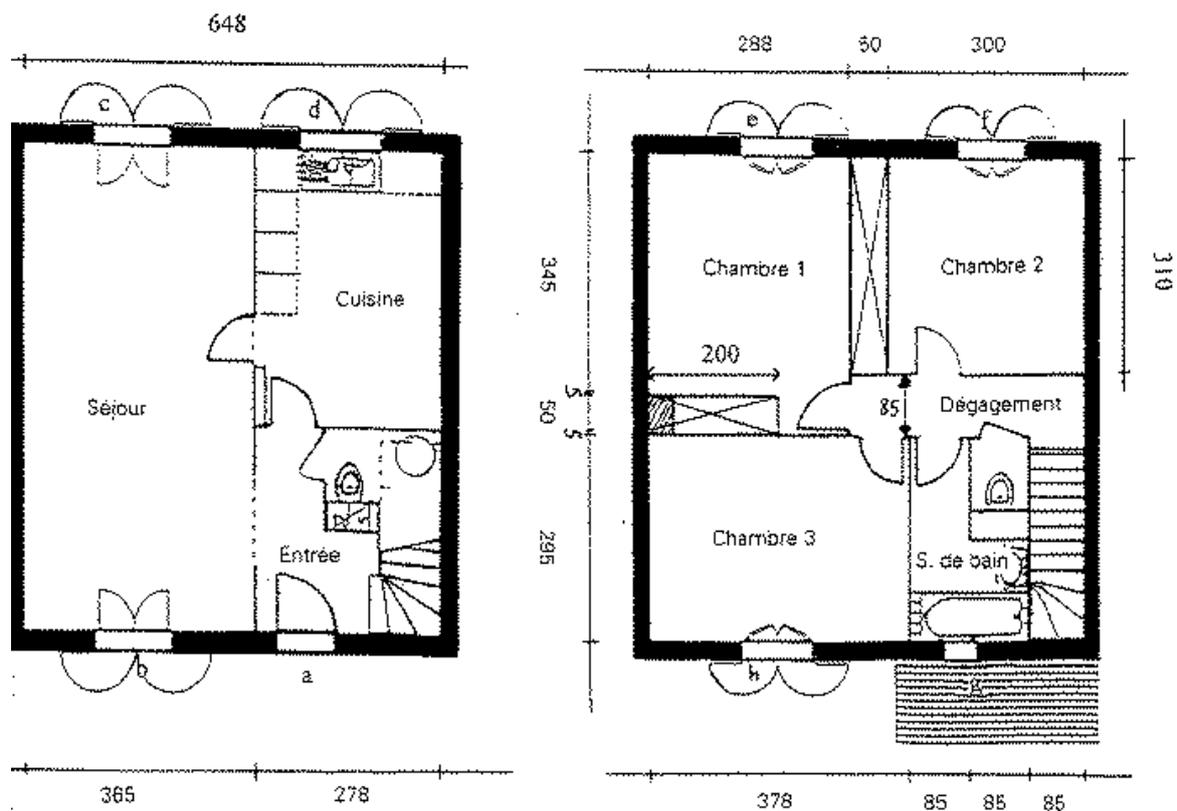


Figure 1 : Plan de la maison individuelle de la période de construction d'avant 1948.

Tableau 3 : Métré de la maison individuelle de la période de construction d'avant 1948.

Type de paroi ou de linéique	L(m)	h ou l (m)	S (m <sup>2</sup> )	Orientation	Reference
<b>Parois opaques</b>					
Mur extérieurs	7	5	28.356	sud	Paroi extérieure sud
	7.42	5	37.1	est	Paroi extérieure est
	7	5	28.46	nord	Paroi extérieure nord
	7.42	5	37.1	ouest	Paroi extérieure ouest
Plancher bas	7	7.42	51.94	sol RDC	Plancher bas
Plancher intermédiaire	7	7.42	51.94	sol 1er étage	Plancher intermédiaire
Plancher haut	7	7.42	51.94	30°sud et nord	Plancher haut
<b>Parois vitrées</b>					
fenêtres/portes-fenêtres	1.05	0.68	0.714	sud g	
	1.35	1	1.35	sud h	
	1.05	1.2	1.26	nord c	
	1.35	1	1.35	nord e	
	1.35	1	1.35	nord f	
	2.15	1.2	2.58	sud b	
	2.15	1.2	2.58	nord d	
Porte d'entrée	1	2	2	sud a	
<b>Ponts thermiques</b>					
Mur extérieur/plancher bas	28.84	-	-	-	
Mur extérieur/plancher haut	28.84	-	-	-	
<b>Parois opaques (combles)</b>					
Mur extérieur en contact avec les combles	7.42	-	7.95		
	7.42	-	7.95		
toiture (inclinaison 30°)	7	-	29.99		
	7	-	29.99		

### 1.1.2 Caractéristiques des parois

D'après le livrable T3.1, certaines caractéristiques sont très communes et font état de modèle pour les bâtiments de cette période. Un descriptif de la composition des parois retenues est donné dans le Tableau 4.

En résumé, les caractéristiques principales des parois sont les suivantes :

- Plancher haut : Toiture inclinée (30°), BA13 + 2cm LM + 2cm bois + tuiles – U = 1,35 W/ (m<sup>2</sup>. K),
- Mur extérieur : Briques pleines 22cm + enduit 2 cotés 2cm – U = 2,0 W/ (m<sup>2</sup>. K),
- Plancher bas : Poutres métalliques + hourdis brique – U = 2,0 W/ (m<sup>2</sup>. K),
- Menuiseries : Menuiserie bois Simple vitrage – U = 4,8 W/ (m<sup>2</sup>. K),
- Perméabilité : Q4 = 1,89 m<sup>3</sup>/(h . m<sup>2</sup>).

### 1.1.3 Chauffage et ventilation

Le chauffage est assuré par une chaudière fioul (16-30 kW) sans régulation, avec des radiateurs à eau chaude sans robinet thermostatique (haute température non isolé). Aucun système de ventilation n'est présent ; celle-ci est assurée par les infiltrations d'air à travers l'enveloppe. Des informations complémentaires (puissances des émetteurs, caractéristiques des systèmes...) sont disponibles dans l'Annexe A.

Tableau 4 : Composition des parois de la maison individuelle de la période de construction d'avant 1948.

Reference	Composant	Epaisseur x (m)	Conductivité Lambda [W/m.K]	Chaleur massique Cp [J/(kg.K)]	Masse volumique rho [kg/m³]	
plancher haut	Ba 13	0,013	0,25	-	825	8062,14006
	LM	0,02	0,045	1030	20	
	Bois	0,02	0,15	1880	650	
	Tuiles	0,02	1	1000	1700	
Reference	Composant	Epaisseur x (m)	Conductivité Lambda [W/m.K]	Chaleur massique Cp [J/(kg.K)]	Masse volumique rho [kg/m³]	
mur extérieur	Enduit extérieur (chaux)	0,02	1,2	-	1600	8062,14006
	Brique pleine	0,22	0,93	860	1350	
	Enduit intérieur (platre)	0,02	0,35	-	950	
Reference	Composant	Epaisseur x (m)	Conductivité Lambda [W/m.K]	Chaleur massique Cp [J/(kg.K)]	Masse volumique rho [kg/m³]	
Plancher bas	Hourdis brique	0,13	0,35	820	700	8062,14006
	parquet	0,02	0,8	-	850	
Reference	Composant	Epaisseur x (m)	Conductivité Lambda [W/m.K]	Chaleur massique Cp [J/(kg.K)]	Masse volumique rho [kg/m³]	
plancher intermédiaire	parquet	0,02	0,8	-	850	8062,14006
	air	0,1	0,025	1000	1,23	
	brique platrière	0,05	0,35	820	700	
	platre	0,02	0,35	-	950	
Reference	Composant	Epaisseur x (m)	Conductivité Lambda [W/m.K]	Chaleur massique Cp [J/(kg.K)]	Masse volumique rho [kg/m³]	
paroi intérieure	Enduit intérieur (platre)	0,02	0,35	-	950	8062,14006
	Brique platrière	0,05	0,35	820	700	
	Enduit intérieur (platre)	0,02	0,35	-	950	

## 1.2 Cas 2 : Maisons Individuelles non isolées (entre 1948 et 1974)

### 1.2.1 Description géométrique et orientation

La MI de cette période est de type T4, d'environ 100 m<sup>2</sup>, de plain-pied. L'agencement des pièces, surface des pièces, orientation, position et surface des parois opaques et vitrées sont présentés dans la Figure 2 et le Tableau 5.

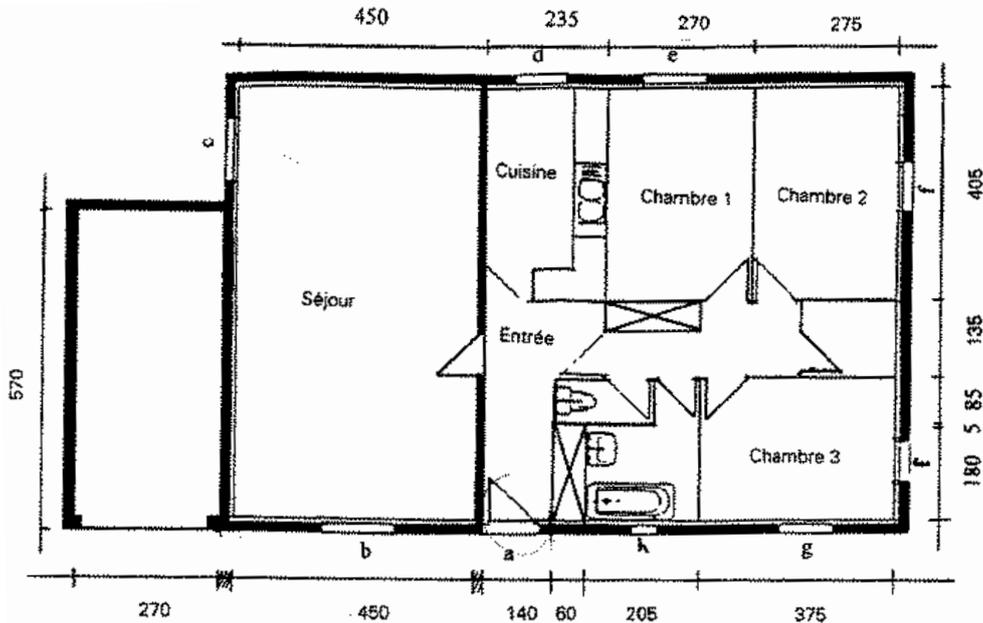


Figure 2 : Plan de la maison individuelle de la période de construction 1948-1974.

Tableau 5 : Métré de la maison individuelle de la période de construction 1948-1974.

Type de paroi ou de linéique	L(m)	h ou l (m)	S (m <sup>2</sup> )	Orientation	Reference
<b>Parois opaques</b>					
Mur extérieurs	12.84	2.5	24.1365	sud	Paroi extérieure sud
	8.64	2.5	17.73	est	Paroi extérieure est
	12.84	2.5	29.685	nord	Paroi extérieure nord
	8.64	2.5	18.805	ouest	Paroi extérieure ouest
Plancher bas	12.84	8.64	110.9376	sol RDC	Plancher bas
Plancher haut	12.84	8.64	110.9376	-	Plancher haut
<b>Parois vitrées</b>					
Fenêtres/portes fenêtrées	2.15	1.3	2.795	ouest c	porte fenetre c
	1.15	0.9	1.035	nord d	fenetre d
	1.15	1.2	1.38	nord e	fenetre e
	2.15	0.9	1.935	est f(1)	porte fenetre f1
	2.15	0.9	1.935	est f(2)	porte fenetre f2
	2.15	1.2	2.58	sud g	porte fenetre g
	0.7	0.63	0.441	sud h	fenetre h
	2.15	1.35	2.9025	sud b	porte fenetre b
	1	2.04	2.04	sud a	porte entree a
	<b>Ponts thermiques</b>				
Mur extérieur/plancher bas	42.96	-	-	-	pont thermique bas
Mur extérieur/plancher haut	42.96	-	-	-	pont thermique haut
<b>Parois opaques (combles)</b>					
Mur extérieur en contact avec les combles	8.64	-	10.77	est	comble est
	8.64	-	10.77	ouest	comble ouest
	12.84	-	64.07	sud	toiture sud
	12.84	-	64.07	nord	toiture nord

### 1.2.2 Caractéristiques des parois

D'après le livrable T3.1, certaines caractéristiques sont très communes et font état de modèle pour les bâtiments de cette période. Un descriptif de la composition des parois retenues est donné dans le Tableau 6.

En résumé, les caractéristiques principales des parois sont les suivantes :

- Plancher haut : Plancher haut vers combles, 1cm PSE sous Ba13, bois, solives, bois –  $U = 2,42 \text{ W/ (m}^2 \cdot \text{K)}$ ,
- Mur extérieur : Parpaing creux non isolé 23cm, enduit 2 cotés 2cm –  $U = 2,8 \text{ W/ (m}^2 \cdot \text{K)}$ ,
- Plancher bas : Dalle béton 20 cm non isolé sur LNC –  $U = 2,5 \text{ W/ (m}^2 \cdot \text{K)}$ ,
- Menuiseries : Menuiserie bois Simple vitrage –  $U = 4,6 \text{ W/ (m}^2 \cdot \text{K)}$ ,
- Perméabilité :  $Q4 = 1,43 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ .

### 1.2.3 Chauffage et ventilation

Le chauffage est assuré par une chaudière fioul (16-30 kW) sans régulation, avec des radiateurs à eau chaude sans robinet thermostatique (haute température non isolé). Un système de ventilation naturelle par conduit permet d'assurer le renouvellement d'air. Des informations complémentaires (puissances des émetteurs, caractéristiques des systèmes...) sont disponibles dans l'Annexe A.

Tableau 6 : Composition des parois de la maison individuelle de la période de construction 1948-1974.

Reference	Composant	Epaisseur x (m)	Conductivité Lambda [W/]	Chaleur massique Cp [J/(kg*K)]	Masse volumique rho [kg/m³]	
plancher haut	PSE	0,01	0,035	1450	30	1948-1974
	Ba 13	0,013	0,25	-	825	
	Bois	0,02	0,15	1880	650	
	Solives	0,02	0,14	2500	500	
	Bois	0,02	0,15	1880	650	
	Tuiles	0,02	-	1000	1700	
Reference	Composant	Epaisseur x (m)	Conductivité Lambda [W/]	Chaleur massique Cp [J/(kg*K)]	Masse volumique rho [kg/m³]	
mur extérieur	Enduit extérieur (chaux)	0,02	1,2	-	1600	1948-1974
	Parpaing creux	0,23	0,952	1000	1100	
	Enduit intérieur (platre)	0,02	0,35	-	950	
Reference	Composant	Epaisseur x (m)	Conductivité Lambda [W/]	Chaleur massique Cp [J/(kg*K)]	Masse volumique rho [kg/m³]	
Plancher bas	Dalle béton non isolé	0,2	1,65	1000	2150	1948-1974
	LMC	0,1	0,039	1030	200	
	Carrelage	0,02	1,3	1000	2000	
Reference	Composant	Epaisseur x (m)	Conductivité Lambda [W/]	Chaleur massique Cp [J/(kg*K)]	Masse volumique rho [kg/m³]	
paroi intérieure	Enduit intérieur (platre)	0,02	0,35	-	950	1948-1974
	Brique platriere	0,05	0,35	820	700	
	Enduit intérieur (platre)	0,02	0,35	-	950	

### 1.3 Cas 3 : Maisons Individuelles isolées (après 1974)

#### 1.3.1 Description géométrique et orientation

La MI de cette période est de type T4, d'environ 110 m<sup>2</sup>, de plain-pied. L'agencement des pièces, surface des pièces, orientation, position et surface des parois opaques et vitrées sont présentés dans la Figure 3 et le Tableau 7.

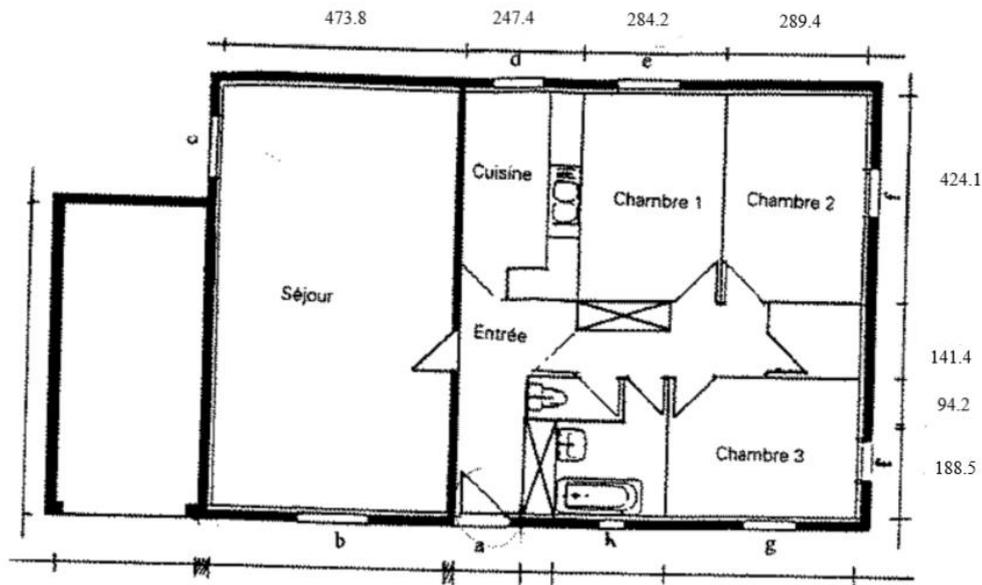


Figure 3 : Plan de la maison individuelle de la période de construction d'après 1974.

Tableau 7 : Métré de la maison individuelle de la période de construction d'après 1974.

Type de paroi ou de linéique	L(m)	h ou l (m)	S (m <sup>2</sup> )	Orientation	Reference
<b>Parois opaques</b>					
Mur extérieurs	13.488	2.5	25.7565	sud	Paroi extérieure sud
	9.022	2.5	18.685	est	Paroi extérieure est
	13.488	2.5	31.305	nord	Paroi extérieure nord
	9.022	2.5	19.76	ouest	Paroi extérieure ouest
Plancher bas	13.488	9.022	121.688736	sol RDC	Plancher bas
Plancher haut	9.022	13.488	121.688736	-	Plancher haut
<b>Parois vitrées</b>					
Fenêtres/portes-fenêtres	2.15	1.3	2.795	ouest c	porte fenetre c
	1.15	0.9	1.035	nord d	fenetre d
	1.15	1.2	1.38	nord e	fenetre e
	2.15	0.9	1.935	est f(1)	porte fenetre f1
	2.15	0.9	1.935	est f(2)	porte fenetre f2
	2.15	1.2	2.58	sud g	porte fenetre g
	0.7	0.63	0.441	sud h	fenetre h
	2.15	1.35	2.9025	sud b	porte fenetre b
	1	2.04	2.04	sud a	porte entree a
<b>Ponts thermiques</b>					
Mur extérieur/plancher bas	45.02	-	-	-	pont thermique bas
Mur extérieur/plancher haut	45.02	-	-	-	pont thermique haut
<b>Parois opaques (combles)</b>					
extérieur en contact avec les com	9.022	-	11.75	est	comble est
	9.022	-	11.75	ouest	comble ouest
toiture (inclinaison 30°)	13.488	-	70.27	sud	toiture sud
	13.488	-	70.27	nord	toiture nord

### 1.3.2 Caractéristiques des parois

D'après le livrable T3.1, certaines caractéristiques sont très communes et font état de modèle pour les bâtiments de cette période. Un descriptif de la composition des parois retenues est donné dans le Tableau 8.

En résumé, les caractéristiques principales des parois sont les suivantes :

- Plancher haut : Plancher léger vers combles + 10 cm laine minérale Th35 –  $U = 0,32 \text{ W/ (m}^2 \cdot \text{K)}$ ,
- Mur extérieur : Parpaing 20 cm + ITI 4cm PSE Th40 + BA13 –  $U = 0,42 \text{ W/ (m}^2 \cdot \text{K)}$ ,
- Plancher bas : Dalle béton 15 cm + 2cm PSE Th40 sur LNC –  $U = 1,25 \text{ W/ (m}^2 \cdot \text{K)}$ ,
- Menuiseries : Menuiserie PVC double vitrage 4/12/4 (air) –  $U = 2,6 \text{ W/ (m}^2 \cdot \text{K)}$ ,
- Perméabilité :  $Q4 = 1,43 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ .

### 1.3.3 Chauffage et ventilation

Le chauffage est assuré par des convecteurs électriques NFC. Un système de ventilation mécanique simple flux autoréglable permet d'assurer le renouvellement d'air. Des informations complémentaires (puissances des émetteurs, caractéristiques des systèmes...) sont disponibles dans l'Annexe A.

Tableau 8 : Composition des parois de la maison individuelle de la période de construction d'après 1974.

Reference	Composition	Composant	Epaisseur x (m)	Conductivité Lambd	Chaleur massique Cp [J/	Masse volumique rho [kg/m^3]	
plancher haut	Composition	Laine minérale TH35	0.1	0.035	1030	200	après 1974
		Ba 13	0.013	0.25	1000	825	
		Bois	0.02	0.15	1880	650	
		Solives	0.02	0.14	2500	500	
		Bois	0.02	0.15	1880	650	
		Tuiles	0.02	1	1000	1700	
Reference	Composition	Composant	Epaisseur x (m)	Conductivité Lambd	Chaleur massique Cp [J/	Masse volumique rho [kg/m^3]	
mur extérieur	Composition	Parpaing	0.2	0.952	650	1185	après 1974
		PSE TH40	0.04	0.035	1450	30	
		Ba13	0.013	0.25	1000	825	
Reference	Composition	Composant	Epaisseur x (m)	Conductivité Lambd	Chaleur massique Cp [J/	Masse volumique rho [kg/m^3]	
Plancher bas	Composition	Dalle béton	0.2	1.65	1000	2150	après 1974
		PSE TH40	0.02	0.035	1450	30	
		Carrelage	0.02	1.3	1000	2000	
Reference	Composition	Composant	Epaisseur x (m)	Conductivité Lambd	Chaleur massique Cp [J/	Masse volumique rho [kg/m^3]	
paroi intérieure	Composition	Ba13	0.013	0.25	1000	825	après 1974
		isolant acoustique chanvre	0.05	0.04	1800	45	
		Ba13	0.013	0.25	1000	825	

## 2 Description de l'environnement intérieur

### 1.1 Sources de chaleur et d'humidité

Pour les simulations, différentes sources de production d'humidité et de chaleur ont été définies. Elles sont identiques pour tous les cas simulés cas 1 (avant 1948), cas 2 (entre 1948 et 1974) et cas 3 (après 1974), avant et après rénovation.

#### 1.1.1 Sources de chaleur

Deux types de sources de productions de chaleur ont été prises en compte :

- Celles liées aux activités humaines (activité métabolique),
- Celles liées au fonctionnement d'appareils comme les appareils ménagers, le matériel informatique, les appareils de réfrigération et le matériel audiovisuel.

Les valeurs ont alors été calculées en tenant compte des scénarii d'occupation (nombre d'occupants, activités et pièces du logement occupées). Les valeurs utilisées sont définies dans le Tableau 9.

Tableau 9 : Sources de Production de chaleur (W).

Production de chaleur liée à l'activité (W)		
<b>Respiration</b>	Adulte éveillé / Adulte éveillé en cuisine	120 / 200
	Adulte endormi	80
	Enfant éveillé	84
	Enfant endormi	56
<b>Repas</b>	Repas	3,7 kWh/m <sup>2</sup> /an (Th-BCE 2012) – 40 W petit déjeuner, 40 W déjeuner et 40 W diner
<b>Hygiène</b>	Douche	0,6 kWh/m <sup>2</sup> /an (Th-BCE 2012) – 7 W
<b>Matériel</b>	Audiovisuel	6,8 kWh/m <sup>2</sup> /an (Th-BCE 2012) – 78 W
	Informatique	5,0 kWh/m <sup>2</sup> /an (Th-BCE 2012) – 57 W
	Réfrigération	8 kWh/m <sup>2</sup> /an (Th-BCE 2012) – 91 W
	Appareils ménagers	2,2 kWh/m <sup>2</sup> /an (Th-BCE 2012) – 25 W

#### 1.1.2 Sources d'humidité

Les activités humaines quotidiennes sont sources de production d'humidité. Ces sources ont été prises en compte dans les simulations. Les scénarii de sources de production ont été générés à partir des valeurs spécifiées dans le Tableau 10.

Tableau 10 : Sources de production d'humidité (g/h ou g/occupant).

Sources d'humidité (g/h ou g/occupant)		
<b>Respiration</b>	Adulte éveillé	55
	Adulte endormi	33
	Enfant éveillé	45
	Enfant endormi	15
<b>Repas</b>	Petit déjeuner	50
	Déjeuner	100
	Dîner	300
	Vaisselle	15
<b>Hygiène</b>	Sèche-linge	300
	Douche	300

## 2.2 Définition des sources des polluants

### 2.2.1 Sources intérieures de polluants

#### 2.2.1.1 Emissions des sources de polluants

La base de données PANDORE a été traitée de manière statistique vis-à-vis des couples source/polluant et l'évolution temporelle de l'émissions de ces sources est considéré. Ce traitement de la base a permis l'élaboration d'une librairie conséquente de sources d'émissions internes pour le logiciel CONTAM. Six points statistiques (minimum, P25, médiane, moyenne, P75 et maximum) par couple source/polluant ont ainsi été intégrés.

Dans le cadre du projet Smart-Réno, nous avons choisi d'utiliser certaines de ces sources lors des étapes de modélisation de la QAI. Les COV (formaldéhyde, benzène, toluène) sont émis par des sources permanentes liées à l'ameublement et l'habillage des surfaces intérieures (peintures murales, revêtements de sols). Les particules fines (PM<sub>2,5</sub>) et dioxyde d'azote sont émis par les activités et les appareils de cuissons.

Ce projet a pour but de quantifier l'impact des rénovations énergétiques sur le bien-être des occupants. Dans ce sens, nous avons fait l'hypothèse de choisir des matériaux plus émissifs (niveau P75) mais anciens (5 ans ou 10 ans) pour les bâtiments non rénovés et des matériaux parmi les moins émissifs (P25) mais neufs (28 jours ou 1 an) pour les bâtiments rénovés. Les taux d'émissions de certains matériaux diminuent au fil du temps. Nous considérons également que les émissions liées à la cuisson sont indépendantes d'une rénovation. Ainsi, le niveau d'émission moyen a été choisi quel que soit l'état du bâtiment.

Les taux d'émissions nécessaires à la mise en place de simulations numériques telles que le décrit le cahier des charges sont présentés dans les tableaux suivants.

Tableau 11 : Emissions de formaldéhyde.

<b>Formaldéhyde</b>		<b>Avant rénovation</b>		<b>Après rénovation</b>	
Matériaux	Âge des matériaux	10 ans	5 ans	1 an	28 jours
Peinture		0,27	0,27	0,014	0,014
Mobilier		0,05	0,05	0,05	0,05
Revêtement de sol		0,138	0,138	0,05	0,05
cuisson		328,2	328,2	328,2	328,2

Taux d'émission en  $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{min}$ , sauf cuisson en  $\mu\text{g}/\text{min}$

Tableau 12 : Emissions de benzène.

<b>Benzène</b>		<b>Avant rénovation</b>		<b>Après rénovation</b>	
Matériaux	Âge des matériaux	10 ans	5 ans	1 an	28 jours
Peinture		0,03	0,03	0	0
Mobilier		0,02	0,02	$3,5 \times 10^{-4}$	$3,5 \times 10^{-4}$
Revêtement de sol		0,0167	0,0167	$4,5 \times 10^{-4}$	$4,5 \times 10^{-4}$

Taux d'émission en  $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{min}$

Tableau 13 : Emissions de toluène.

<b>Toluène</b>		<b>Avant rénovation</b>		<b>Après rénovation</b>	
Matériaux	Âge des matériaux	10 ans	5 ans	1 an	28 jours
Peinture		0,03	0,03	0,03	0,03
Mobilier		0,02	0,02	$1,6 \times 10^{-3}$	$1,6 \times 10^{-3}$
Revêtement de sol		0,19	0,19	0,02	0,02

Taux d'émission en  $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{min}$

Tableau 14 : Emissions de dioxyde d'azote.

<b>NO<sub>2</sub></b>	<b>Avant et Après rénovation</b>
Appareils de cuisson	1687,5

Taux d'émission en  $\mu\text{g}/\text{min}$

Tableau 15 : Emissions de PM<sub>2,5</sub>.

<b>PM<sub>2,5</sub></b>	<b>Avant et Après rénovation</b>
Cuisson	45,5
Appareils de cuisson	69,7

Taux d'émission en  $\mu\text{g}/\text{min}$

### 2.2.1.2 Surfaces d'émissions

Pour construire une simulation réaliste, il est nécessaire d'intégrer des surfaces cohérentes pour chaque matériau. Pour les peintures murales, les surfaces correspondent à la somme des surfaces latérales de la pièce ainsi que celle du plafond. Les revêtements de sols recouvrent entièrement le plancher de chaque pièce. La quantité de meubles présents dans une pièce peut fortement varier d'un individu à l'autre et il n'existe, à notre connaissance, aucune donnée scientifique décrivant l'ameublement statistique d'un logement. Nous avons donc dû faire des choix arbitraires. Les quantités de meubles proposés sont présentés dans le Tableau 16 pour le salon et la cuisine et dans le Tableau 17 pour les autres pièces du logement pour le cas 3 à titre illustratif.

Tableau 16 : Surfaces de meubles dans le séjour et la cuisine.

Pièce	Meuble	Quantité	Surface par meuble (m <sup>2</sup> )	Source correspondante
Salon	Table à manger	1	1,52	Matériaux d'ameublement
	Placard	1	4,64	
	Buffet	1	2,5	
	Meuble TV	1	1,5	
	Commode	1	2,5	
	Chaise	4	0,16	
Cuisine	Four	1		Appareil de cuisson
	Plan de travail	1	4,8	Matériaux d'ameublement
	Table de cuisine	1	1	
	Chaise	4	0,16	
	Plaques de cuisson	1		Appareil de cuisson

Tableau 17 : Surfaces de meubles pour l'entrée, les chambres, la SdB, le garage et les WC.

Pièce	Meuble	Quantité	Surface par meuble (m <sup>2</sup> )	Source correspondante
Couloir	Console	1	0,12	Matériaux d'ameublement
Chambres	Placard	1	4,64	Matériaux d'ameublement
	Lit	1	4	
	Table de chevet	2 (1 pour la chambre d'enfants)	0,16	
	Commode	1	2,5	
SdB	Meuble de salle de bain	1	3,5	Matériaux d'ameublement
	Vasque de robinet	1	2,3	
Garage	Étagère	7	0,2	Matériaux d'ameublement
WC	Étagère	1	0,2	Matériaux d'ameublement

### 2.2.1.3 Synthèse des sources de polluants par pièce

Les six tableaux suivants synthétisent les taux d'émission des sources intérieures **par pièce** finalement implémentées dans les simulations pour les trois maisons individuelles étudiées (cas 1, 2 et 3) et avant/après rénovation. Les taux d'émissions après rénovation correspondent à un taux d'émission pour une étiquette d'émission en COV entre A+ et A. Pour le toluène, les matériaux répertoriés étant déjà sous le seuil A+/A, ils sont identiques avant et après rénovation.

Tableau 18 : Taux d'émission global par pièce - Cas 1 avant rénovation.

	<b>Formaldéhyde (µg/min)</b>	<b>Benzène (µg/min)</b>	<b>Toluène (µg/min)</b>
Séjour	26,89	3,34	7,67
Cuisine	12,67	1,57	1,74
Entrée	11,63	1,36	2,57
SdB-RDC	6,53	0,76	1,20
Chambre 1	14,62	1,95	3,68
Chambre 2	14,46	1,93	3,49
Chambre 3	15,61	2,06	3,97
Escalier	21,07	2,46	3,33
Sdb-1er étage	8,87	1,10	1,28

Tableau 19 : Taux d'émission global par pièce - Cas 2 avant rénovation.

	<b>Formaldéhyde (µg/min)</b>	<b>Benzène (µg/min)</b>	<b>Toluène (µg/min)</b>
Séjour	21,96	2,77	9,09
Cuisine	9,88	1,25	2,90
Entrée	14,81	1,73	1,73
SdB	7,93	0,94	2,18
Chambre 1	11,08	1,54	3,43
Chambre 2	11,15	1,54	3,47
Chambre 3	10,56	1,47	3,23

Tableau 20 : Taux d'émission global par pièce - Cas 3 avant rénovation.

	<b>Formaldéhyde (µg/min)</b>	<b>Benzène (µg/min)</b>	<b>Toluène (µg/min)</b>
Séjour	22,98	2,89	9,84
Cuisine	10,27	1,29	3,11
Entrée	17,39	2,03	4,673
Sdb	8,25	0,98	3,45
Chambre 1	11,51	1,59	3,67
Chambre 2	11,58	1,59	3,45
Chambre 3	10,97	1,52	3,72

Tableau 21 : Taux d'émission global par pièce - Cas 1 après rénovation.

	<b>Formaldéhyde (µg/min)</b>	<b>Benzène (µg/min)</b>	<b>Toluène (µg/min)</b>
Séjour	5,39	3,34	7,67
Cuisine	1,13	1,57	1,74
Entrée	1,55	1,36	2,57
Sdb-Rdc	0,69	0,76	1,20
Chambre 1	2,93	1,95	3,68
Chambre 2	2,77	1,93	3,49
Chambre 3	3,10	2,06	3,97
Escalier	1,81	2,46	3,33
Sdb-1er étage	0,85	1,10	1,28

Tableau 22 : Taux d'émission global par pièce - Cas 2 après rénovation.

	<b>Formaldéhyde (<math>\mu\text{g}/\text{min}</math>)</b>	<b>Benzène (<math>\mu\text{g}/\text{min}</math>)</b>	<b>Toluène (<math>\mu\text{g}/\text{min}</math>)</b>
Séjour	6,62	2,77	9,09
Cuisine	2,09	1,25	2,90
Entrée	0,81	1,73	1,73
Sdb	1,42	0,94	2,18
Chambre 1	2,86	1,54	3,43
Chambre 2	2,87	1,54	3,47
Chambre 3	2,71	1,47	3,23

Tableau 23 : Taux d'émission global par pièce - Cas 3 après rénovation.

	<b>Formaldéhyde (<math>\mu\text{g}/\text{min}</math>)</b>	<b>Benzène (<math>\mu\text{g}/\text{min}</math>)</b>	<b>Toluène (<math>\mu\text{g}/\text{min}</math>)</b>
Séjour	11,66	0,94	9,84
Cuisine	4,52	0,30	3,11
Entrée	7,05	0,25	4,67
Sdb	3,43	0,15	2,34
Chambre 1	5,44	0,54	3,67
Chambre 2	5,48	0,54	3,45
Chambre 3	5,17	0,52	3,71

### 2.2.2 Vitesse de dépôt des particules PM<sub>2,5</sub>

Les particules fines ne restent pas en suspension dans l'air. Elles sont attirées par les différentes parois de la pièce. Les nombreuses particules présentes dans l'air sont de tailles très variées et chaque taille de particule a sa propre vitesse de dépôt sur les surfaces horizontales et verticales, sa propre efficacité de filtration ainsi que son propre taux d'émission pour une source donnée. Dans ce projet, nous traiterons les PM<sub>2,5</sub> comme un seul polluant. Cette approche peut induire un biais si on intègre une seule valeur de dépôt. Bien que non gênant pour les sources d'émissions (il suffit de sommer les émissions de chaque taille pour obtenir une émission totale de PM<sub>2,5</sub>), pour la vitesse de dépôt des particules, le problème est plus délicat. En effet, on pourrait être tenté de prendre une valeur moyenne correspondant à une taille médiane, ce qui serait critiquable car les plus grosses particules sont moins nombreuses mais beaucoup plus lourdes. Une autre option serait d'observer la décroissance d'un nuage de particule dont la concentration initiale est uniforme et fixé, mais seulement, si ce nuage n'est pas représentatif de la situation à modéliser par la suite, la vitesse de dépôt ne sera pas fiable.

Avec la connaissance de ces contraintes, nous avons décidé de reprendre les résultats d'un grand nombre de simulations réalisées auparavant dans un contexte qui se veut représentatif de la QAI pour les logements français. L'objectif de cette démarche est d'obtenir une distribution granulométrique statistique qui soit représentative de ce qu'on peut trouver dans les logements français. Une fois cette distribution obtenue, on peut injecter un nuage respectant la granulométrie dans une simulation où l'ambiance est contrôlée pour observer le dépôt global sur l'ensemble des PM<sub>2,5</sub>. La Figure 4 schématise cette démarche.

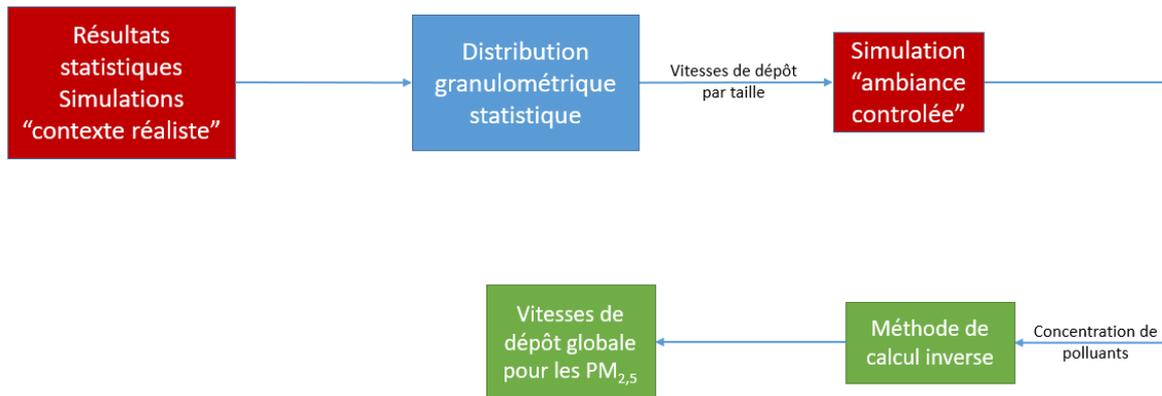


Figure 4 : Procédure d'obtention d'une vitesse de dépôt globale pour les PM<sub>2,5</sub>.

Le Tableau 24 recense les résultats obtenus pour les vitesses de dépôt des PM<sub>2,5</sub>. On remarque une vitesse de dépôt de l'ordre de 6,42 m.min<sup>-1</sup> quelle que soit l'inclinaison de la surface de dépôt. Le nuage de particule PM<sub>2,5</sub> se dépose à une vitesse proche de celle des particules ayant une taille de 0,2 à 0,4 µm.

Tableau 24 : Tableau récapitulatif des vitesses de dépôt pour les PM<sub>2,5</sub>.

Sens de la vitesse de dépôt	Vitesse de dépôt (cm.s <sup>-1</sup> )
Vers le haut (plafond)	1,2099×10 <sup>-4</sup>
Vers le bas (sol)	3,5635×10 <sup>-3</sup>
Horizontal (murs)	3,7382×10 <sup>-4</sup>
Globale	1,2379×10 <sup>-3</sup>

Notre étude a permis de déterminer les vitesses de dépôt de particules PM<sub>2,5</sub> par inclinaison de surface (sol, plafond et murs) à partir de simulations numériques. Nous comparons dans la Figure 5 nos résultats aux valeurs mentionnées dans la littérature, exprimées en m/h. Ces valeurs sont des valeurs de dépôt global c'est-à-dire pour l'ensemble des parois d'un local. Nous avons calculé la valeur globale à partir des valeurs par inclinaison en considérant une pièce de dimensions 4m × 2,75m × 2,5m. On observe que la valeur obtenue, notée « Smart-Réno », est comparable à celles de la littérature. L'avantage de notre démarche est que nous séparons par inclinaison les surfaces de dépôt afin d'être plus précis dans sa prise en compte.

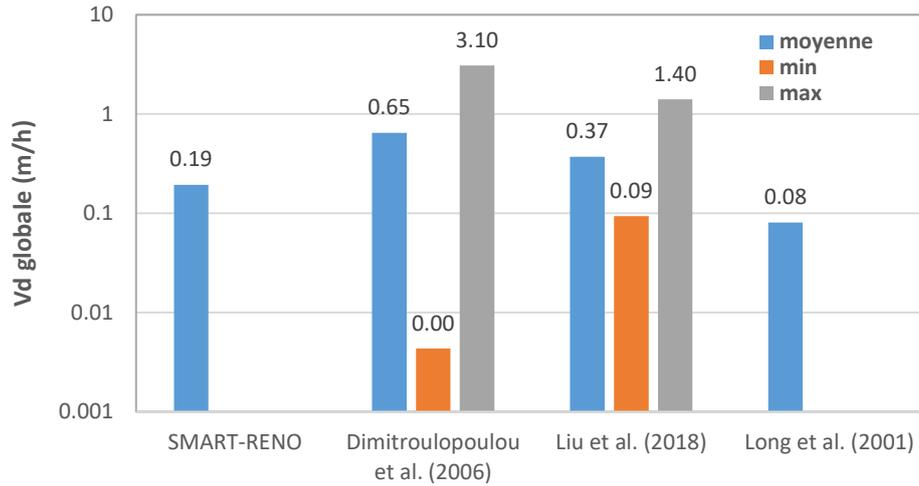


Figure 5: Comparaison de la vitesse de dépôt globale obtenue dans la présente étude avec les données de la littérature.

### 2.2.3 Vitesse de dépôt du NO<sub>2</sub>

La vitesse de dépôt totale (ou simplement vitesse de dépôt)  $v_d$  ( $m.s^{-1}$ ) s'exprime en fonction de la vitesse de dépôt à la surface  $v_s$  ( $m.s^{-1}$ ) et la vitesse de dépôt dû aux transports advectif et diffusif  $v_t$  ( $m.s^{-1}$ ) selon l'équation suivante :

$$\frac{1}{v_d} = \frac{1}{v_s} + \frac{1}{v_t}$$

La Figure 6 et la Figure 7 illustrent le comportement de ces vitesses de dépôt.

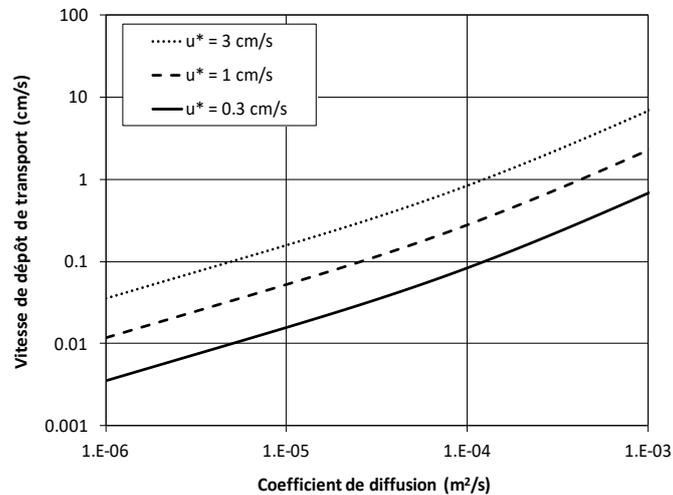


Figure 6 : Vitesse de dépôt de transport pour les gaz inorganiques (Modèle adapté de Lai et Nazaroff, 2000)

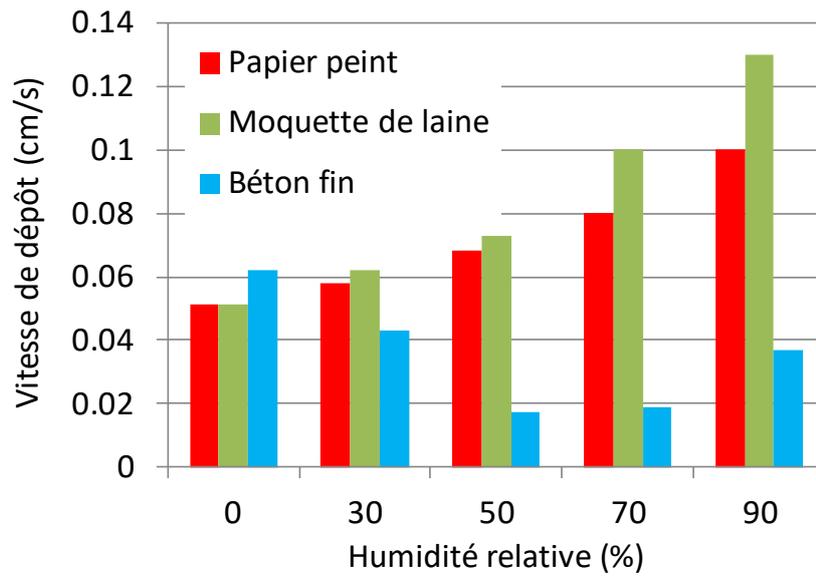


Figure 7 : Influence de l'humidité relative sur la vitesse de dépôt de surface pour le  $\text{NO}_2$  (Grøntoft et Raychaudhuri, 2004).

Une vitesse de dépôt  $v_d = 2,2 \times 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$  sera utilisée dans le cadre de cette étude.

## 2.3 Scénarios d'occupation

Les deux tableaux suivants présentent les scénarios d'occupation pour les jours de semaine et de week-end.

Tableau 25 : Scénarios d'occupation – jour type semaine.

	Séjour		Cuisine		Salle de bain		chambre 1 (enfant)		chambre 2 (enfant)		chambre 3 (parent)	
	parent	enfant	parent	enfant	parent	enfant	parent	enfant	parent	enfant	parent	enfant
0-0h30	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0
0h30-1h	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0
1h-1h30	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0
1h30-2h	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0
2h-2h30	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0
2h30-3h	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0
3h-3h30	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0
3h30-4h	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0
4h-4h30	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0
4h30-5h	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0
5h-5h30	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0
5h30-6h	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0
6h-6h30	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0
6h30-7h	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0
7h-7h30	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0
7h30-8h	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8h-8h30	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8h30-9h	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9h-9h30	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9h30-10h	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10h-10h30	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10h30-11h	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11h-11h30	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11h30-12h	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12h-12h30	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12h30-13h	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13h-13h30	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13h30-14h	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14h-14h30	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14h30-15h	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15h-15h30	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15h30-16h	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16h-16h30	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16h30-17h	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17h-17h30	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17h30-18h	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18h-18h30	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0
18h30-19h	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19h-19h30	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19h30-20h	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20h-20h30	1,5	2	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20h30-21h	1,5	2	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21h-21h30	1,5	0	0	0	0,5	0	0	1	0	1	0	0
21h30-22h	1,5	0	0	0	0,5	0	0	1	0	1	0	0
22h-22h30	1,5	0	0	0	0,5	0	0	1	0	1	0	0
22h30-23h	1,5	0	0	0	0,5	0	0	1	0	1	0	0
23h-23h30	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0
23h30-24h	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0

Tableau 26 : Scénarios d'occupation – jour type week-end.

	Séjour		Cuisine		Salle de bain		chambre 1 (enfant)		chambre 2 (enfant)		chambre 3 (parent)	
	parent	enfant	parent	enfant	parent	enfant	parent	enfant	parent	enfant	parent	enfant
0-0h30	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0
0h30-1h	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0
1h-1h30	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0
1h30-2h	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0
2h-2h30	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0
2h30-3h	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0
3h-3h30	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0
3h30-4h	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0
4h-4h30	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0
4h30-5h	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0
5h-5h30	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0
5h30-6h	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0
6h-6h30	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0
6h30-7h	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0
7h-7h30	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0
7h30-8h	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0
8h-8h30	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0
8h30-9h	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0
9h-9h30	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9h30-10h	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10h-10h30	2	1	0	0	0	0	0	0,5	0	0,5	0	0
10h30-11h	2	1	0	0	0	0	0	0,5	0	0,5	0	0
11h-11h30	1,5	1	0,5	0	0	0	0	0,5	0	0,5	0	0
11h30-12h	1,5	1	0,5	0	0	0	0	0,5	0	0,5	0	0
12h-12h30	0,5	2	1,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12h30-13h	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13h-13h30	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13h30-14h	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14h-14h30	1,5	1	0	0	0	0	0	0,5	0	0,5	0,5	0
14h30-15h	1,5	1	0	0	0	0	0	0,5	0	0,5	0,5	0
15h-15h30	1,5	1	0	0	0	0	0	0,5	0	0,5	0,5	0
15h30-16h	1,5	1	0	0	0	0	0	0,5	0	0,5	0,5	0
16h-16h30	1,5	1	0	0	0	0	0	0,5	0	0,5	0,5	0
16h30-17h	1,5	1	0	0	0	0	0	0,5	0	0,5	0,5	0
17h-17h30	1,5	1	0	0	0	0	0	0,5	0	0,5	0,5	0
17h30-18h	1,5	1	0	0	0	0	0	0,5	0	0,5	0,5	0
18h-18h30	2	1	0	0	0	0	0	0,5	0	0,5	0	0
18h30-19h	2	1	0	0	0	0	0	0,5	0	0,5	0	0
19h-19h30	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
19h30-20h	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
20h-20h30	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20h30-21h	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21h-21h30	1,5	2	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21h30-22h	1,5	2	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22h-22h30	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22h30-23h	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23h-23h30	1	0	0	0	0,5	0	0	1	0	1	0,5	0
23h30-24h	1	0	0	0	0,5	0	0	1	0	1	0,5	0

## 3 Description de l'environnement extérieur

### 3.1 Localisation géographique

Les effets des actions de rénovation sur le confort thermique peuvent être très différentes en fonction de la localisation géographique considérée que cela soit du point de vue hivernale ou estivale. Trois villes ont été ainsi sélectionnées pour leur appartenance à trois zones climatiques différentes du territoire métropolitain : Trappes (zone climatique H1), La Rochelle (zone climatique H2) et Nice (zone climatique H3). Les fichiers météorologiques de ces trois villes ont été ainsi choisis pour représenter les sollicitations climatiques extérieures en température et humidité relative de l'air et en rayonnement solaire.

### 3.2 Pollution extérieure

Les effets des actions de rénovation sur la QAI seront également dépendants de la pollution extérieure environnante. Les polluants considérés pour cette étude sont les PM2,5, le dioxyde d'azote (NO2) et le benzène. Trois niveaux de pollution extérieure ont été sélectionnés pour représenter le site urbain, périurbain et rural. Les fichiers de pollution listés dans le Tableau 27 ont permis de reconstruire des fichiers complets (sans données manquantes) de pollution pouvant être utilisés comme données d'entrée de la simulation de la QAI. La Figure 8 présente les niveaux de pollution extérieure en benzène, NO2 et PM2,5 pour les trois sites.

Tableau 27 : Liste des fichiers de pollution extérieure (source : AASQA correspondantes).

Nom de fichier	Milieu Démographique	Polluant
NO2 Background rural Fontainebleau.31-12-2012	Rural	NO2
NO2 Background urban Angers-Beaux arts.31-12-2012	Urbain	NO2
NO2 Background suburban Mantes_la_Jolie.31-12-2012	Banlieue	NO2
BZ Background suburban Lens-StadeJ.Moulin	Banlieue	Benzène
BZ Background urban Montpellier	Urbain	Benzène
BZ Traffic urban Clermont-ferrand_Esplanade gare.31-12-2012	Traffic élevé	Benzène
PM2.5 Background rural Les Mazures.31-12-2012	Rural	PM2,5
PM2.5 Background suburban Dunkerque-Malo_les_bains.31-12-2012	Banlieue	PM2,5
PM2.5 Background urban Poitiers-Place du marché.31-12-2012	Urbain	PM2,5

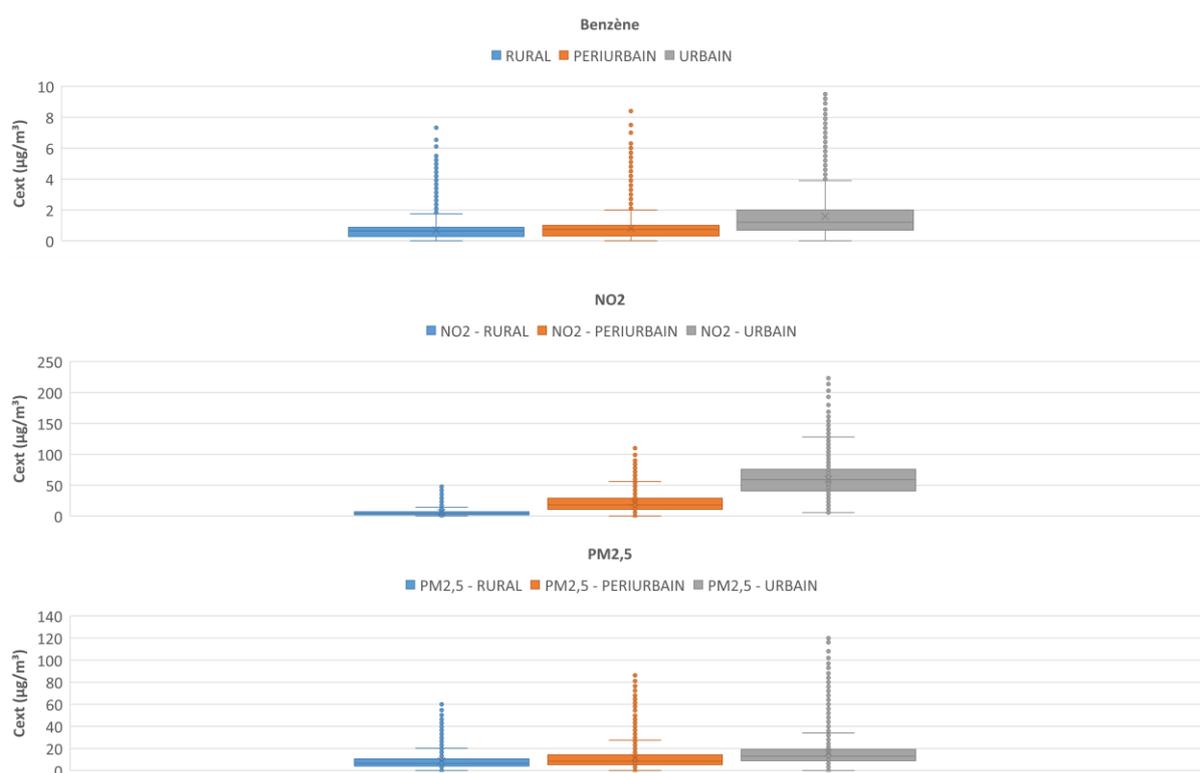


Figure 8 : Niveaux de pollution extérieure en benzène, NO2 et PM2,5 pour le site urbain, périurbain et rural.

## 4 Opérations de rénovation retenues pour les simulations

On souhaite, via les modèles d'habitations choisis, réaliser des rénovations et en mesurer l'impact sur le confort thermique et la qualité de l'air intérieur. Il convient donc de fixer un modèle de rénovations accomplies standardisées. En se basant sur des études statistiques (enquête TREMI, 2017), on sait que les bouquets de rénovations les plus effectués sont dans l'ordre : remplacement des ouvrants, isolation des parois (combles perdus, bâti) et remplacement/installation d'un système de chauffage ou de ventilation.

On n'envisagera pas ici, la rénovation du plancher bas, rénovation lourde et peu courante en opération seule. On n'étudiera pas non plus le changement du mode de chauffage, n'apportant pas de plus-value en termes d'indices de confort/QAI, bien que le changement d'émetteurs plus performants associés à une régulation électronique a une influence non négligeable. En fait, la modélisation effectuée dans les deux outils de simulation en OD/1D ne permet pas la circulation d'air intra-zone (chaque zone est supposée homogène en température et pression, le positionnement dans la pièce du capteur de température de l'émetteur est donc sans effet), et on suppose une régulation PID supposée parfaite (seul le dimensionnement des émetteurs permet de satisfaire ou non les besoins de chauffage). De plus, la modélisation ne distingue pas la proportion convective/radiative de l'émetteur. La puissance de chauffage des émetteurs est inchangée avant et après rénovation.

7 bouquets de rénovation sont envisagés (Figure 9) :

1. Changement des ouvrants seul : double vitrage peu émissif + amélioration étanchéité enveloppe,
2. Isolation des parois verticales seule : ITE + amélioration étanchéité enveloppe,
3. Isolation des combles perdus seule : modification toiture,
4. Changement décoration et finition : émission des polluants (COV) par des peintures récentes (étiquettes A+/A) à la place des anciennes peintures continuant à émettre,
5. Installation (ou remplacement) d'une ventilation mécanique,
6. Bouquet de rénovation 1+2+3+4,
7. Bouquet de rénovation 1+2+3+4+5.



Figure 9 : Représentation graphique des 7 cas de rénovation de l'étude numérique.

Les sous-sections suivantes précisent les caractéristiques principales des actions de rénovations étudiées.

#### 4.1 Remplacement des fenêtres ou ouvrants

Les ouvrants d'origine sont remplacés par des ouvrants à double vitrage peu émissif ( $U_{\text{vitrage}} = 1,5 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ , facteur solaire = 58%). Ceci induit également une modification de la perméabilité de l'enveloppe de la maison. La valeur cible de la RT rénovation a été considérée ici soit  $Q_4 = 1,3 \text{ (m}^3/\text{h)/m}^2$ .

#### 4.2 Isolation thermique des parois et combles

L'isolation thermique par l'extérieur est considérée ici pour obtenir un coefficient global de déperditions thermique  $U = 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ . L'isolation des combles perdus permet l'obtention d'un coefficient global  $U = 0,12 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ .

#### 4.3 Installation ou changement du système de ventilation

L'action de rénovation concernant le système de ventilation consiste à installer une ventilation mécanique simple flux hygroréglable B. La description complète de ce système de ventilation est présentée dans l'Annexe A.

#### 4.4 Rénovation de la décoration intérieure

Cette action vise à réduire les émissions en COV des matériaux de construction. Elle est représentative d'un remplacement des anciens matériaux toujours émissifs et/ou la réfection des peintures à l'aide de produits peu émissifs actuels (étiquetage A+/A) permettant de limiter l'émission des matériaux traités. Les données d'émission sont présentées dans le chapitre 2.2.1.3.

## 5 Consolidation des données de simulation

Afin de vérifier la cohérence des cas définis précédemment en termes de données d'entrées et d'objectifs de comparaison des effets des actions de rénovation sur le confort thermique et la QAI, nous avons procédé à un exercice de benchmarking sur le cas 3 (maison individuelle la plus récente). Deux équipes utilisant deux environnements de simulation différents ont simulé le problème à traiter depuis l'état initial du cas 3 jusqu'à l'ensemble des actions de rénovation. Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord succinctement les deux environnements de simulation, rappelons le périmètre de cet exercice d'inter-comparaison, puis présentons les résultats obtenus concernant les évolutions des variables thermiques (température d'air, humidité relative), aéraulique (taux de renouvellement d'air) et de QAI (concentrations en polluants).

### 5.1 Environnements de simulation

Les environnements de simulation doivent permettre le calcul de l'évolution des différentes variables du problème concernant l'évaluation du confort thermique et de la QAI. L'Annexe B présente une synthèse des réflexions qui ont permis de définir l'ensemble des variables nécessaires au calcul des indices de confort thermique et de QAI. Dans cet objectif, les outils de simulation doivent ainsi pouvoir résoudre, de manière multizone c'est-à-dire pour l'ensemble des pièces des maisons étudiées, les problèmes hygrothermiques, aérauliques et de QAI.

#### 5.1.1 BuildSysPro QAI

BuildSysPro QAI est la bibliothèque de modèles Thermo-Hygro-Aéraulique et de Qualité d'Air Intérieur d'EDF R&D (Tourreilles C., 2015 ; Picard CF., 2019). Elle a été développée sous l'environnement Dymola (propriété de Dassault System - intégrant des solveurs numériques) et est écrite en langage Modelica (standard libre). Elle est dédiée à la modélisation de la QAI des bâtiments et elle permet de modéliser l'évolution des concentrations de plusieurs polluants : les polluants gazeux, particulaires et des micro-organismes. Compatible avec BuildSysPro (Plessis et al., 2014 ; Schumann et al., 2016), modélothèque d'EDF R&D dédiée à la modélisation thermique des bâtiments, des quartiers et des systèmes énergétiques, elle permet une modélisation couplée et simultanée de la performance énergétique des bâtiments et de la QAI. BuildSysPro et BuildSysPro QAI sont la propriété d'EDF.

#### 5.1.2 TRNSYS-CONTAM

L'environnement de simulation repose sur un couplage entre les logiciels CONTAM (Dols *et al.*, 2015) et TRNSYS (Klein et al., 2017).

CONTAM est un logiciel de simulation multizone aéraulique permettant l'analyse de la ventilation et de la QAI dans les bâtiments. Développé par le National Institute of Standard Technology (NIST), il est, depuis sa création, en continuel développement et accessible librement pour ses utilisateurs. De manière générale, CONTAM repose sur des modèles mathématiques capables de prédire les débits d'air entre chacune des zones (extérieur compris) ; débits qui dépendent des différences de pression induites par l'effet du vent (surpression et dépression sur l'enveloppe du bâtiment), de la différence de température (tirage thermique) et du système de ventilation mécanique. Sa capacité à évaluer les débits d'air et les pressions relatives entre les zones du bâtiment en fait un outil de simulation pour évaluer l'adéquation des débits de ventilation d'un bâtiment, pour déterminer la variation des débits de ventilation dans le temps (ventilation naturelle en particulier), pour déterminer la distribution de l'air de ventilation dans un bâtiment, pour estimer l'impact des efforts d'étanchéité de l'enveloppe sur les débits d'infiltration et pour évaluer les impacts énergétiques des flux d'air du bâtiment. La prédiction des concentrations de polluants peut servir à déterminer le niveau de QAI des bâtiments avant leur construction et leur occupation, à étudier les répercussions de diverses décisions de

conception liées aux systèmes de ventilation et au choix des matériaux de construction, à évaluer les technologies de contrôle de la QAI et à estimer la QAI des bâtiments existants.

TRNSYS est un environnement de simulation complet et extensible créé pour les simulations dynamiques de systèmes, dont la simulation thermique dynamique multizone pour les bâtiments. Il est utilisé par des ingénieurs et des chercheurs pour valider des concepts énergétiques innovants. Ce logiciel permet d'intégrer toutes les caractéristiques d'un bâtiment (structures, matériaux, équipements techniques, le fonctionnement...) ainsi que les paramètres climatiques. Il est ainsi possible de modéliser complètement un logement incluant ses équipements et le comportement de ses habitants.

Le NIST a développé le composant « Type 98 » pour son couplage avec le logiciel de Simulation Thermique du Bâtiment TRNSYS. Ce composant requiert une procédure de couplage en plusieurs étapes mais qui rend possible la communication de n'importe quel paramètre d'un logiciel à l'autre. C'est la solution que nous avons choisie pour nos simulations car elle permet en particulier de transmettre des valeurs de contrôles entre les logiciels, on peut ainsi piloter finement la simulation. Par exemple, l'implémentation d'une ventilation hygroréglable réaliste devient possible en modélisant l'humidité relative des pièces sous le logiciel TRNSYS et en la communiquant via un contrôle gérant l'ouverture ou la fermeture des bouches (d'extraction ou d'entrée d'air) hygroréglables sous CONTAM.

La Figure 10 présente l'échange de données au sein de l'environnement de simulation. Le composant « Type 56 » du logiciel TRNSYS calcule la température et l'humidité relative de l'air intérieur à partir de la connaissance des caractéristiques thermiques du bâtiment, des charges et des débits de ventilation et d'infiltration. Le Type 98 évalue quant à lui les débits d'air entre les zones intérieures et l'extérieur à partir des sollicitations extérieures et de la connaissance des températures et humidités relatives intérieures à partir du logiciel CONTAM. Le couplage hygrothermique et aéraulique s'effectue par un procédé itératif entre les deux modèles pour chaque pas de temps jusqu'à convergence.

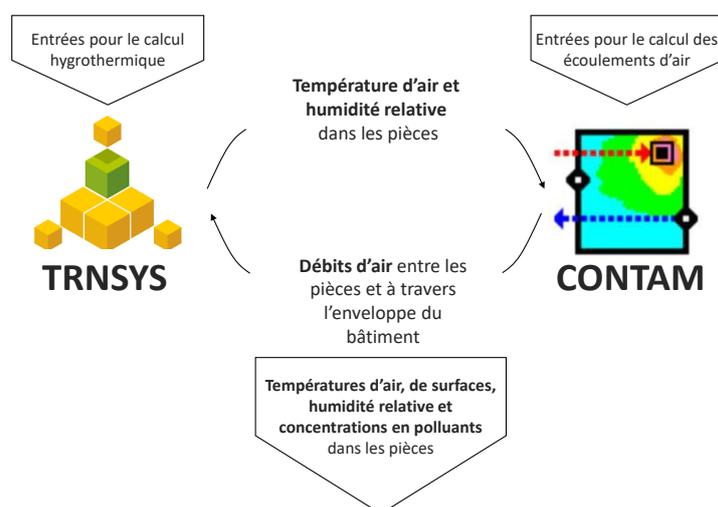


Figure 10 : Couplage TRNSYS – CONTAM et échanges de données.

## 5.2 Cas simulés

Afin d'étudier et quantifier l'impact d'opération de rénovations sur le confort et la santé des occupants, plusieurs configurations ont été considérées et simulées. Les paramètres testés sont décrits et justifiés dans la première partie de ce rapport. Il s'agit :

- De l'âge de construction des bâtiments : avant 1948, entre 1949 et 1974 et après 1975,
- De la localisation géographique : zone climatique H1, H2 et H3,
- Du niveau de pollution de l'environnement extérieur : urbain, rural et péri-urbain,
- Du type de rénovation énergétique envisagée :
  - o Etat Initial,
  - o #1 Remplacement des ouvrants,
  - o #2 Isolation des parois verticales,
  - o #3 Isolation des combles perdues,
  - o #4 Décoration – Finitions,
  - o #5 Ventilation,
  - o Bouquet : #1 + #2 + #3 + #4,
  - o Bouquet : #1 + #2 + #3 + #4 + #5.

Toutes ces configurations ont été simulées avec BuildSysPro QAI ou avec TRNSYS-CONTAM sur une année complète ou sur 4 périodes : 1 au 15 janvier, du 21 mai au 4 juin, du 1 au 15 Août et du 6 au 30 Septembre.

Tous les résultats de ces simulations ont été analysés et utilisés pour le calcul d'indice de confort et de QAI. Ces travaux sont décrits dans le livrable 3.5. Afin de s'assurer que les résultats des simulations effectuées sous BuildSysPro QAI et sous TRNSYS-CONTAM étaient similaires, un long travail d'inter-comparaison des résultats a été réalisé. Pour cela, il a été choisi de retenir le cas d'un bâtiment construit après 1974 (cas 3), situé en zone H1 (trappes) et dans environnement urbain plutôt pollué. Il a également été choisi de comparer les cas simulés initiaux c'est-à-dire avant rénovation et les cas de rénovation #3 Isolation des combles perdues, #4 Décoration – Finitions et #5 Installation d'une ventilation hygroréglable. Les résultats des simulations sur année complète ont été utilisés pour l'inter-comparaison.

### 5.3 Comparaison des variables thermiques et aérauliques

Cette section présente la comparaison des résultats relatifs aux variables thermiques et aérauliques d'intérêt ici c'est-à-dire la température de l'air ( $T_{air}$ ) et le taux de renouvellement d'air (TRA) pour les deux pièces qui seront utilisées par la suite pour l'évaluation du confort thermique et de l'exposition aux polluants pendant le jour et la nuit à savoir le séjour (de la Figure 11 à la Figure 22) et la chambre (de la Figure 23 à la Figure 34).

Pour le cas avant rénovation, les variations de température dans le séjour (Figure 11) et la chambre 3 (Figure 23) obtenus avec BuildSysPro (EDF) et TRNSYS-CONTAM (LaSIE) sont très satisfaisantes. En période de chauffage, les températures sont proches des températures de consignes du chauffage à savoir 20°C dans le séjour et 16°C dans la chambre 3. Pendant la période hors chauffage, les variations de température d'air sont également très proches avec toutefois des pics (2 à 3 °C) plus élevés pour BuildSysPro dans le séjour et des pics plus élevés pour TRNSYS-CONTAM dans le séjour. Pour les taux de renouvellement d'air, des différences existent mais les résultats sont également très satisfaisants. Dans le séjour (Figures 8 et 9), le TRA moyen est légèrement plus élevé pour BuildSysPro (0,2 /h) que pour TRNSYS-CONTAM (0,3 /h) alors que dans la chambre 3 (Figure 24 et Figure 25), ils sont identiques. Pour le logement pris dans la globalité, les TRA moyens sont identiques.

Pour le cas après rénovation #3 qui correspond au cas où une isolation des combles a été réalisé, les résultats ont aussi très satisfaisants. Les températures dans le séjour (Figure 14) sont très proches entre les deux outils. Pour la chambre (Figure 26), les températures prédites par TRNSYS-CONTAM sont légèrement plus élevées. Ces différences sont probablement dues à des différences dans les modèles de rayonnement solaires. Pour les taux de renouvellement d'air, comme pour le cas avant réno, des valeurs sont un peu plus élevées dans le séjour (Figure 15 et Figure 16) pour BuildSysPro mais elles sont identiques dans la chambre 3 (Figure 27 et Figure 28).

Pour le cas après rénovation #4, les commentaires sont exactement les mêmes que ceux pour les cas précédents. L'opération de rénovation considérée étant liée à la décoration, aucun impact thermique et aéraulique n'est attendu.

Pour le cas après rénovation #5, le système de ventilation autoréglable a été remplacé par un système de ventilation hygroréglable B. La modélisation effectuée dans les deux outils du système de ventilation hygroréglable donne des résultats très proches. les taux de renouvellement d'air dans le séjour (Figure 21 et Figure 22) sont identiques et légèrement plus élevés pour TRNSYS-CONTAM dans la chambre 3 (Figure 33 et Figure 34). Les températures prédites dans le séjour (Figure 20) sont identiques alors que les températures calculées de la chambre 3 hors période de chauffage sont plus élevées pour BuildSysPro. Ces différences sont probablement dues à des différences liées aux modèles de rayonnement solaire.

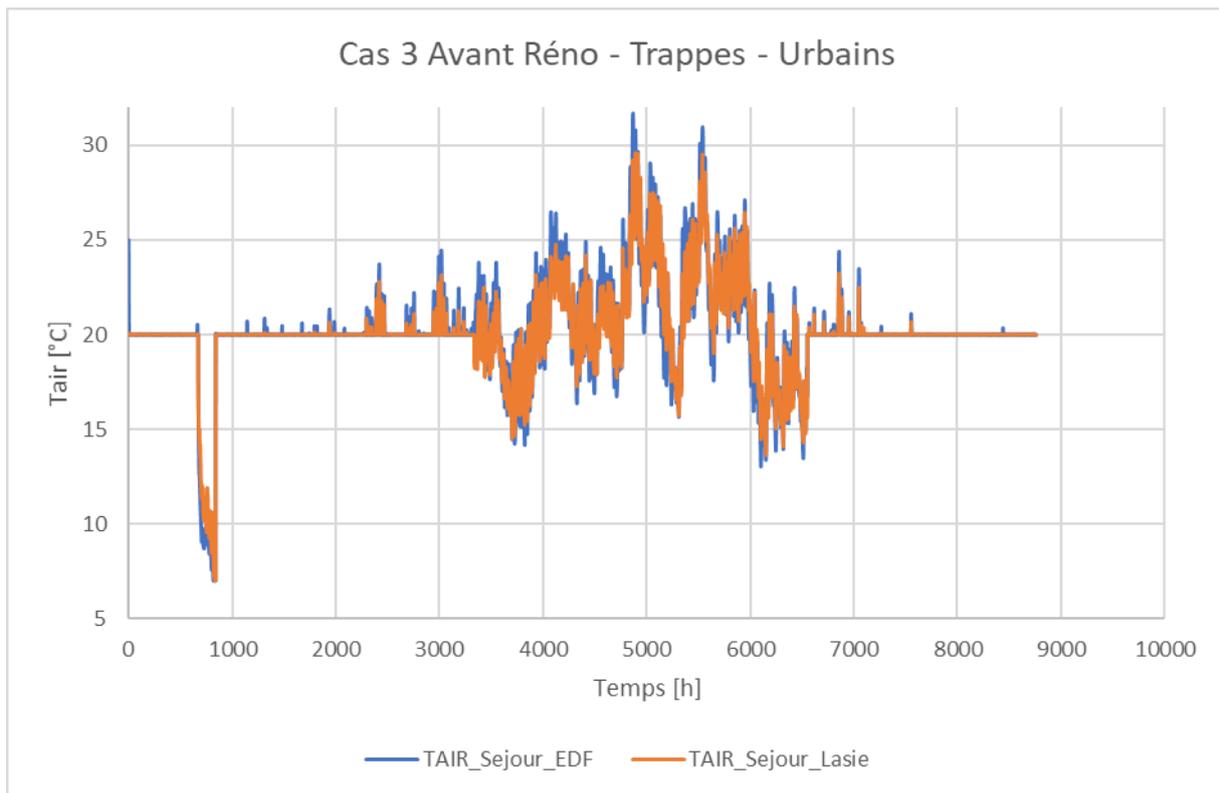


Figure 11 : Tair dans le séjour - Cas 3 avant Réno.

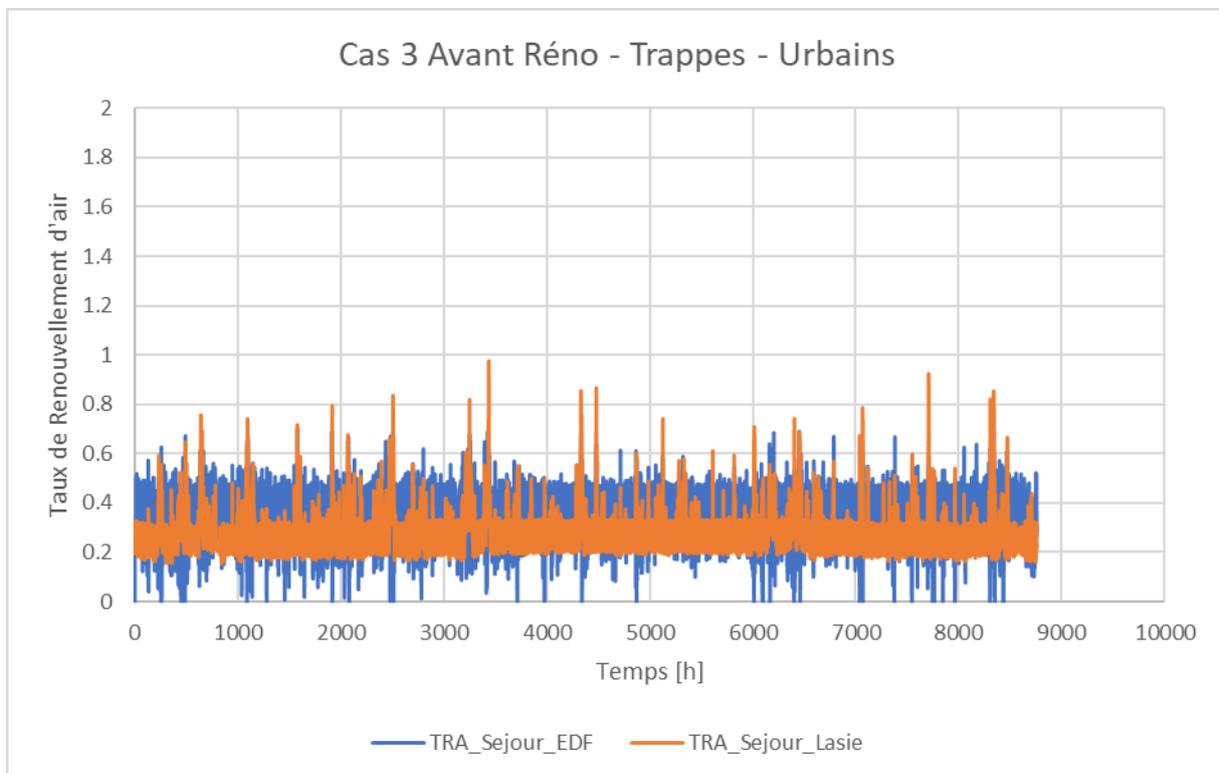


Figure 12 : Taux de Renouvellement d'Air (TRA) dans le séjour - Cas 3 avant Reno.

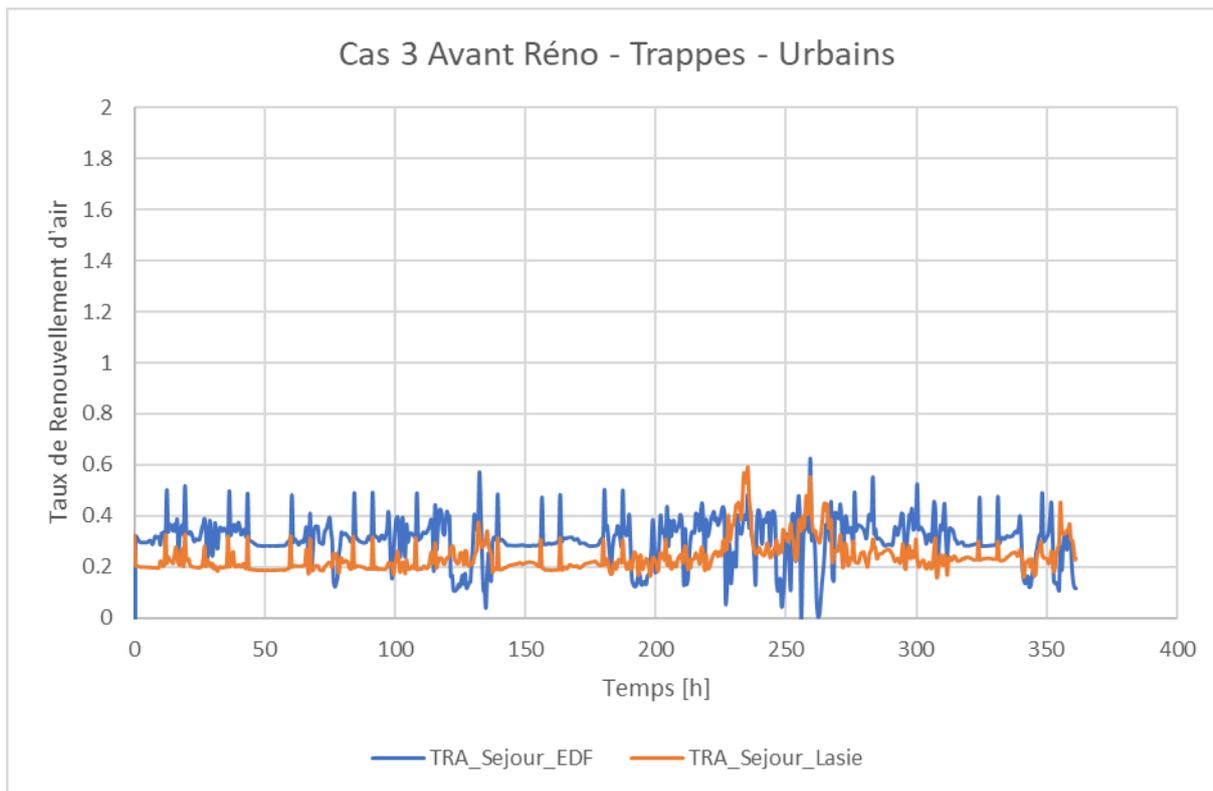


Figure 13 : Taux de Renouvellement d’Air (TRA) dans le séjour - Cas 3 avant Réno du 1 au 15 Janvier.

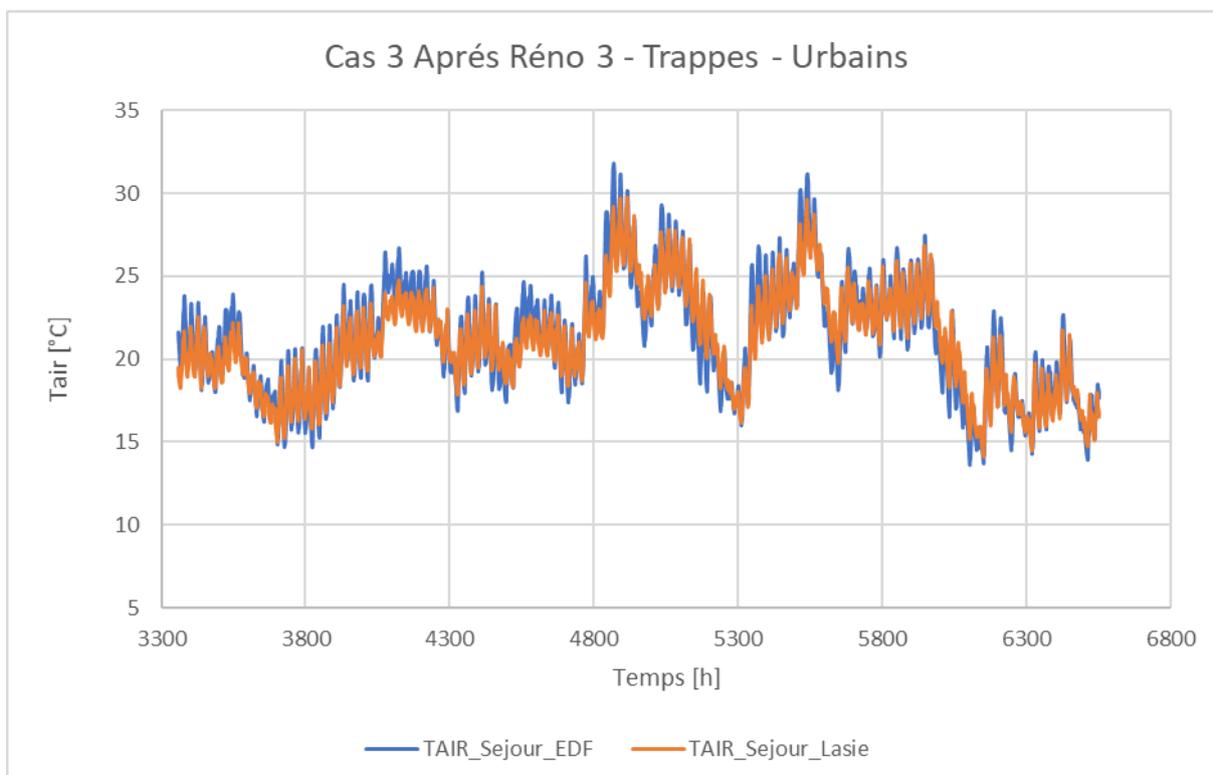


Figure 14 : Tair dans le séjour - Cas 3 après Réno #3 du 20 mai au 30 Septembre.

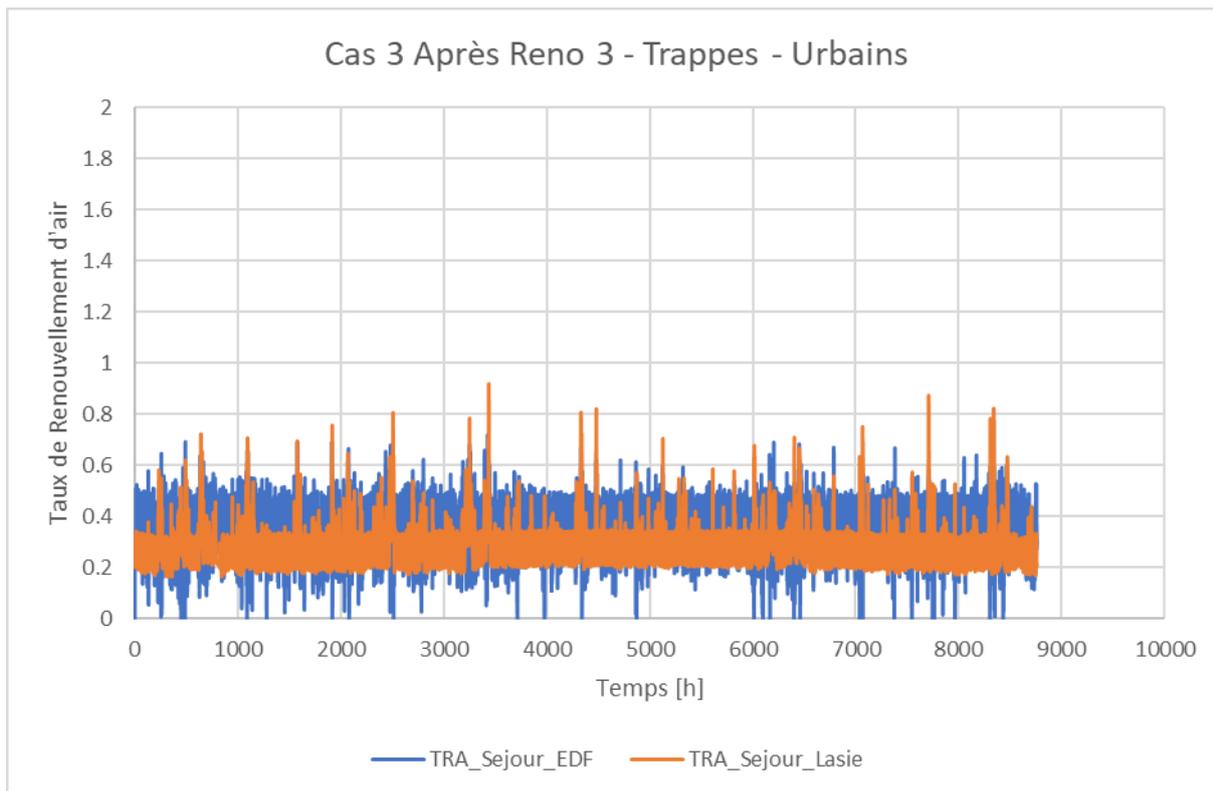


Figure 15 : Taux de Renouvellement d'Air (TRA) dans le séjour - Cas 3 après Réno #3.

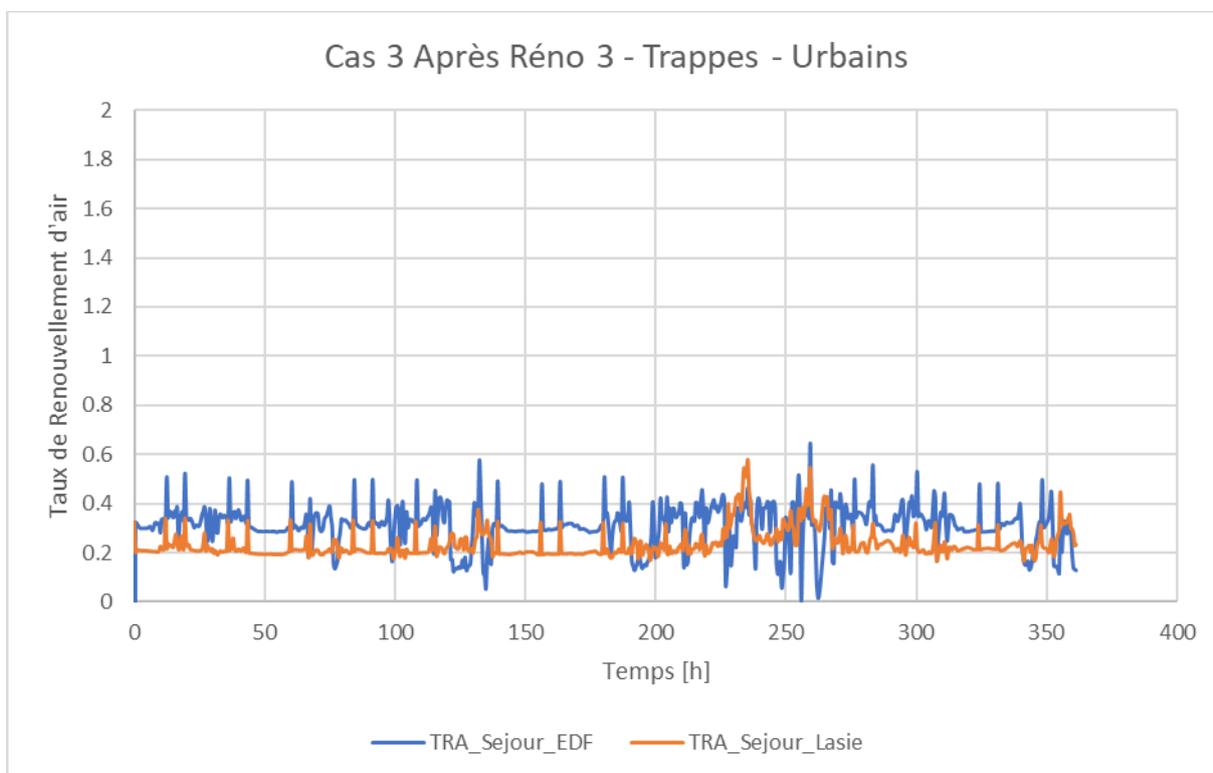


Figure 16 : Taux de Renouvellement d'Air (TRA) dans le séjour - Cas 3 après Réno #3 du 1 au 15 Janvier.

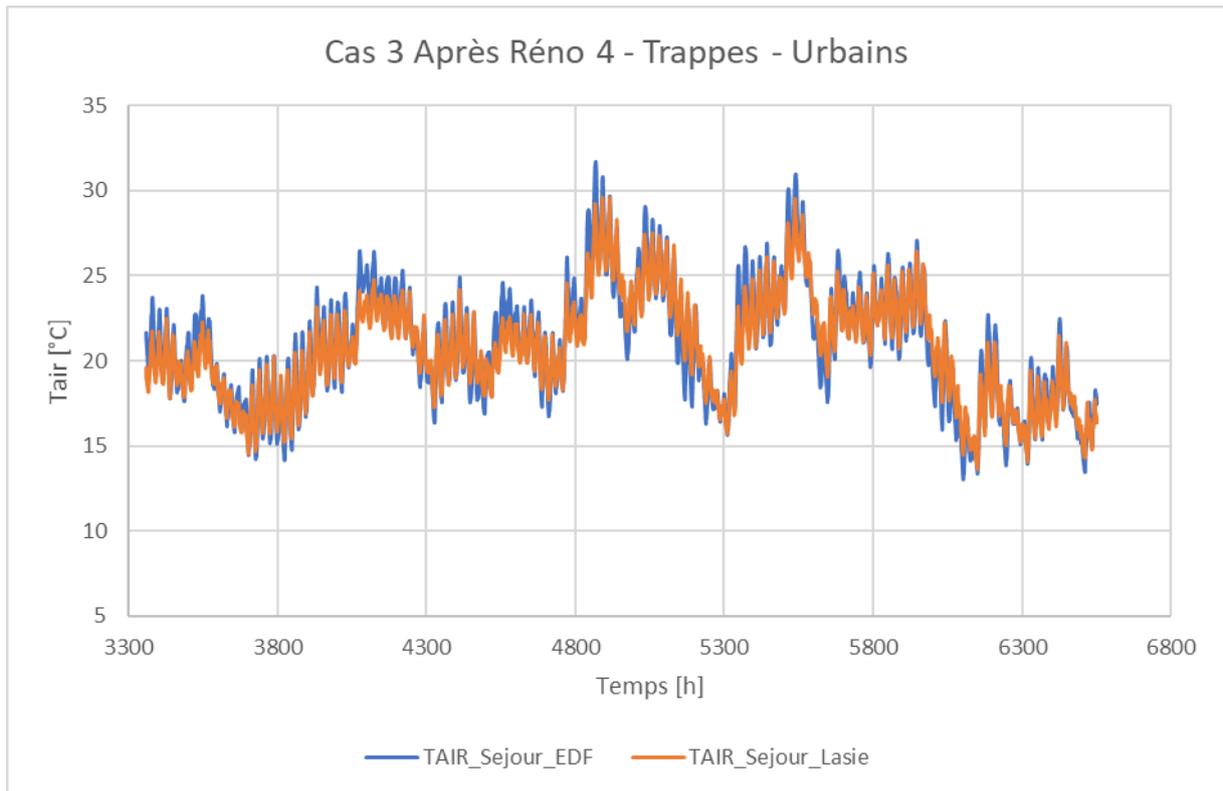


Figure 17 : Tair dans le séjour - Cas 3 après Réno #4 du 20 mai au 30 Septembre.

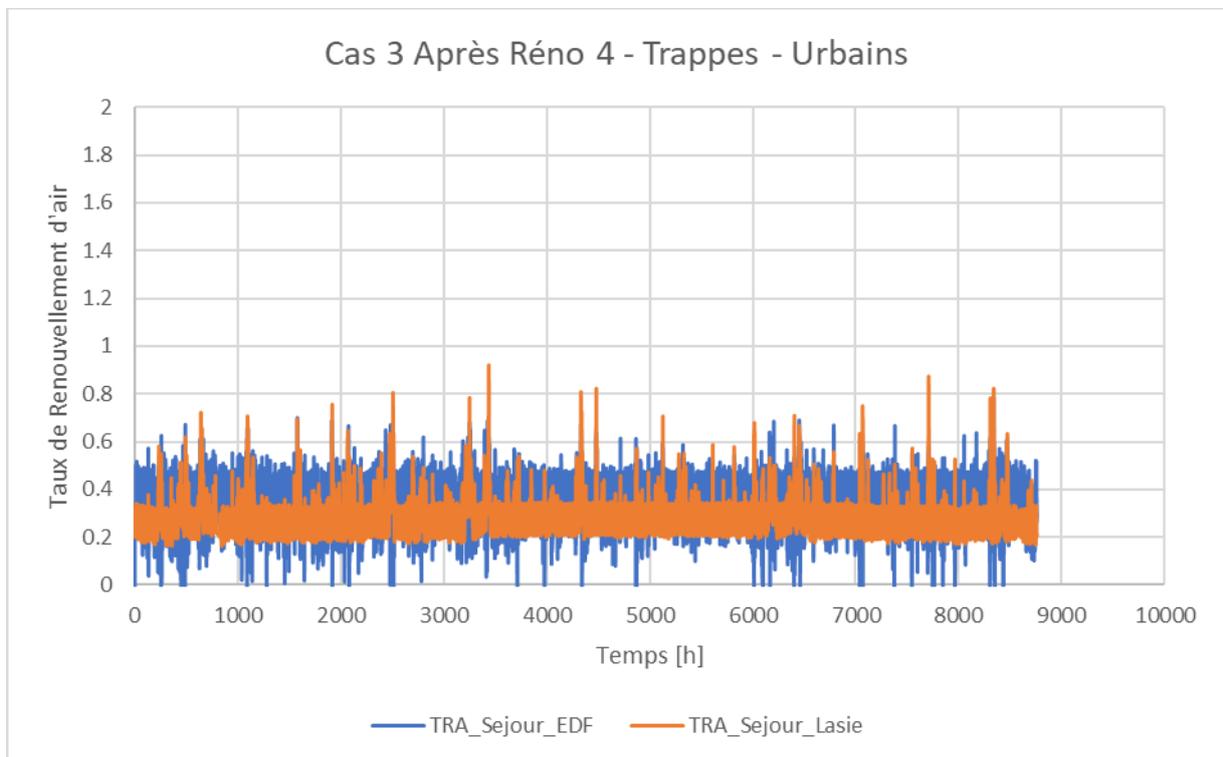


Figure 18 : Taux de Renouvellement d’Air (TRA) dans le séjour - Cas 3 après Réno #4.

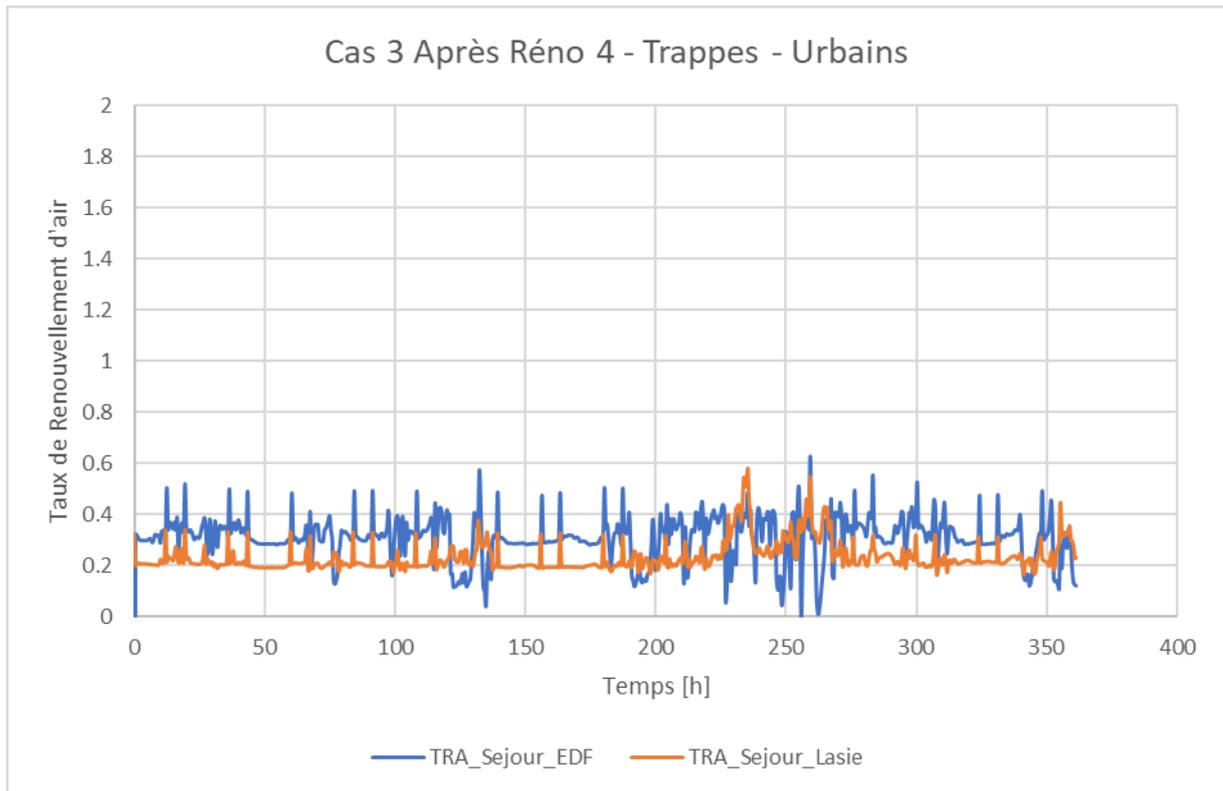


Figure 19 : Taux de Renouvellement d'Air (TRA) dans le séjour - Cas 3 après Réno #4 du 1 au 15 Janvier.

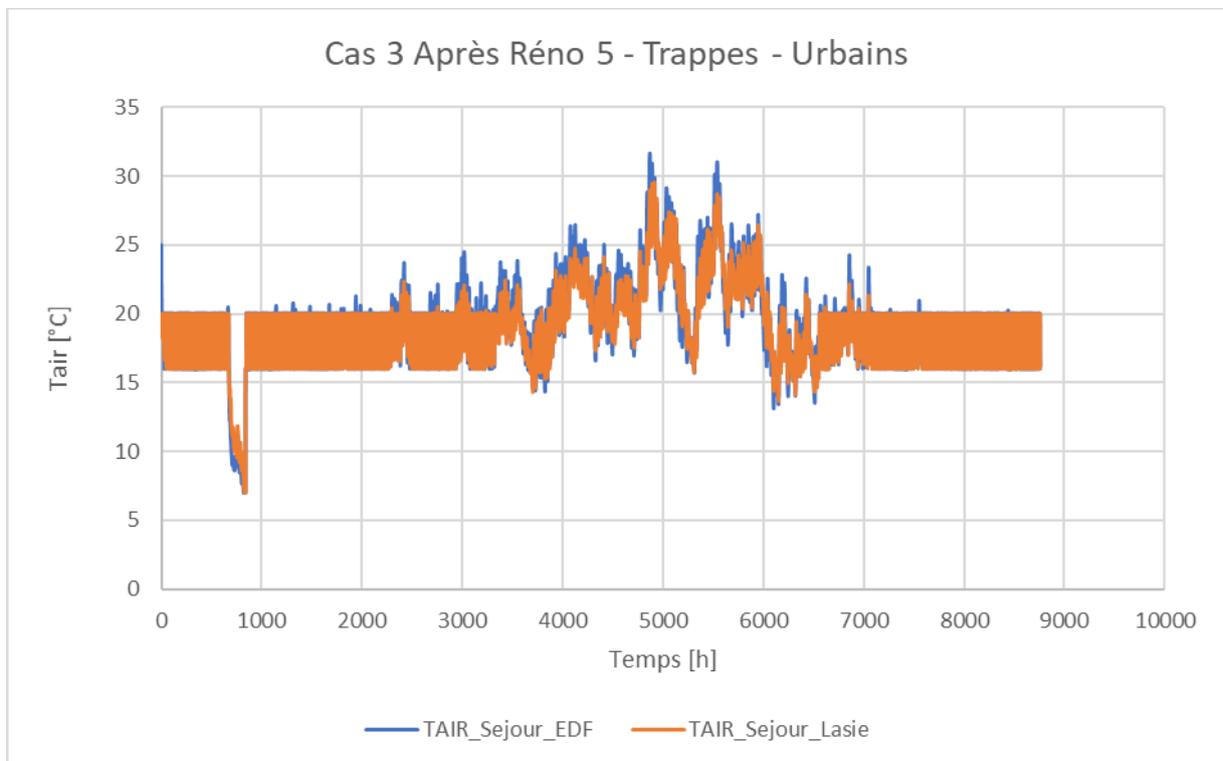


Figure 20 : Tair dans le séjour - Cas 3 après Réno #5.

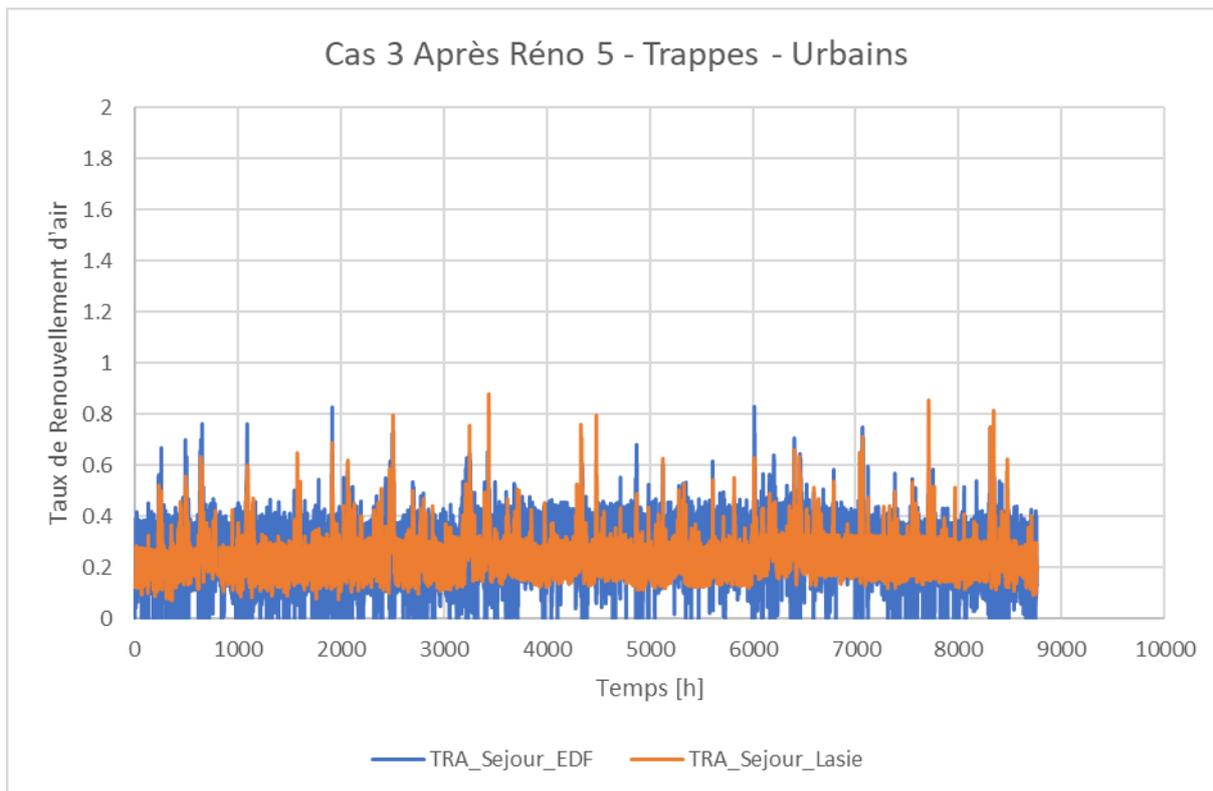


Figure 21 : Taux de Renouvellement d'Air (TRA) dans le séjour - Cas 3 après Réno #5.

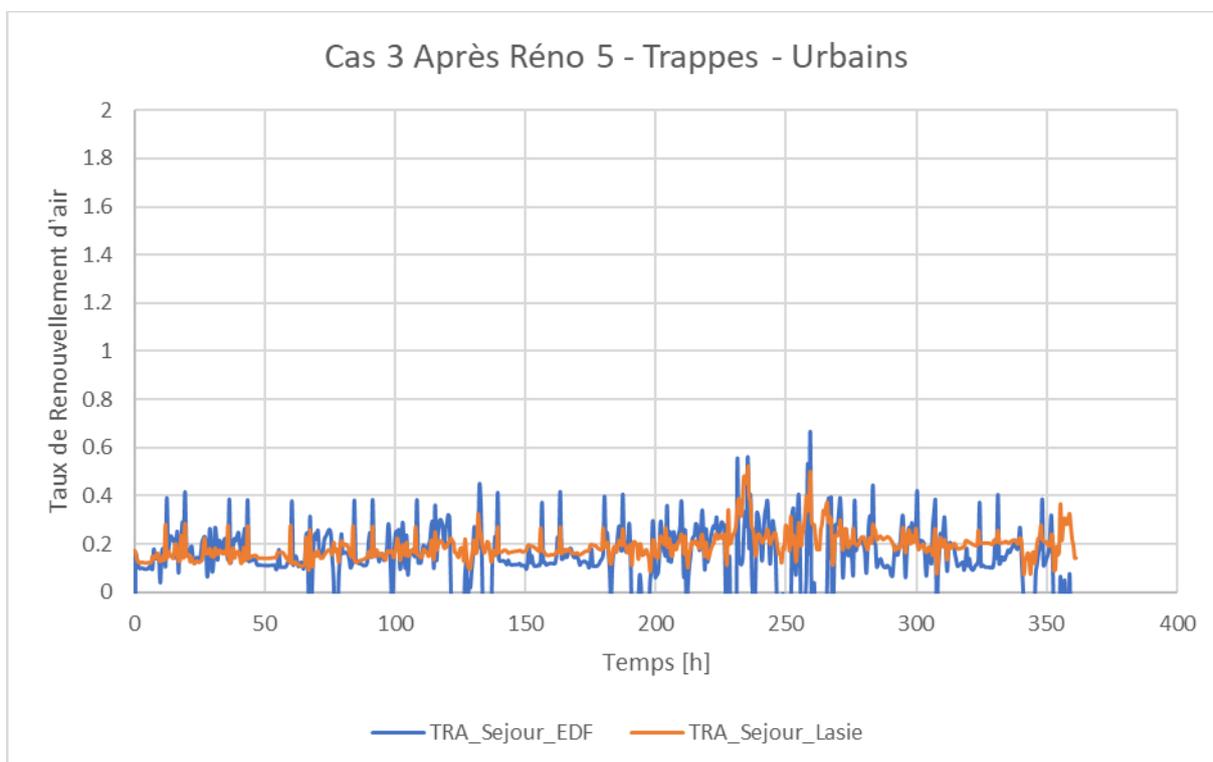


Figure 22 : Taux de Renouvellement d'Air (TRA) dans le séjour - Cas 3 après Réno #5 du 1 au 15 Janvier.

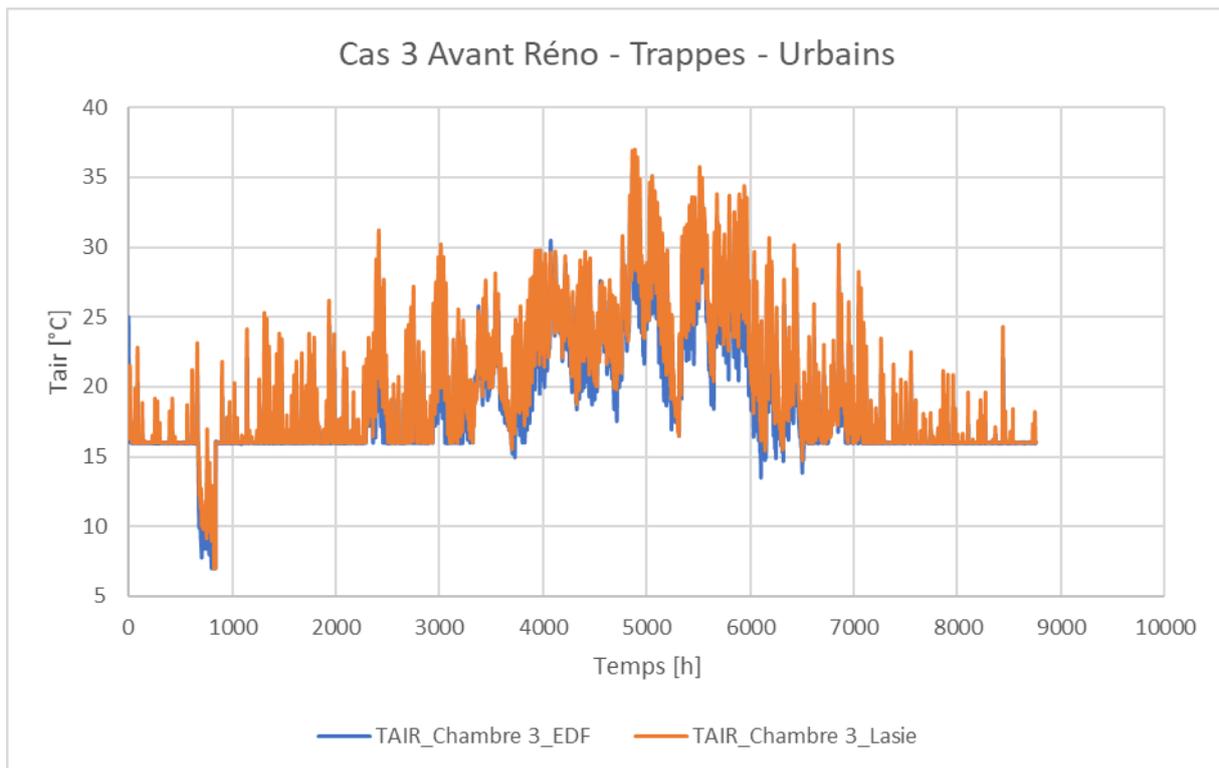


Figure 23 : Tair dans la Chambre 3 - Cas 3 avant Réno.

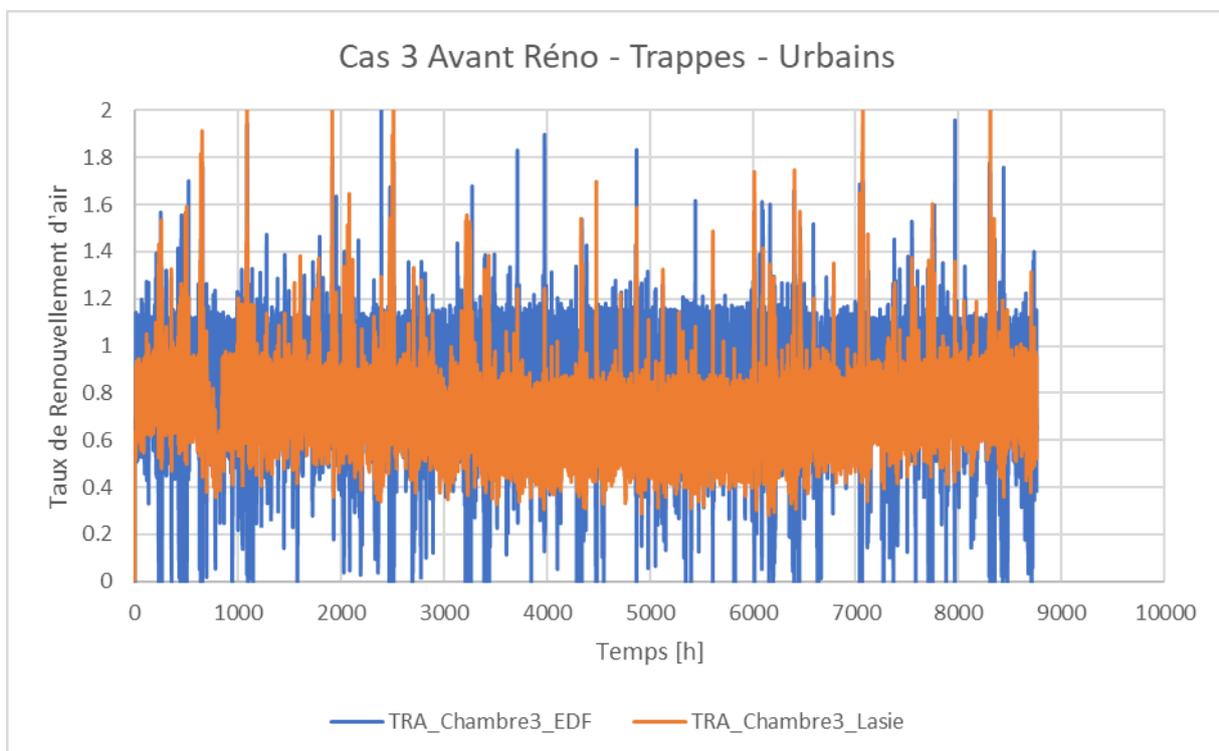


Figure 24 : Taux de Renouvellement d'Air (TRA) dans la Chambre 3 - Cas 3 avant Réno.

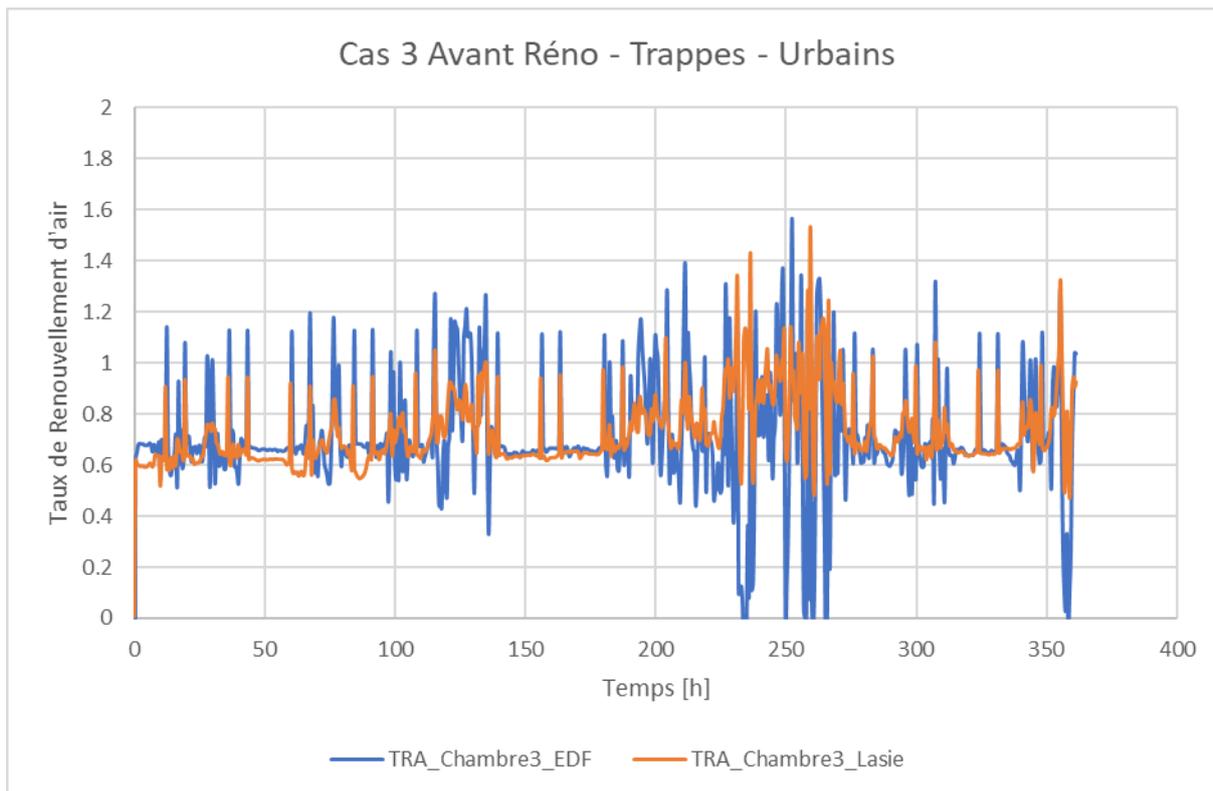


Figure 25 : Taux de Renouvellement d'Air (TRA) dans la Chambre 3 - Cas 3 avant Réno du 1 au 15 Janvier.

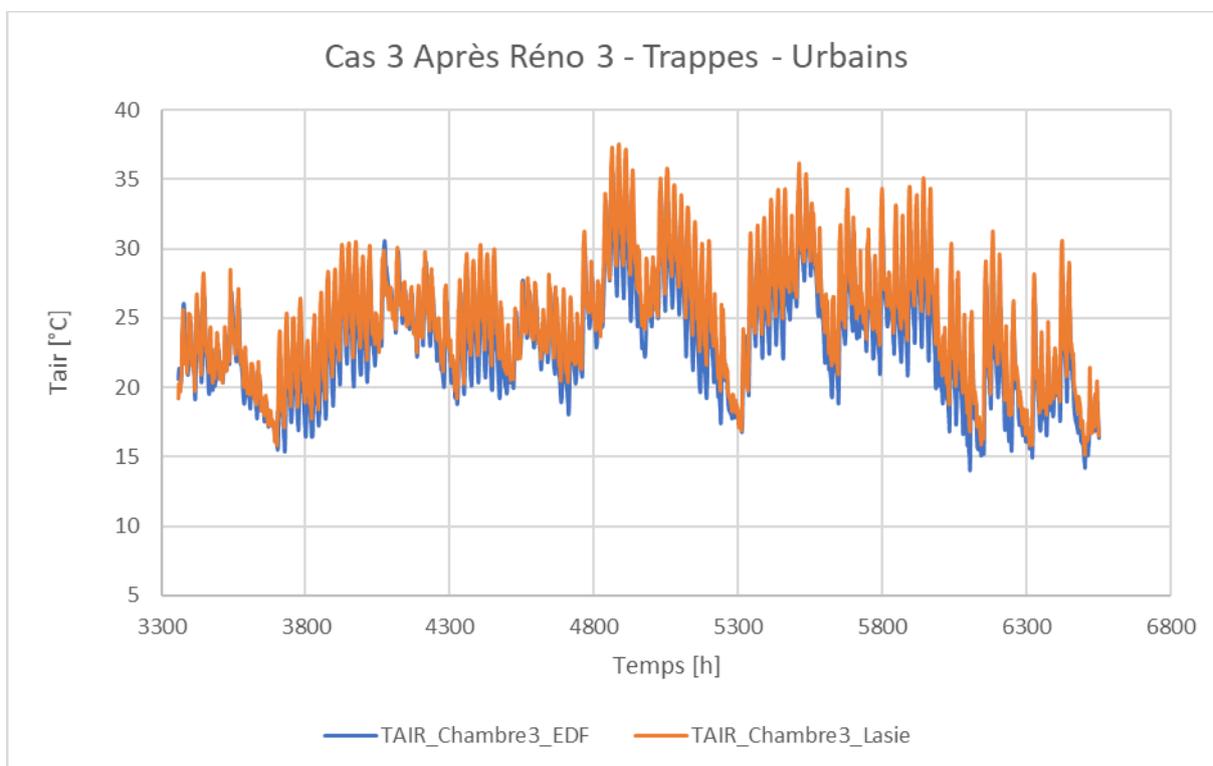


Figure 26 : Tair dans la Chambre 3 - Cas 3 après Réno #3 du 20 mai au 30 Septembre.

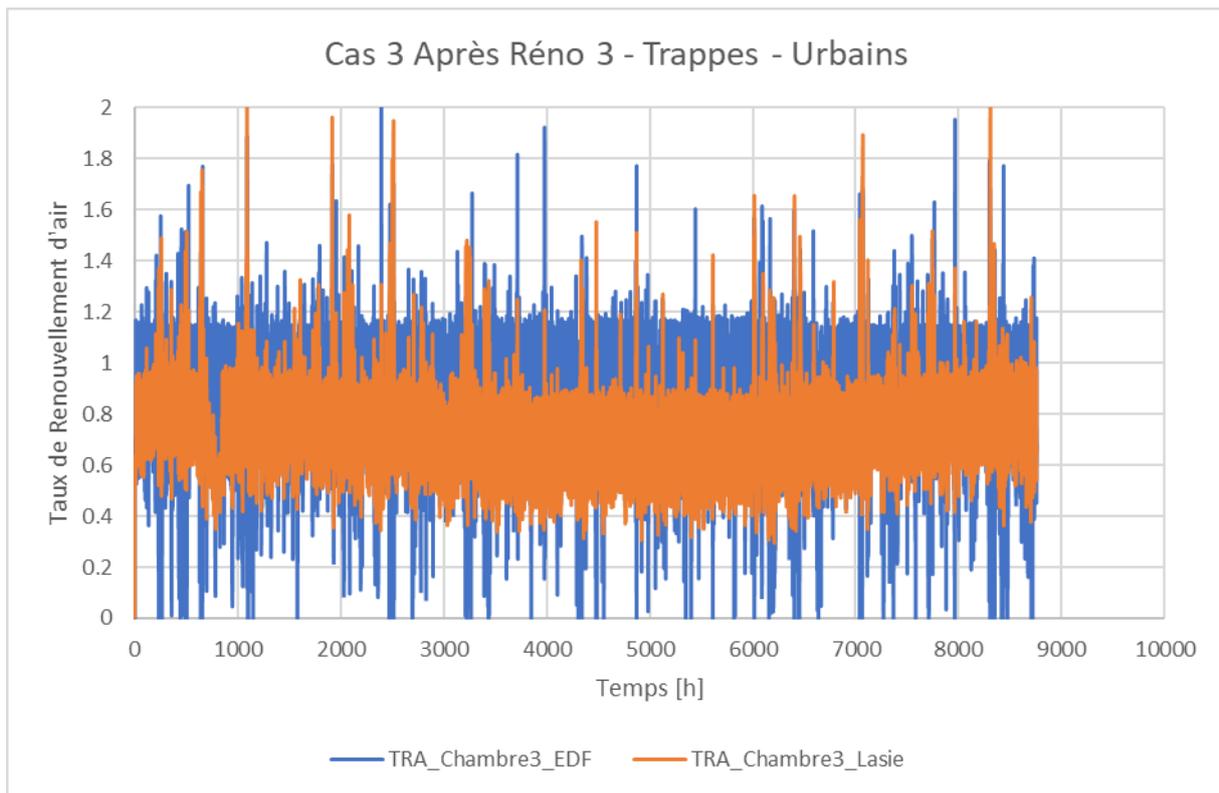


Figure 27 : Taux de Renouvellement d'Air (TRA) dans la Chambre 3 - Cas 3 après Réno #3.

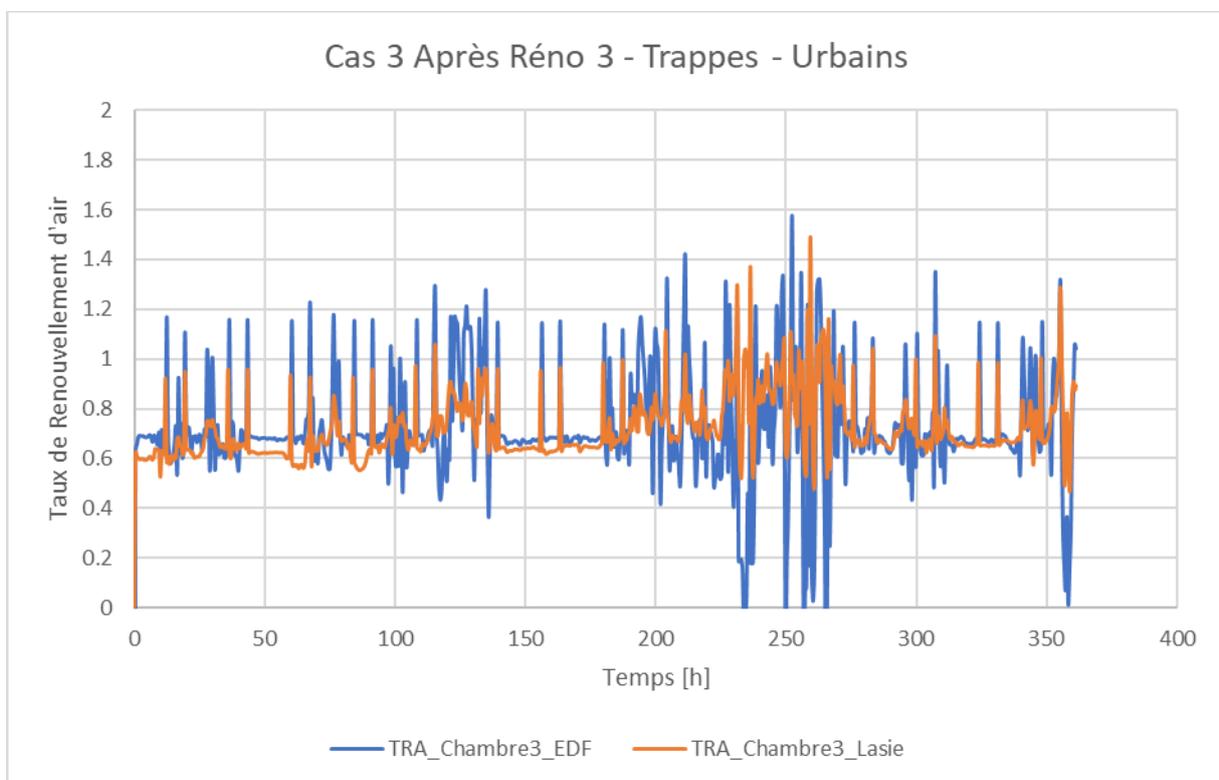


Figure 28 : Taux de Renouvellement d'Air (TRA) dans la Chambre 3 - Cas 3 après Réno #3 du 1 au 15 Janvier.

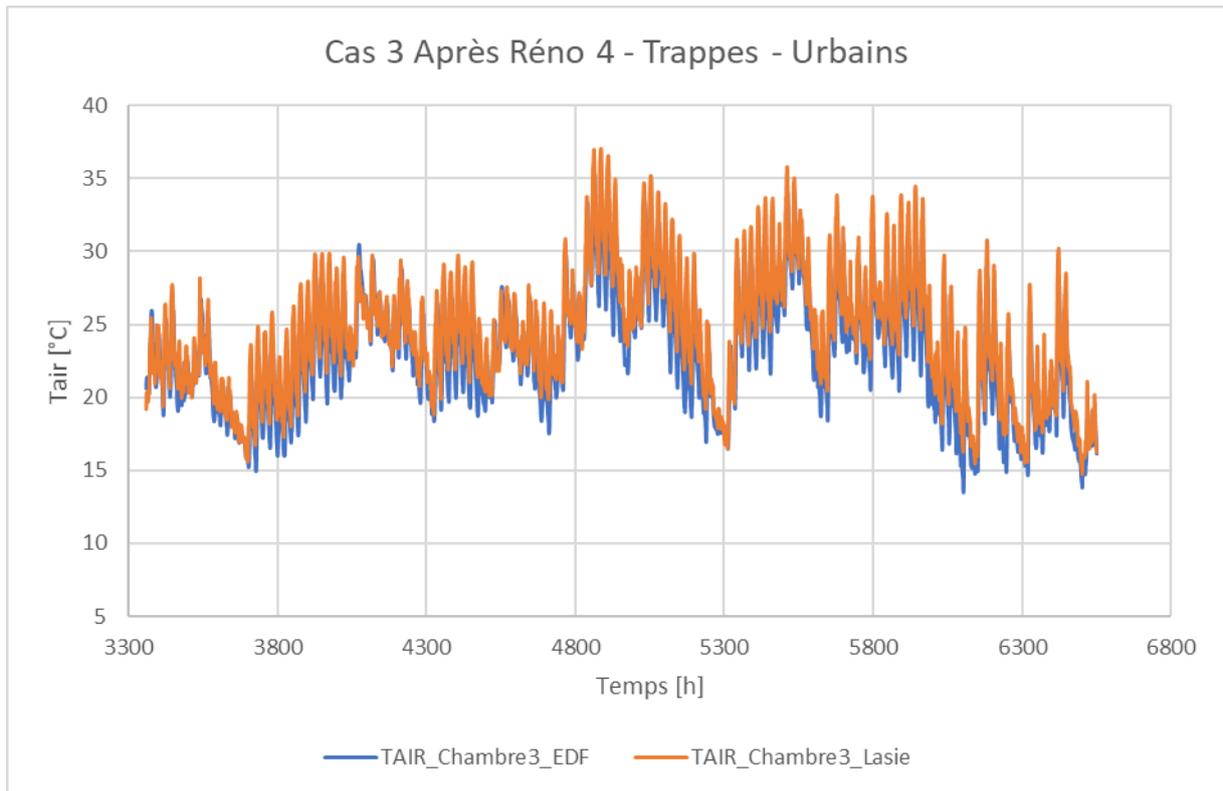


Figure 29 : Tair dans la Chambre 3 - Cas 3 après Réno #4 du 20 mai au 30 Septembre.

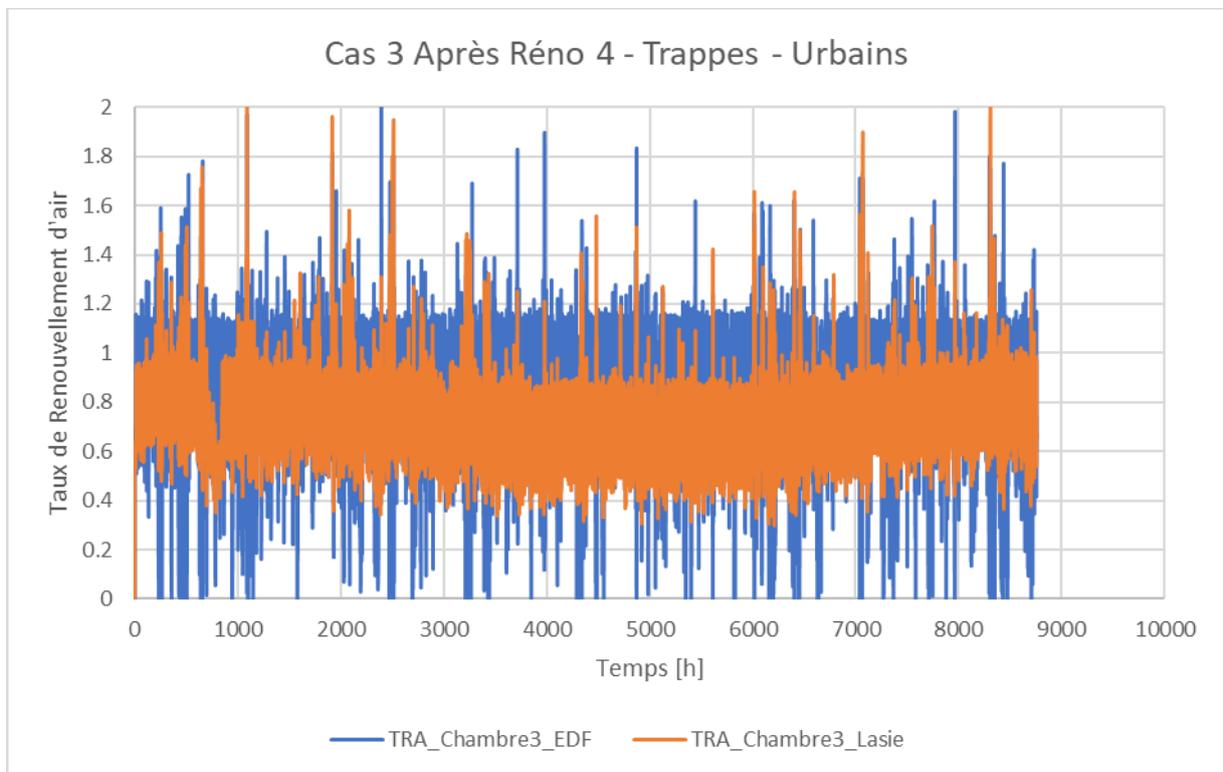


Figure 30 : Taux de Renouvellement d'Air (TRA) dans la Chambre 3 - Cas 3 après Réno #4.

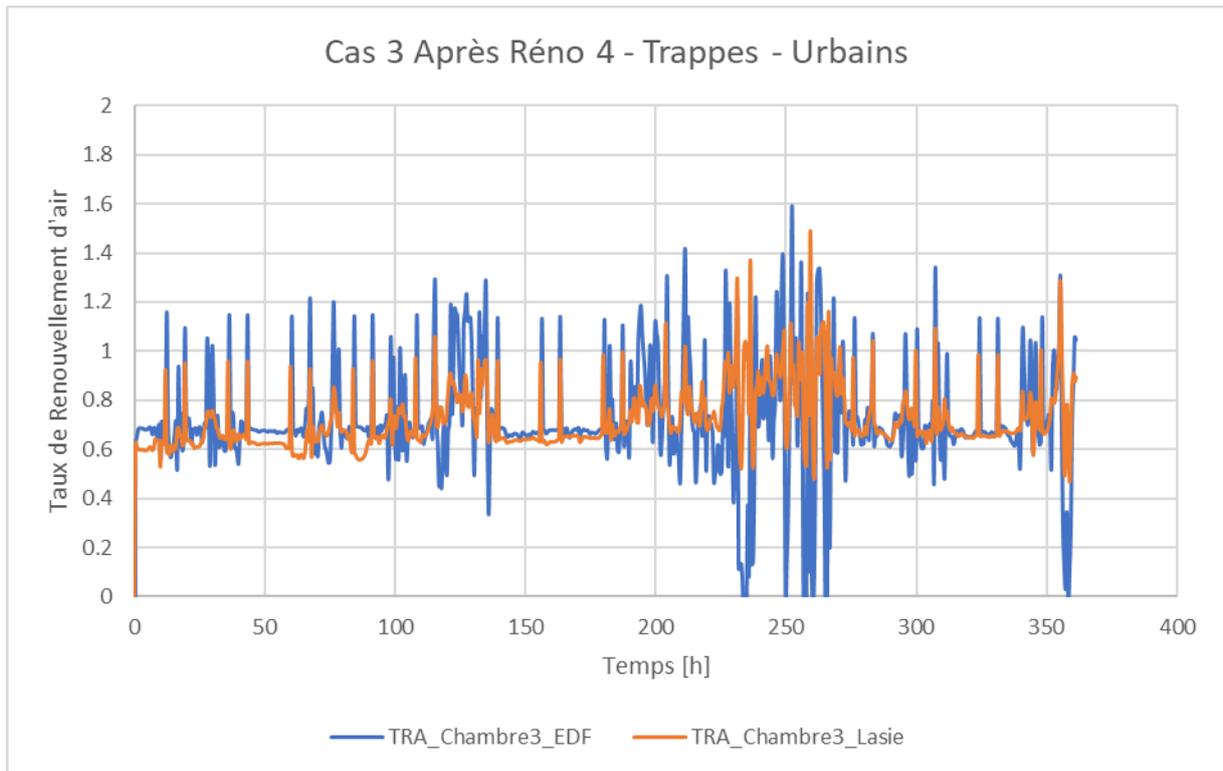


Figure 31 : Taux de Renouvellement d'Air (TRA) dans la Chambre 3 - Cas 3 après Réno #4 du 1 au 15 Janvier.

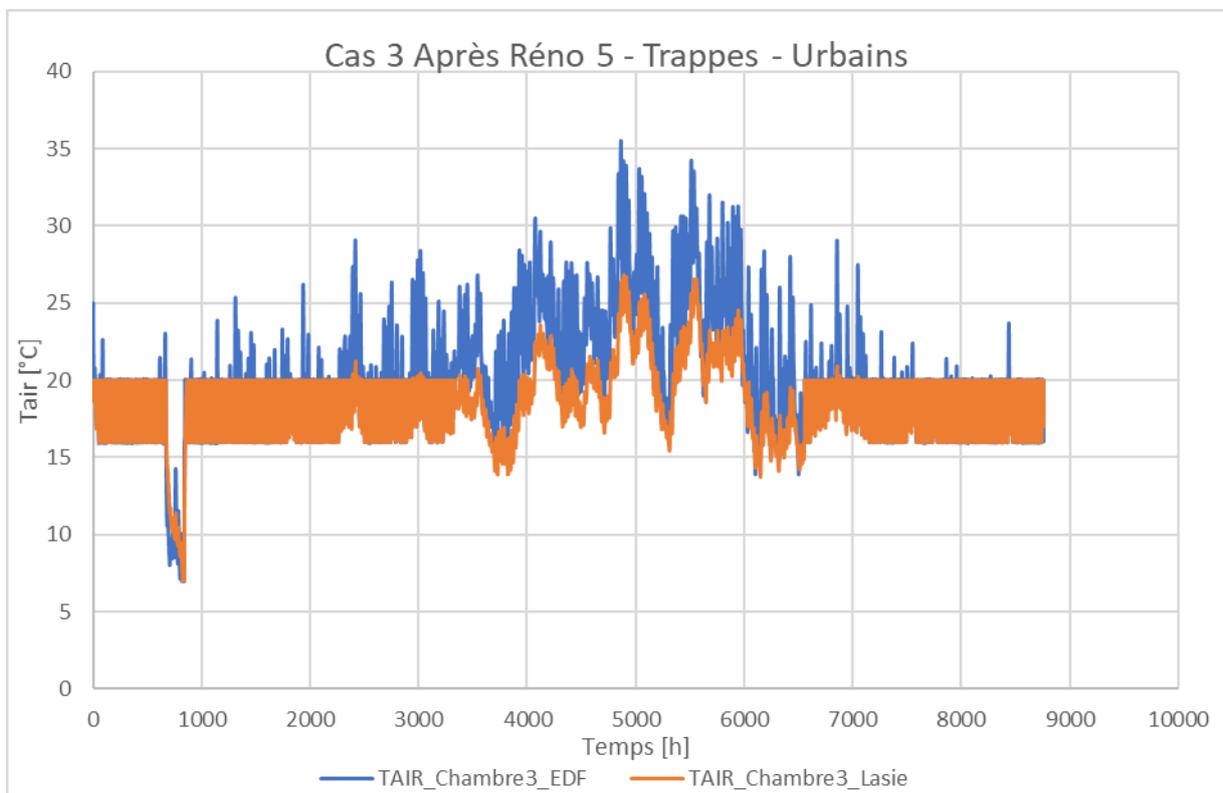


Figure 32 : Tair dans la Chambre 3 - Cas 3 après Réno #5.

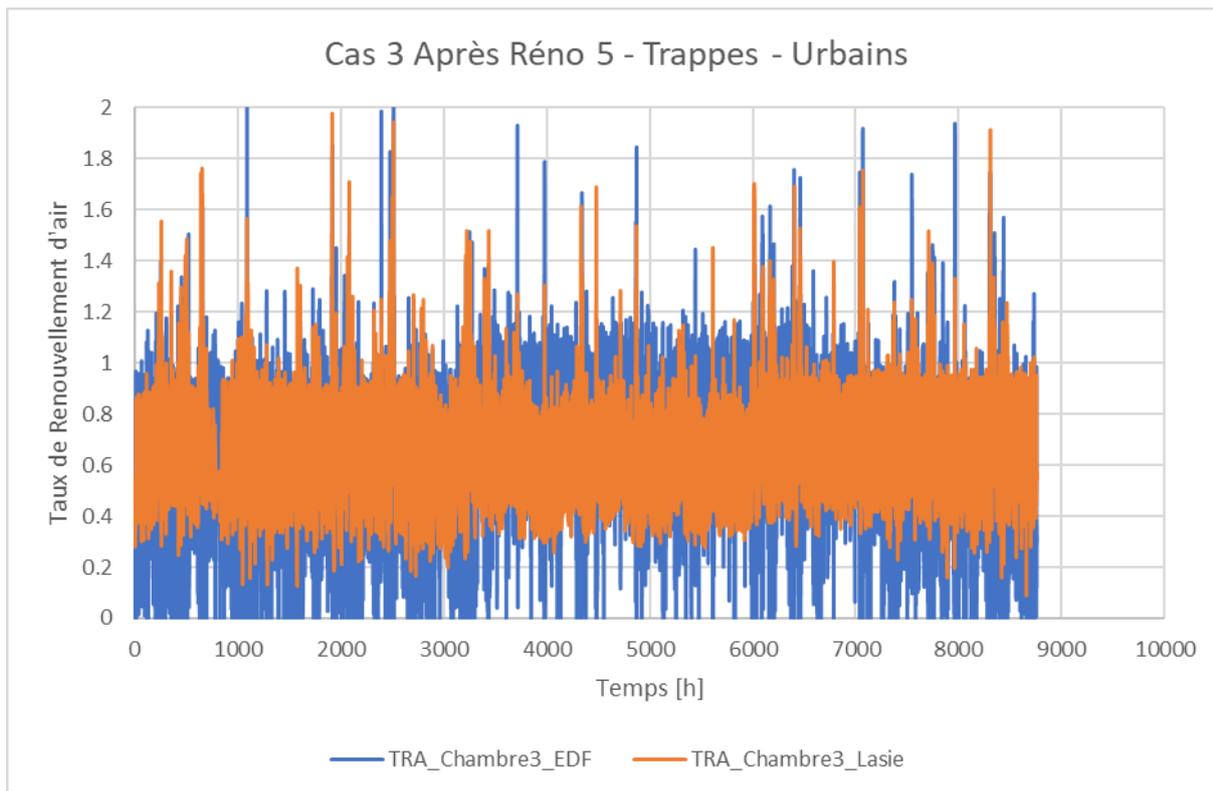


Figure 33 : Taux de Renouvellement d'Air (TRA) dans la Chambre 3 - Cas 3 après Réno #5.

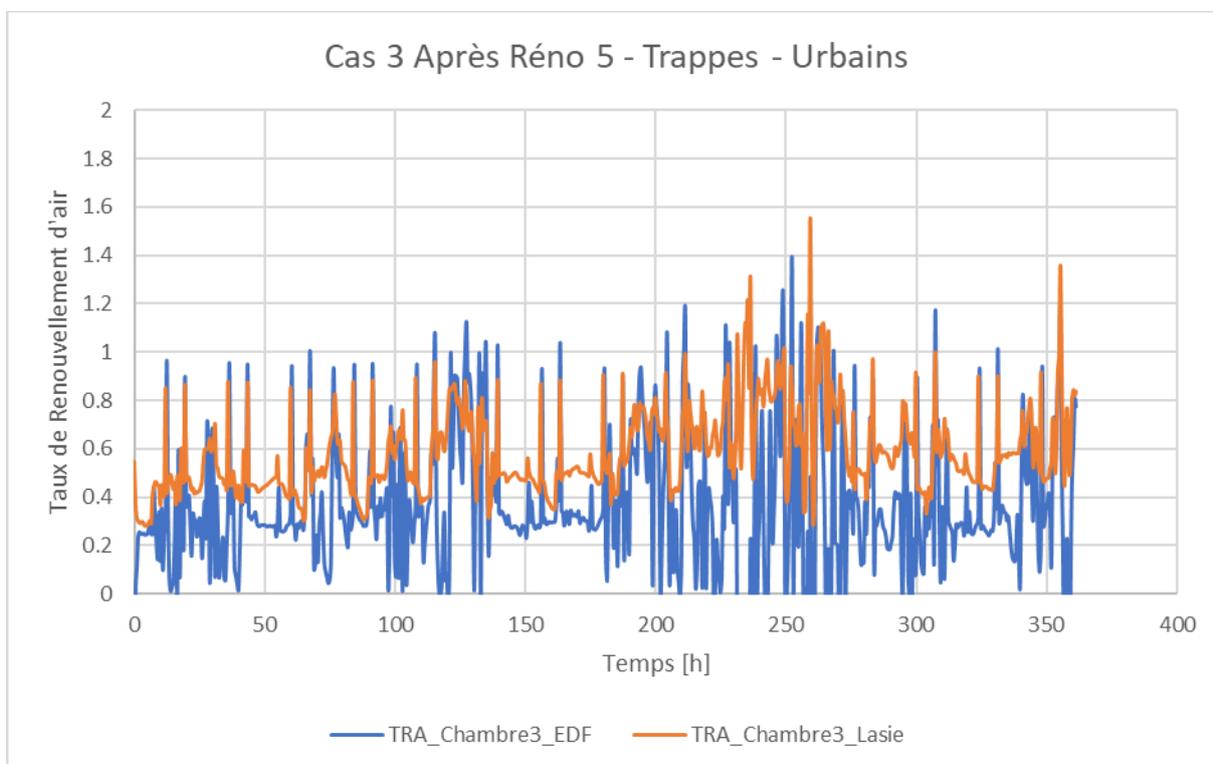


Figure 34 : Taux de Renouvellement d'Air (TRA) dans la Chambre 3 - Cas 3 après Réno #5 du 1 au 15 Janvier.

#### 5.4 Comparaison des variables de Qualité de l'Air Intérieur

Cette section présente la comparaison des résultats relatifs aux variables de qualité de l'air intérieur d'intérêt ici c'est-à-dire les concentrations en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>), en particules (PM<sub>2,5</sub>), en formaldéhyde et en benzène toujours pour le séjour (Figure 35 à Figure 58) et la chambre (Figure 59 à Figure 78).

Pour le cas avant rénovation, quelques différences peuvent être observées sur les concentrations de polluants prédits par BuildSysPro et TRNSYS-CONTAM dans le séjour notamment pour le Formaldéhyde (Figure 39) et le Benzène (Figure 40). Les valeurs des concentrations prédites par TRNSYS-CONTAM sont légèrement supérieures à celles de BuildSysPro en raison du TRA dans le séjour plus élevé pour BuildSysPro. Pour la chambre 3, les TRA étant quasi identiques, les concentrations de Formaldéhyde (Figure 62), Benzène (Figure 63) et NO<sub>2</sub> (Figure 60) sont quasi identiques. Les concentrations des PM<sub>2,5</sub> calculées par les deux outils sont similaires dans le séjour et dans la chambre 3 (Figure 38) et (Figure 61).

Pour le cas après rénovation #3, les mêmes observations peuvent être faites que pour le cas avant rénovation dans la mesure où l'isolation des combles perdus n'a pas d'influence sur les taux de renouvellement d'air et donc sur les concentrations de polluants. Il en est de même pour le cas après rénovation #4, les hypothèses liées aux émissions de polluants prises pour les calculs étant les mêmes avant et après rénovation par les deux outils, les mêmes conclusions peuvent être faites que pour le cas avant rénovation.

Pour le cas après rénovation #5 qui consiste à remplacer le système de ventilation hygroréglable du cas avant rénovation par un système de ventilation hygroréglable des différences sont à noter probablement dues au modèle d'humidité différent dans les deux outils et donc aux taux de renouvellement d'air différents. Comme on peut le voir sur les Figure 53, Figure 54 et Figure 74, les concentrations en CO<sub>2</sub> calculées par BuildSysPro sont plus élevées et cette différence est plus importante en période chauffage. Les taux de renouvellement d'air pour la période estivale prédit par BuildSysPro sont plus élevés que ceux prédits par TRNSYS-CONTAM. Les concentrations de NO<sub>2</sub> sont légèrement supérieures avec BuildSysPro (Figure 55) et (Figure 75). Pour le Formaldéhyde (Figure 57) et (Figure 77) les différences résident dans les taux de renouvellement d'air. Pour le benzène (Figure 58) et (Figure 78), seules des différences sont observées pendant la période hors chauffage. Les concentrations des PM<sub>2,5</sub> calculées par les deux outils sont identiques (Figure 56) et (Figure 76).

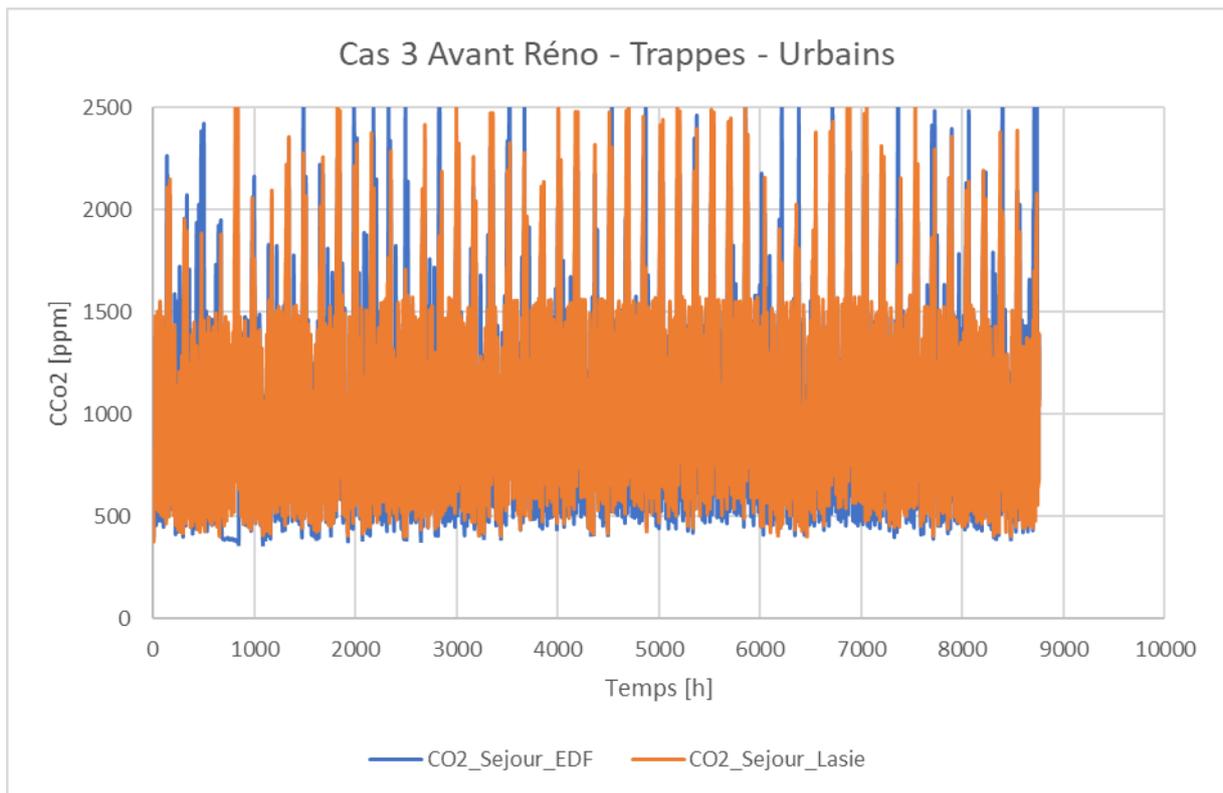


Figure 35 : Concentration de CO2 dans le séjour – Cas 3 avant Réno.

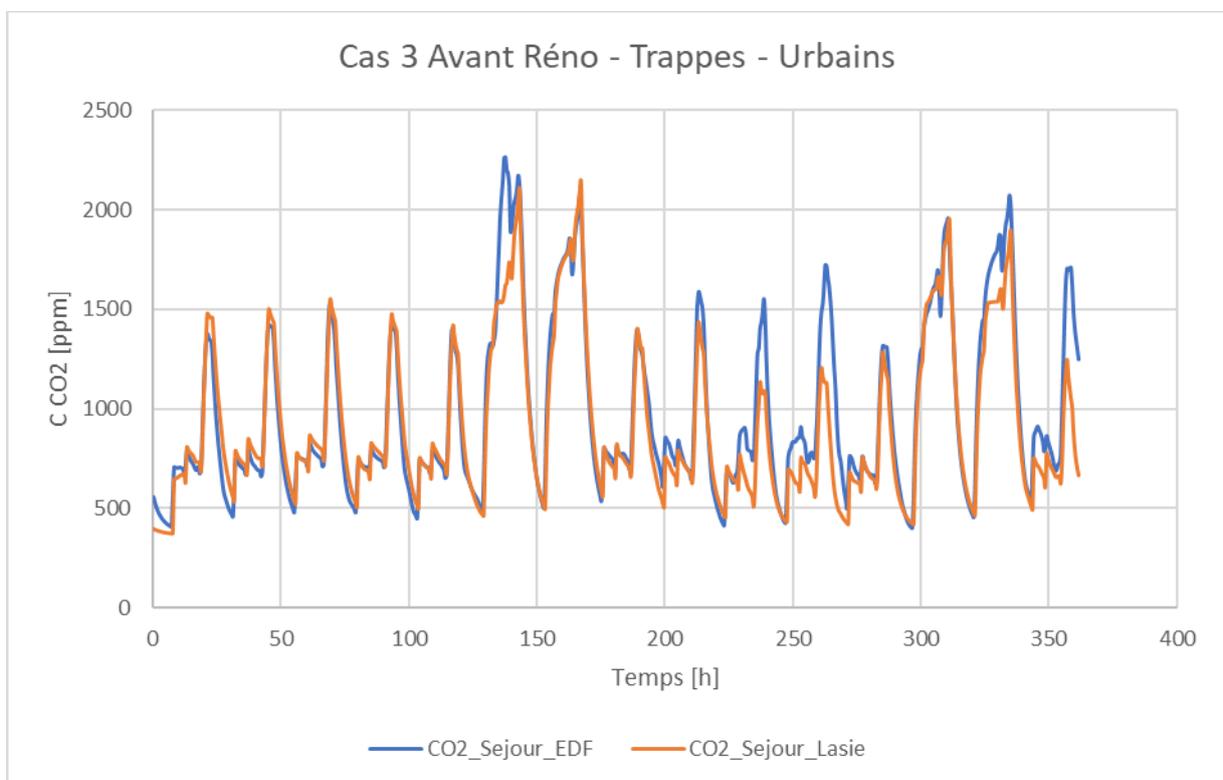


Figure 36 : Concentration de CO2 dans le séjour – Cas 3 avant Réno du 1 au 15 Janvier.

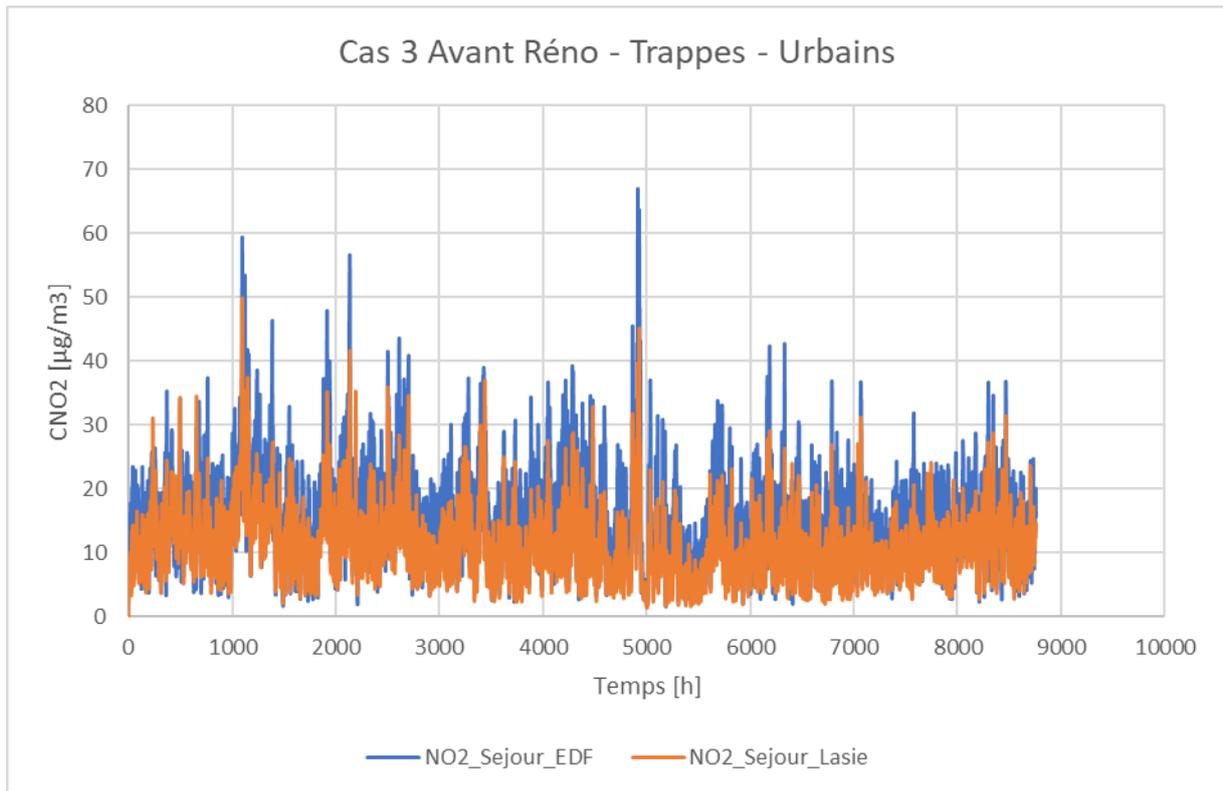


Figure 37 : Concentration de NO2 dans le séjour – Cas 3 avant Réno.

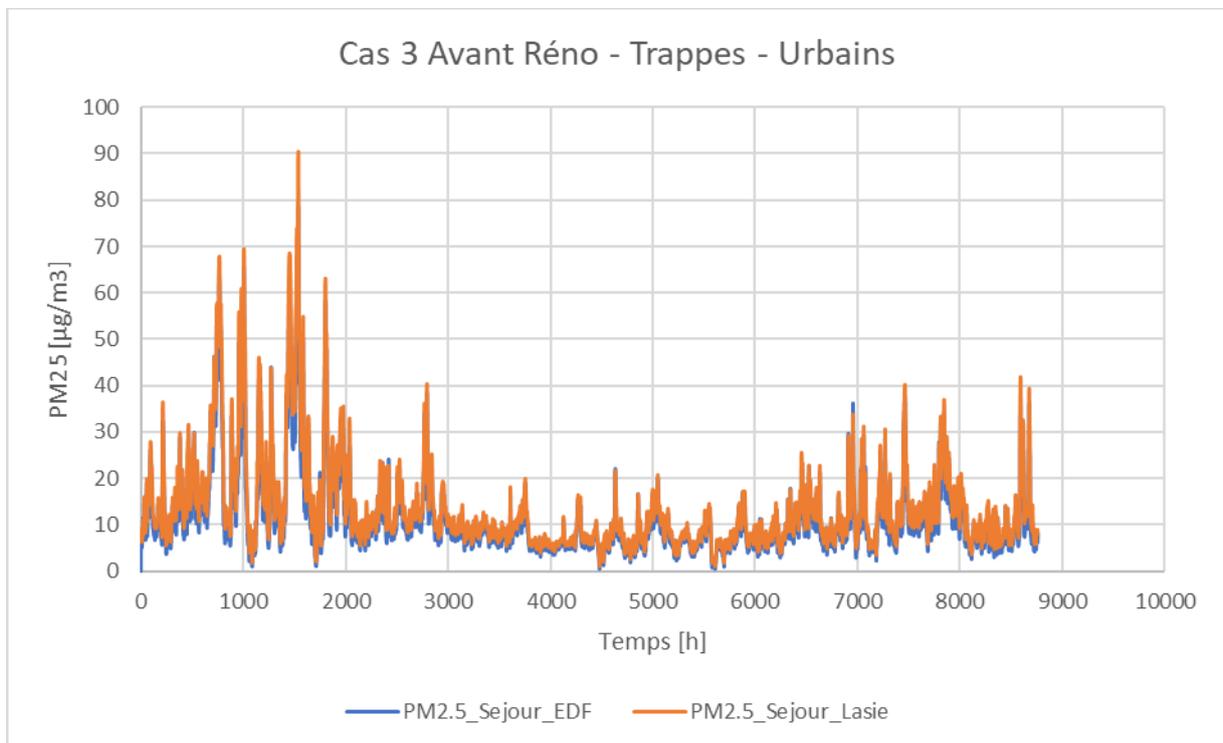


Figure 38 : Concentration de PM2,5 dans le séjour – Cas 3 avant Réno.

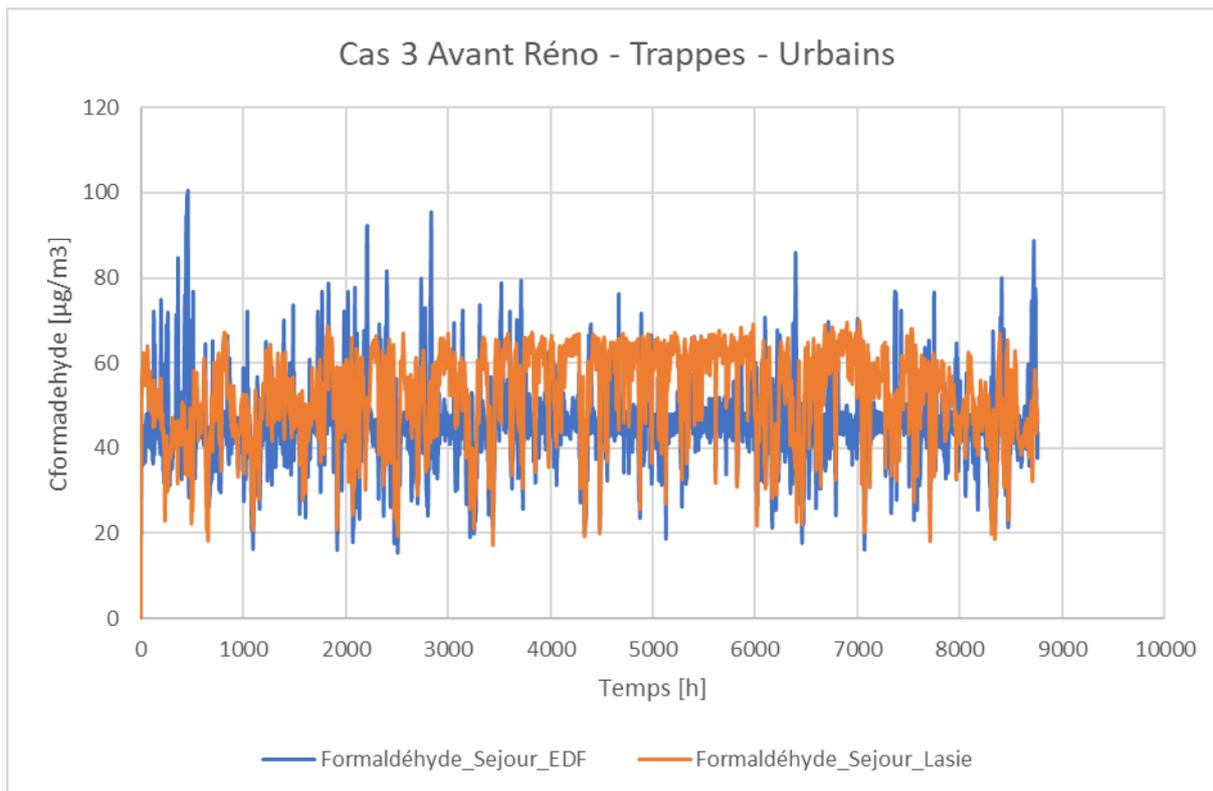


Figure 39 : Concentration de Formaldéhyde dans le séjour – Cas 3 avant Réno.

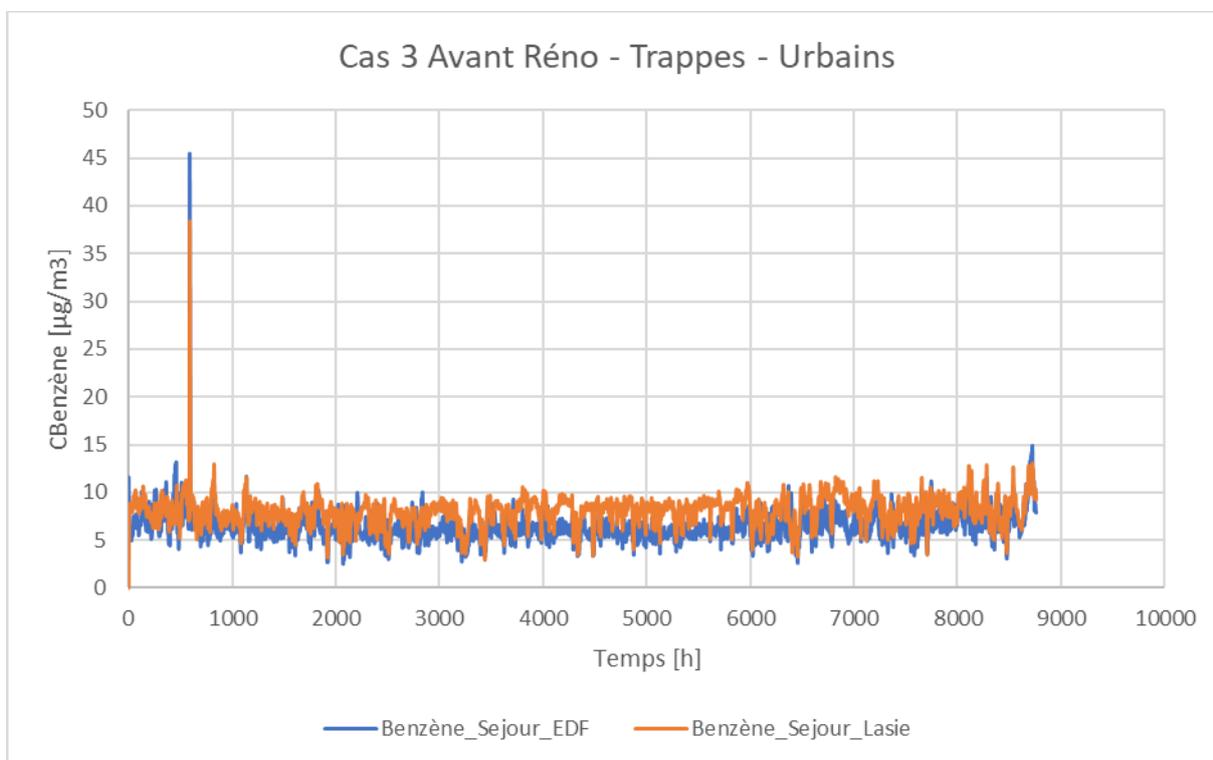


Figure 40 : Concentration de Benzène dans le séjour – Cas 3 avant Réno.

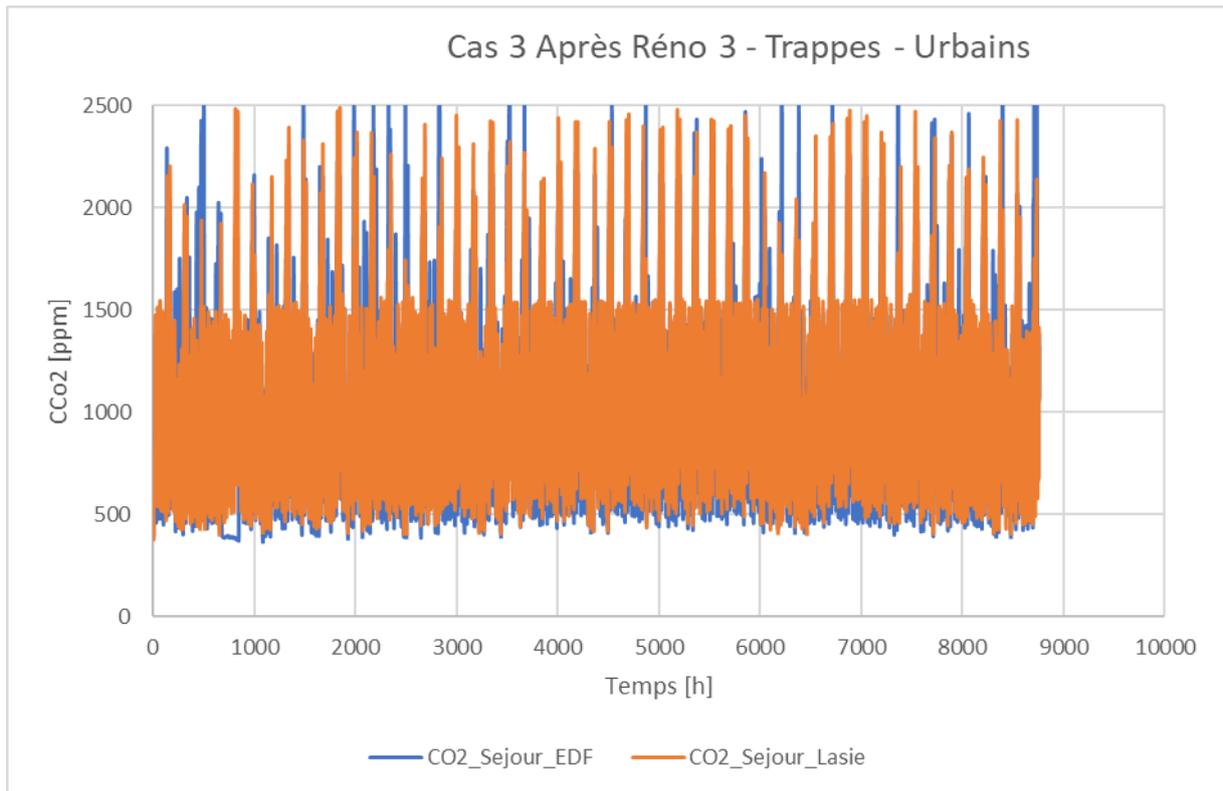


Figure 41 : Concentration de CO2 dans le séjour – Cas 3 après Réno #3.

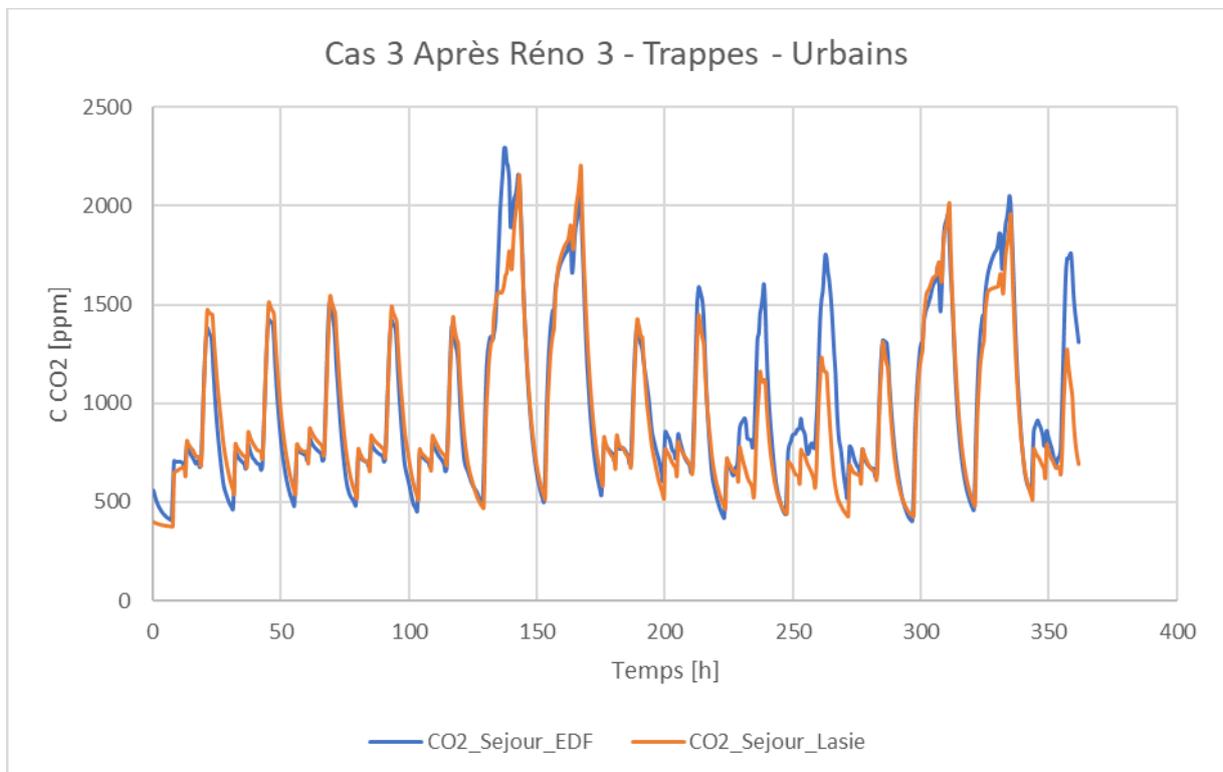


Figure 42 : Concentration de CO2 dans le séjour – Cas 3 après Réno #3 du 1 au 15 Janvier.

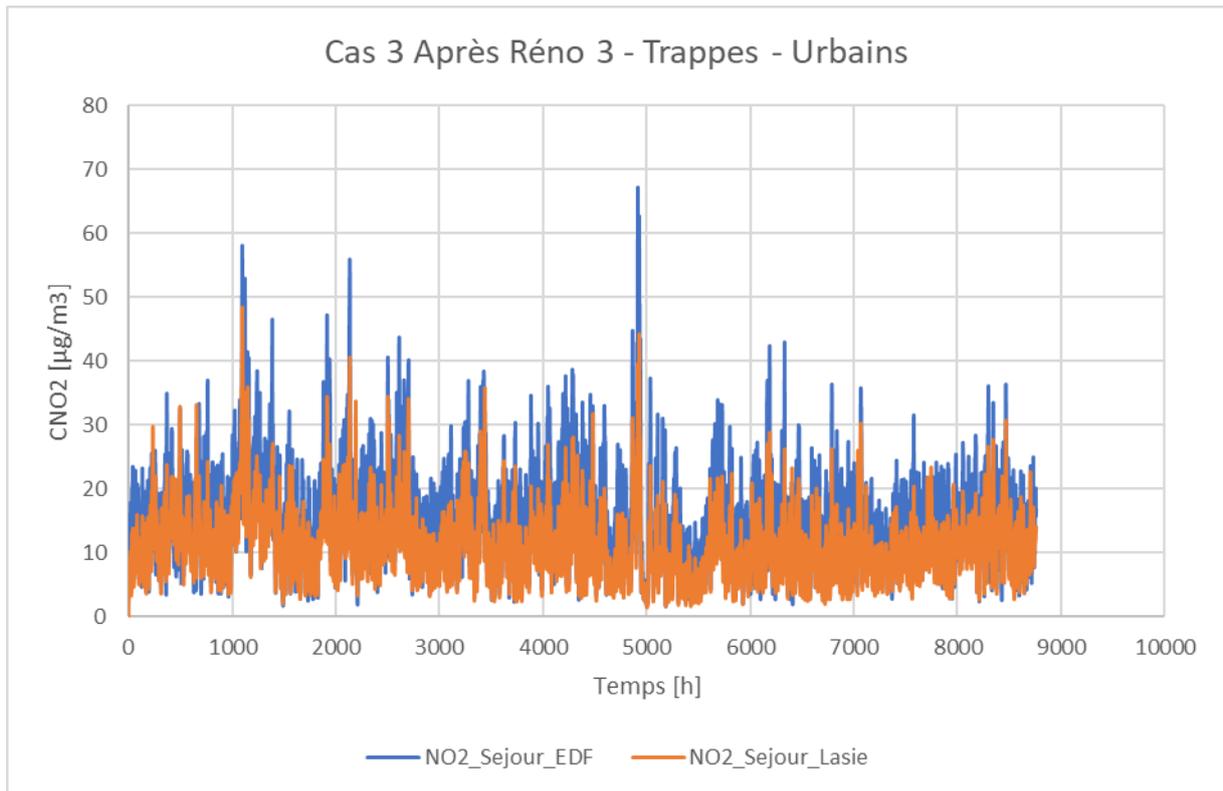


Figure 43 : Concentration de NO2 dans le séjour – Cas 3 après Réno #3.

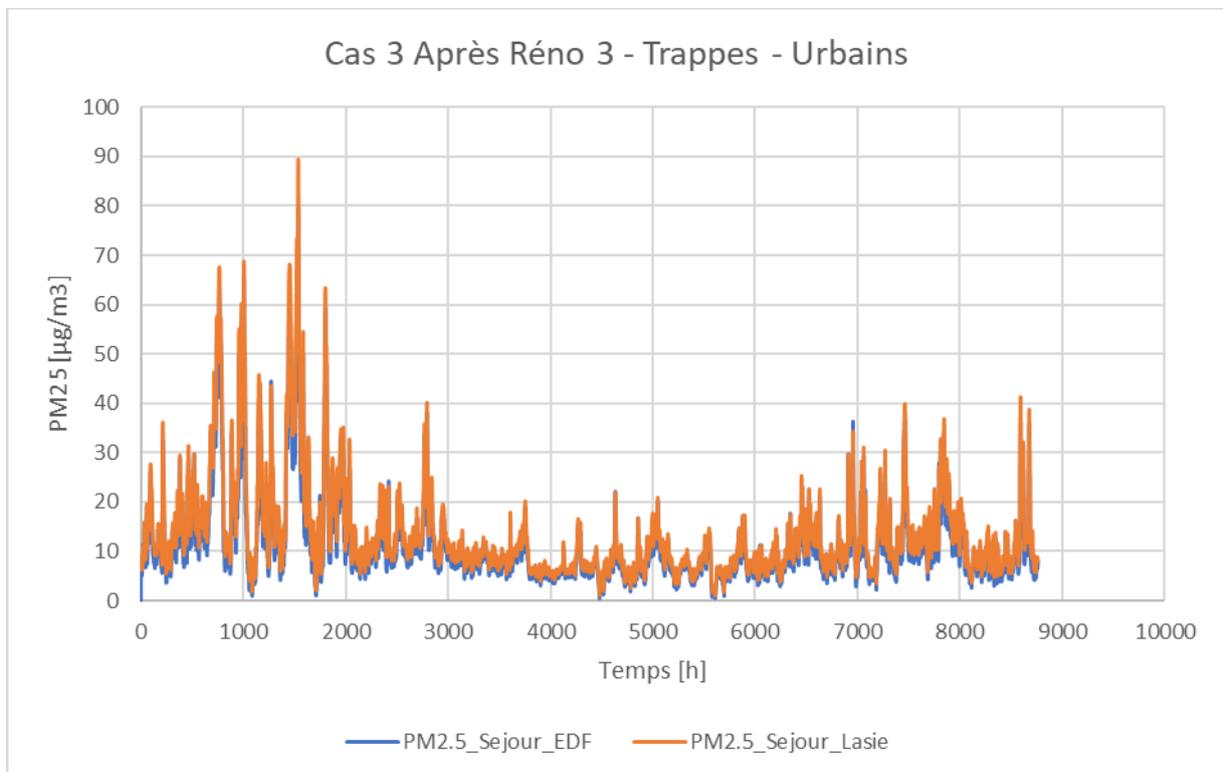
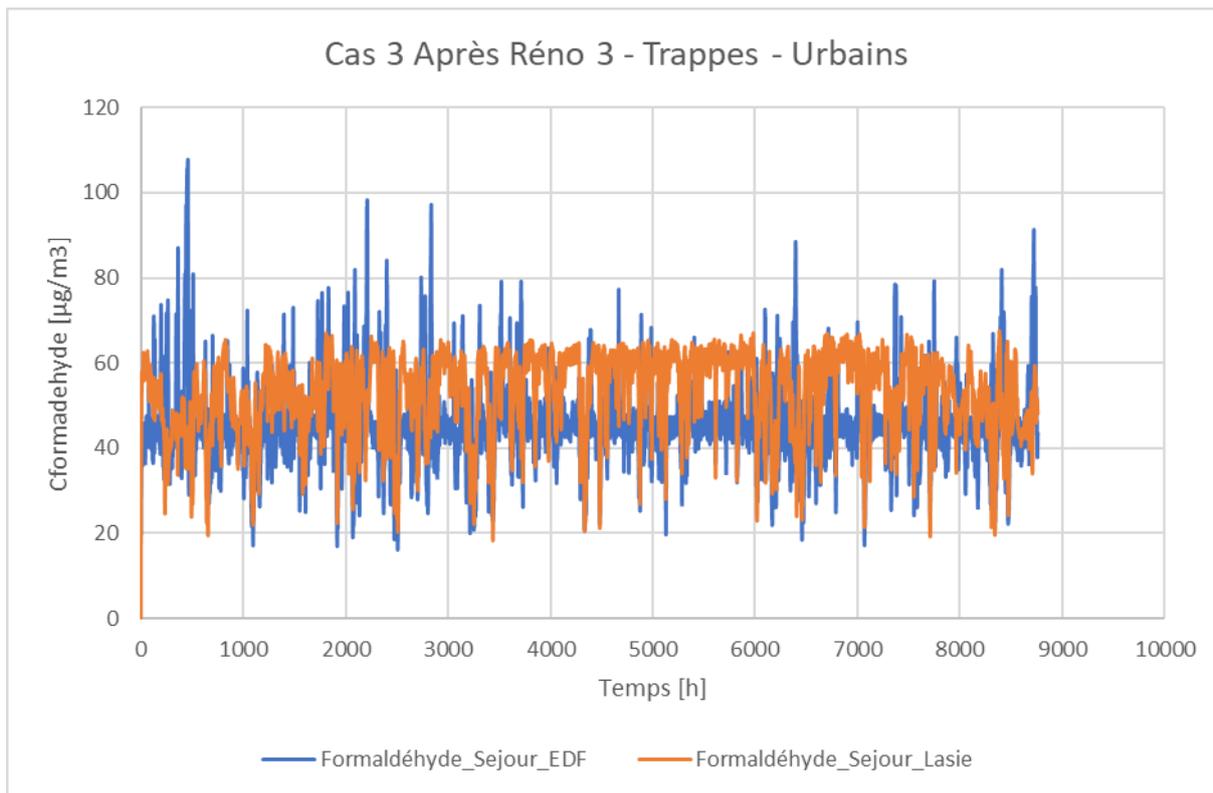
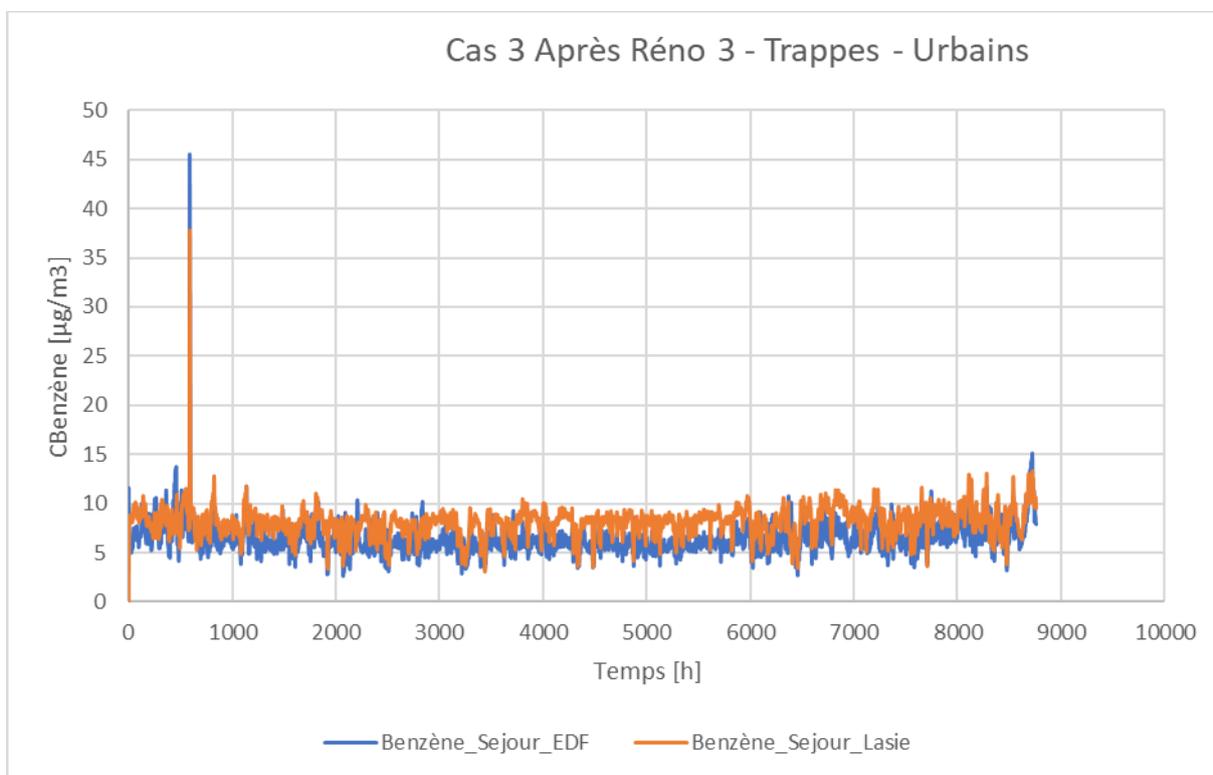


Figure 44 : Concentration de PM2,5 dans le séjour – Cas 3 après Réno #3.



*Figure 45 : Concentration de Formaldéhyde dans le séjour – Cas 3 après Réno #3.*



*Figure 46 : Concentration de benzène dans le séjour – Cas 3 après Réno #3.*

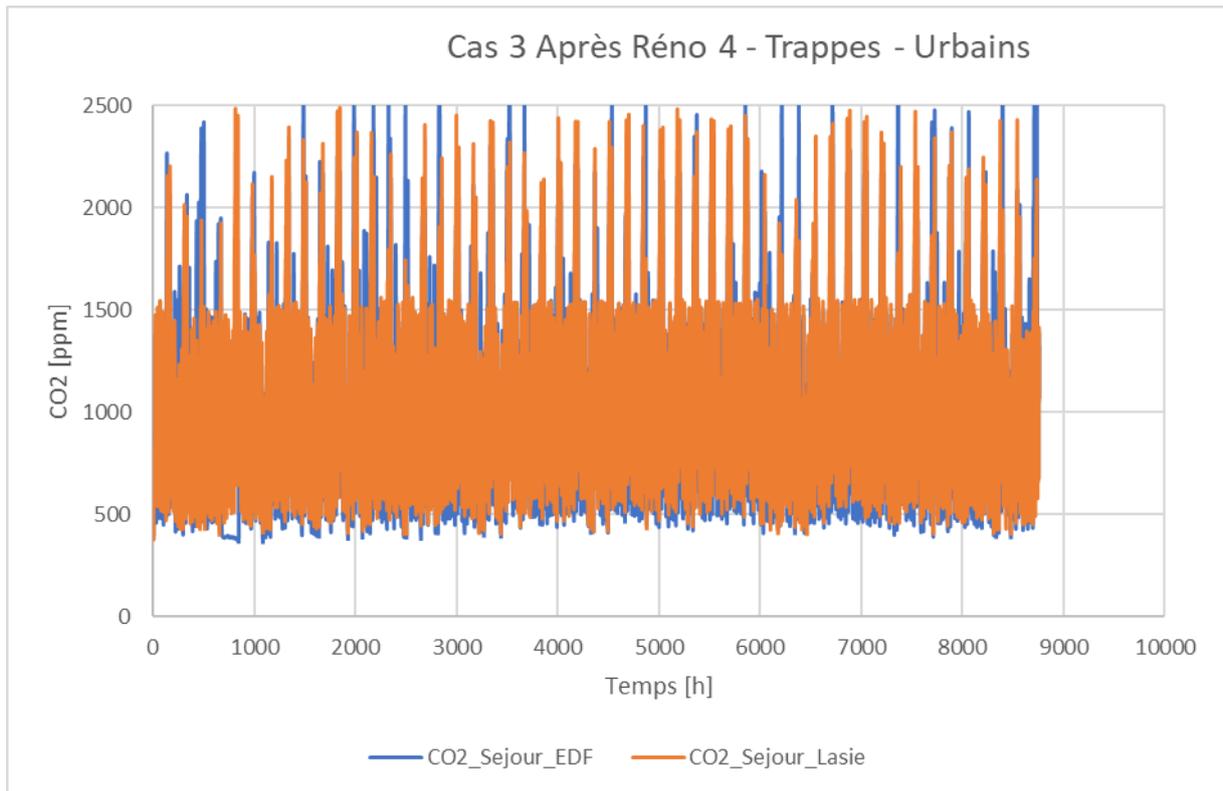


Figure 47 : Concentration de CO2 dans le séjour – Cas 3 après Réno #4.

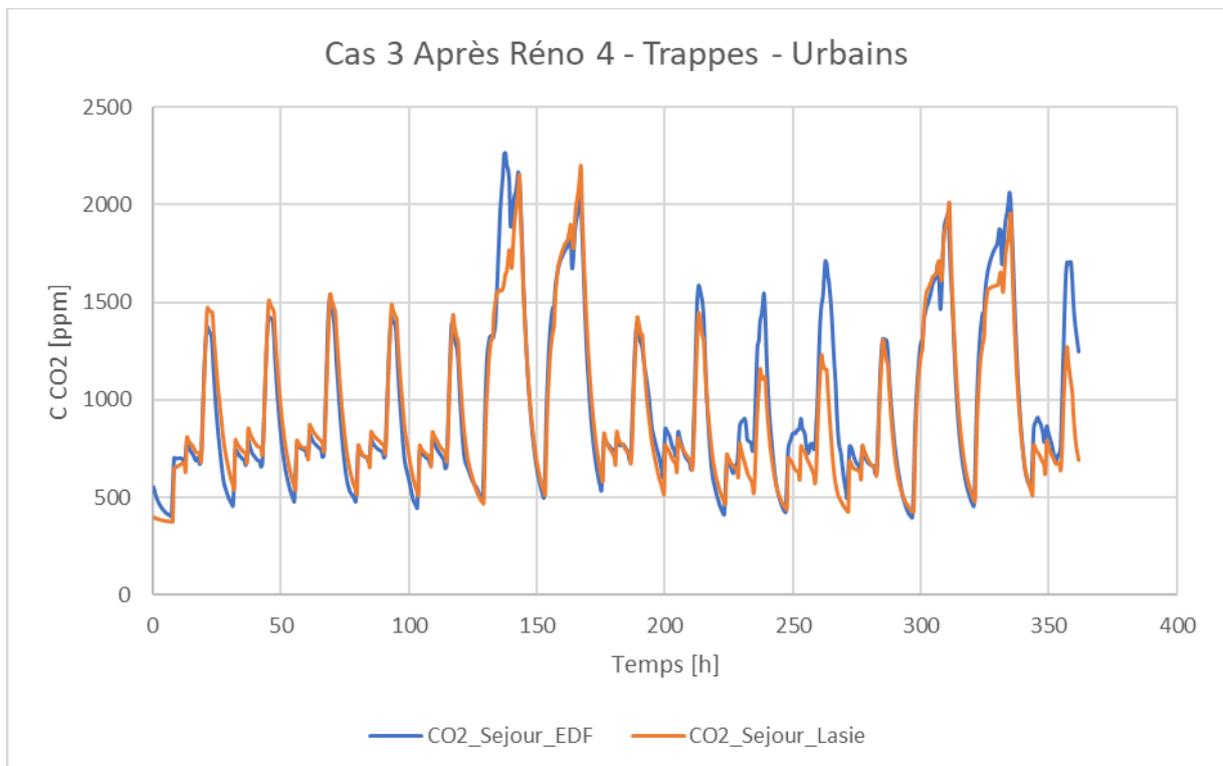


Figure 48 : Concentration de CO2 dans le séjour – Cas 3 après Réno #4 du 1 au 15 Janvier.

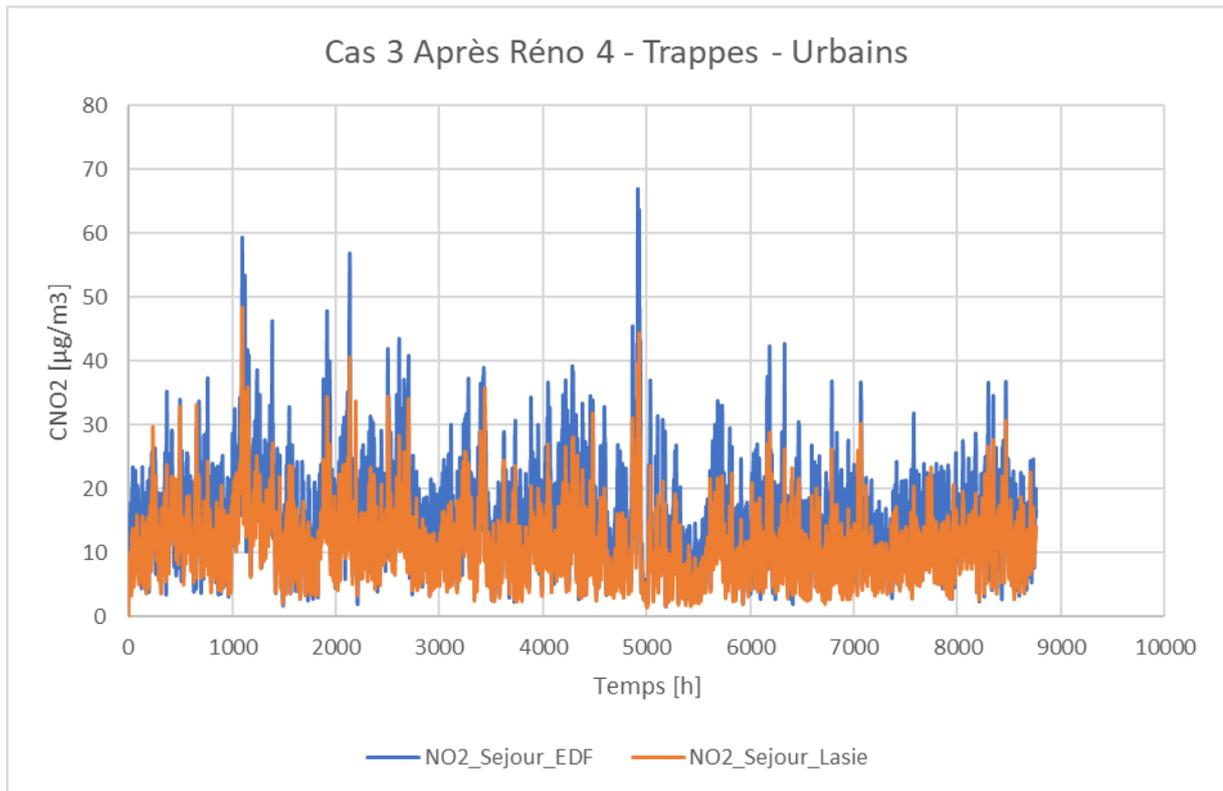


Figure 49 : Concentration de NO2 dans le séjour – Cas 3 après Réno #4.

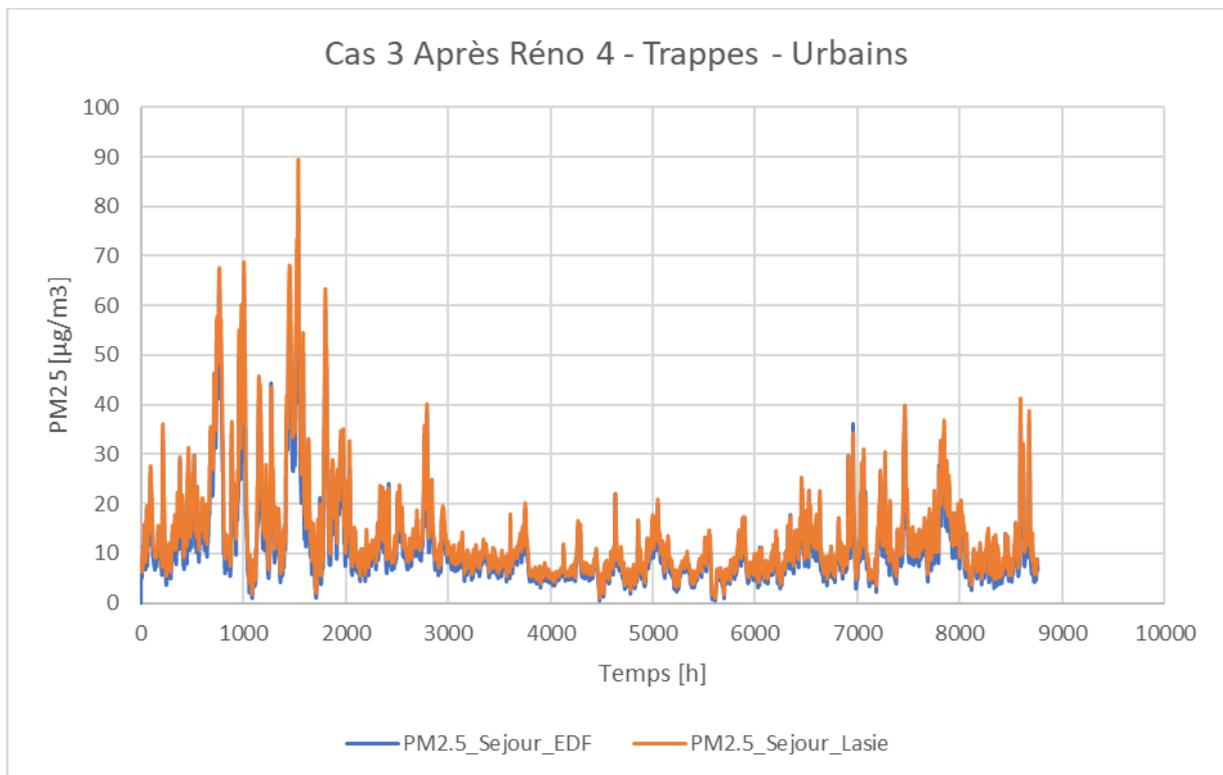


Figure 50 : Concentration de PM2,5 dans le séjour – Cas 3 après Réno #4.

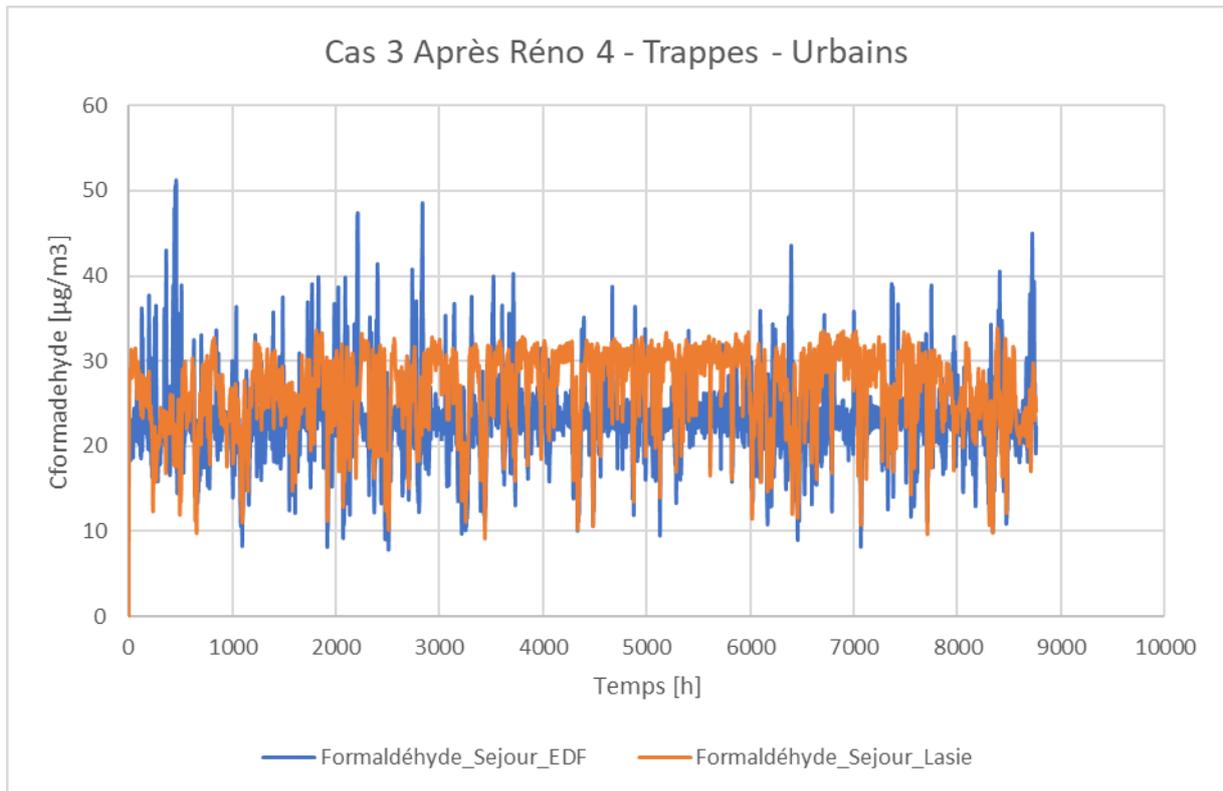


Figure 51 : Concentration de Formaldéhyde dans le séjour – Cas 3 après Réno #4.

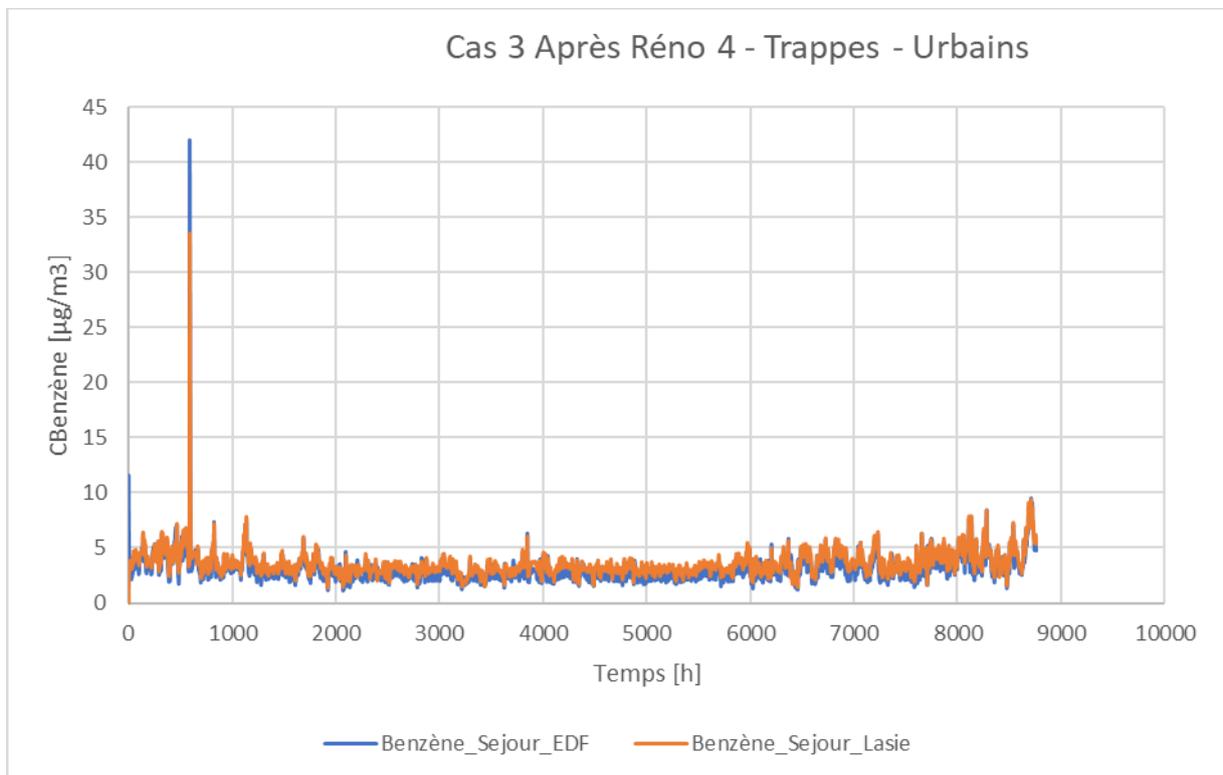


Figure 52 : Concentration de Benzène dans le séjour – Cas 3 après Réno #4.

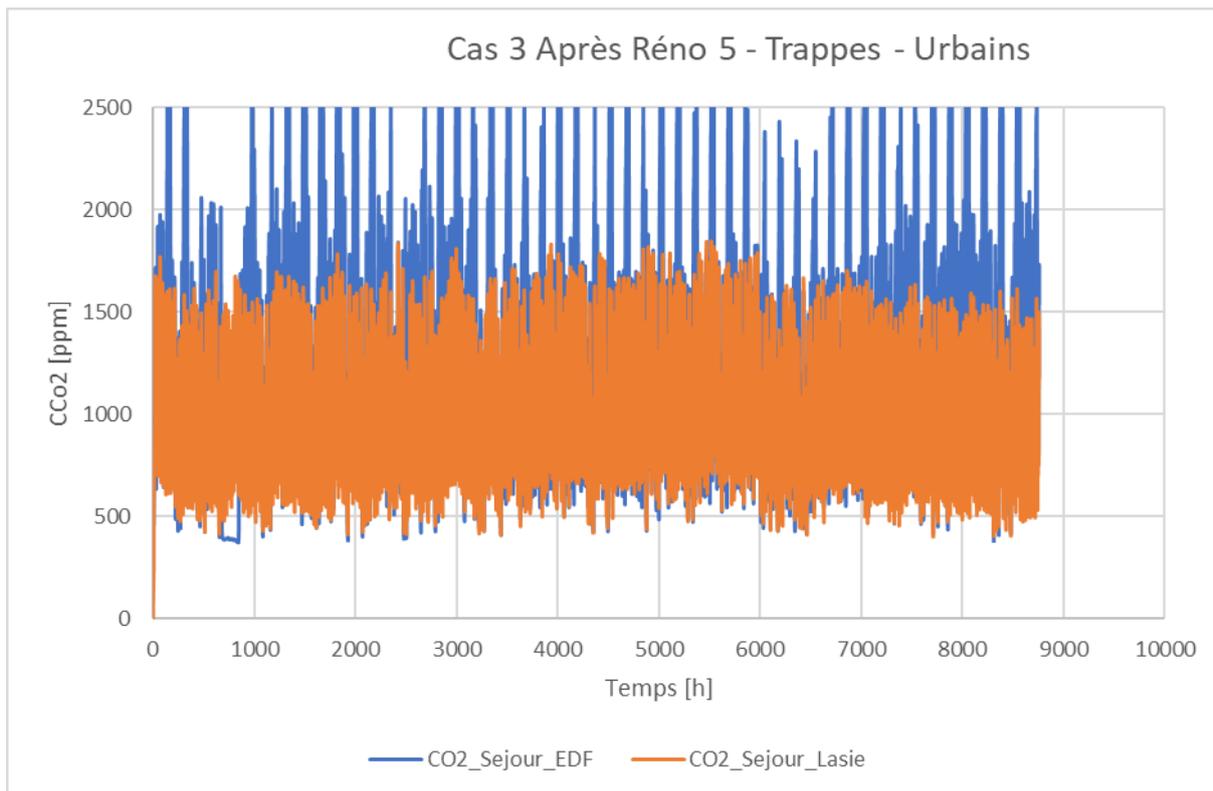


Figure 53 : Concentration de CO2 dans le séjour – Cas 3 après Réno #5.

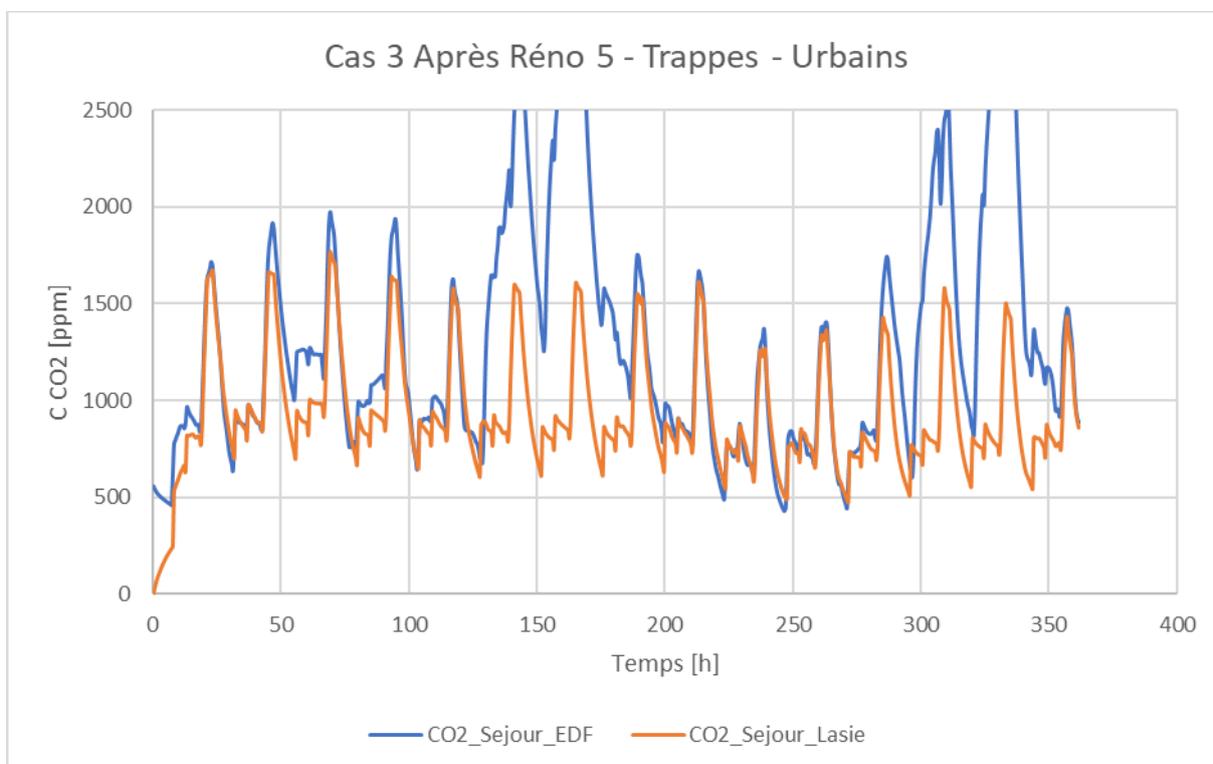


Figure 54 : Concentration de CO2 dans le séjour – Cas 3 après Réno #5 du 1 au 15 Janvier.

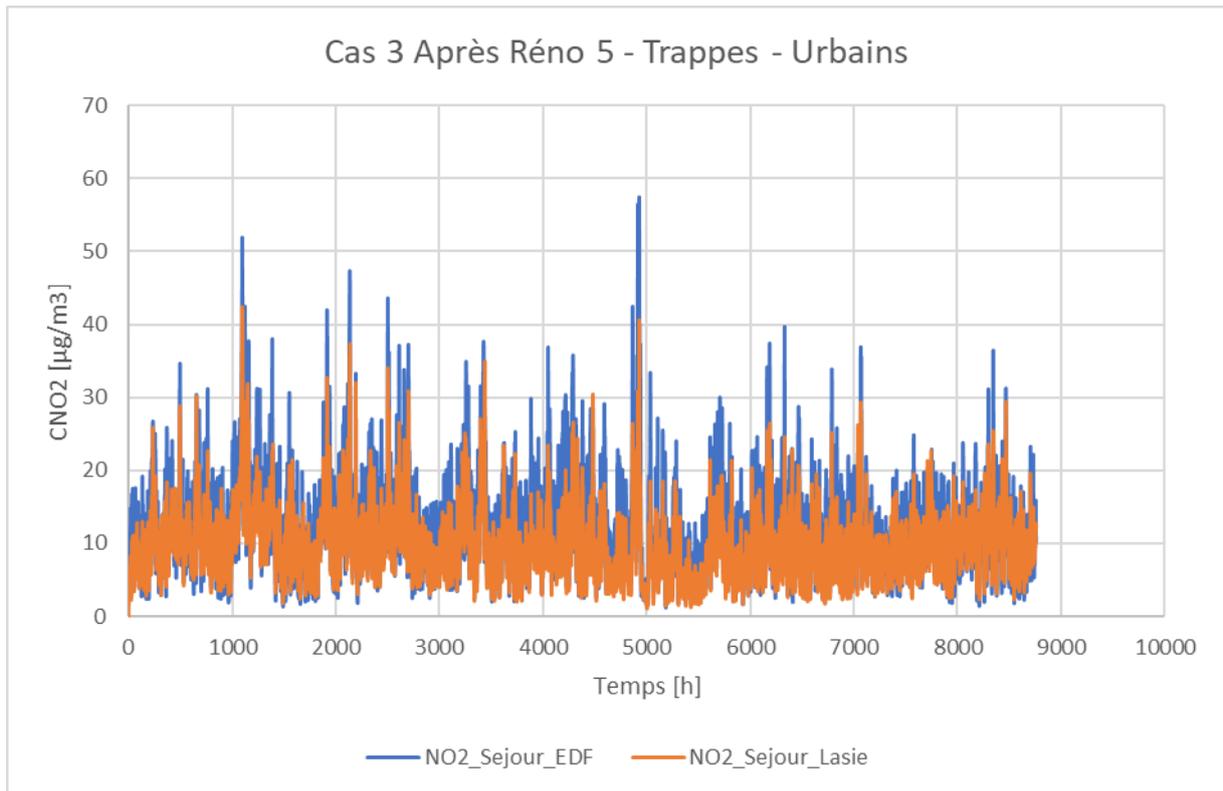


Figure 55 : Concentration de NO2 dans le séjour – Cas 3 après Réno #5.

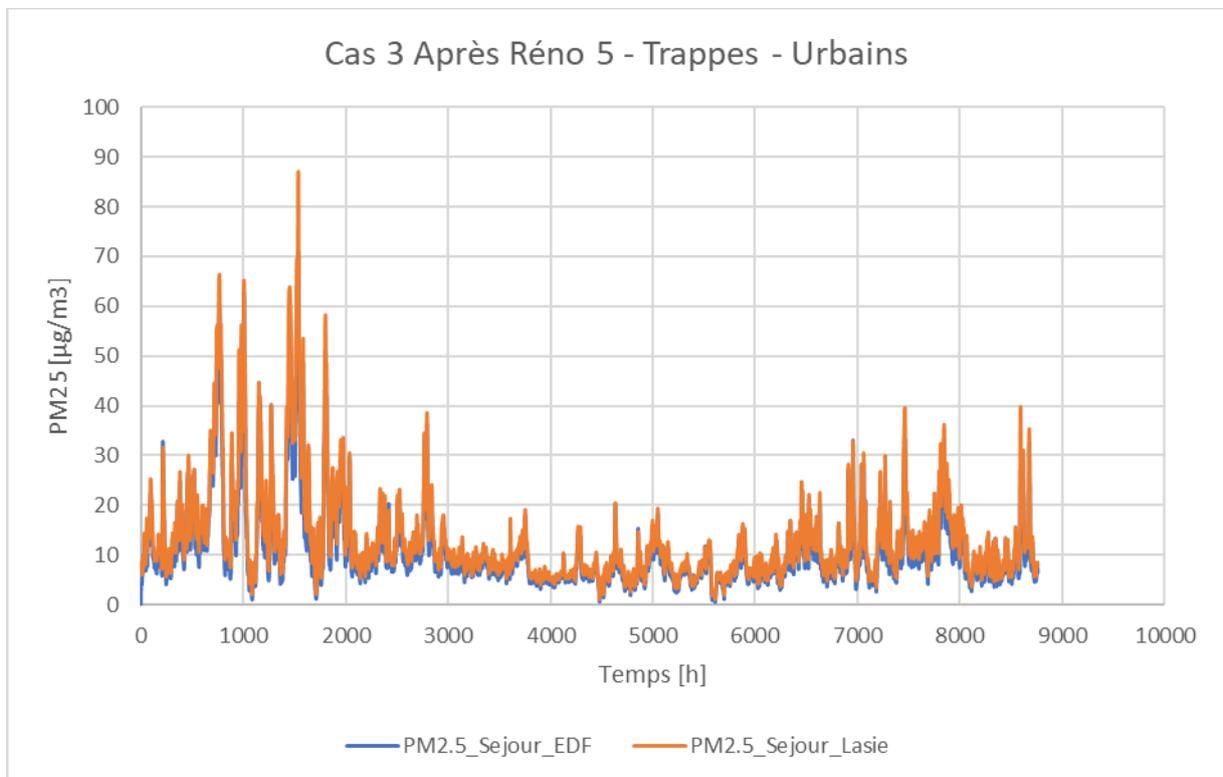


Figure 56 : Concentration de PM2,5 dans le séjour – Cas 3 après Réno #5.

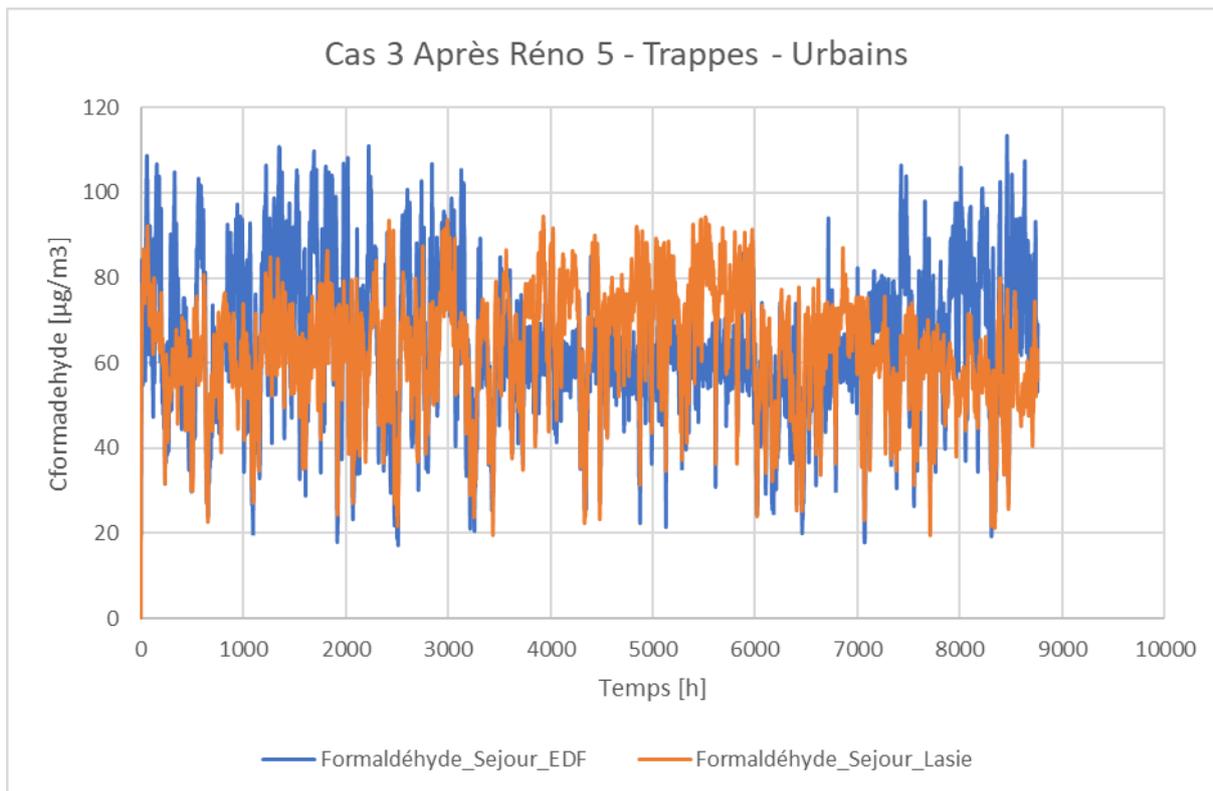


Figure 57 : Concentration de Formaldéhyde dans le séjour – Cas 3 après Réno #5.

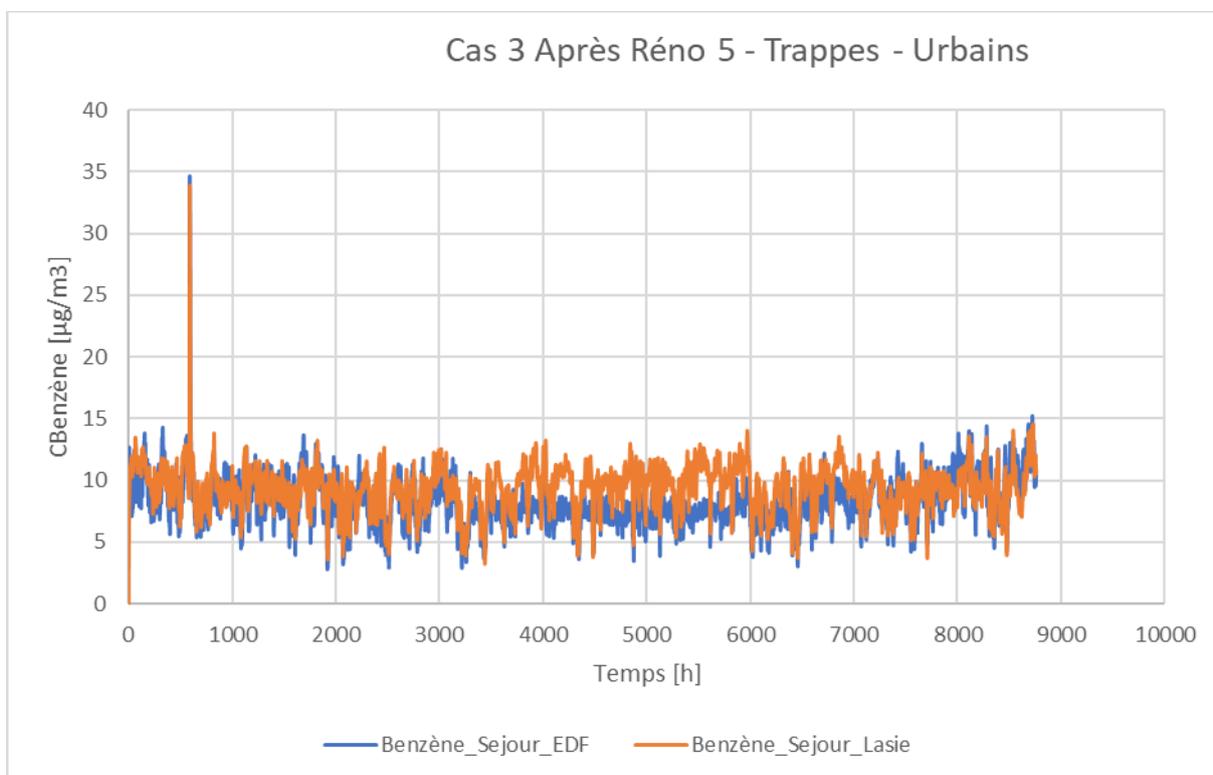


Figure 58 : Concentration de Benzène dans le séjour – Cas 3 après Réno #5.

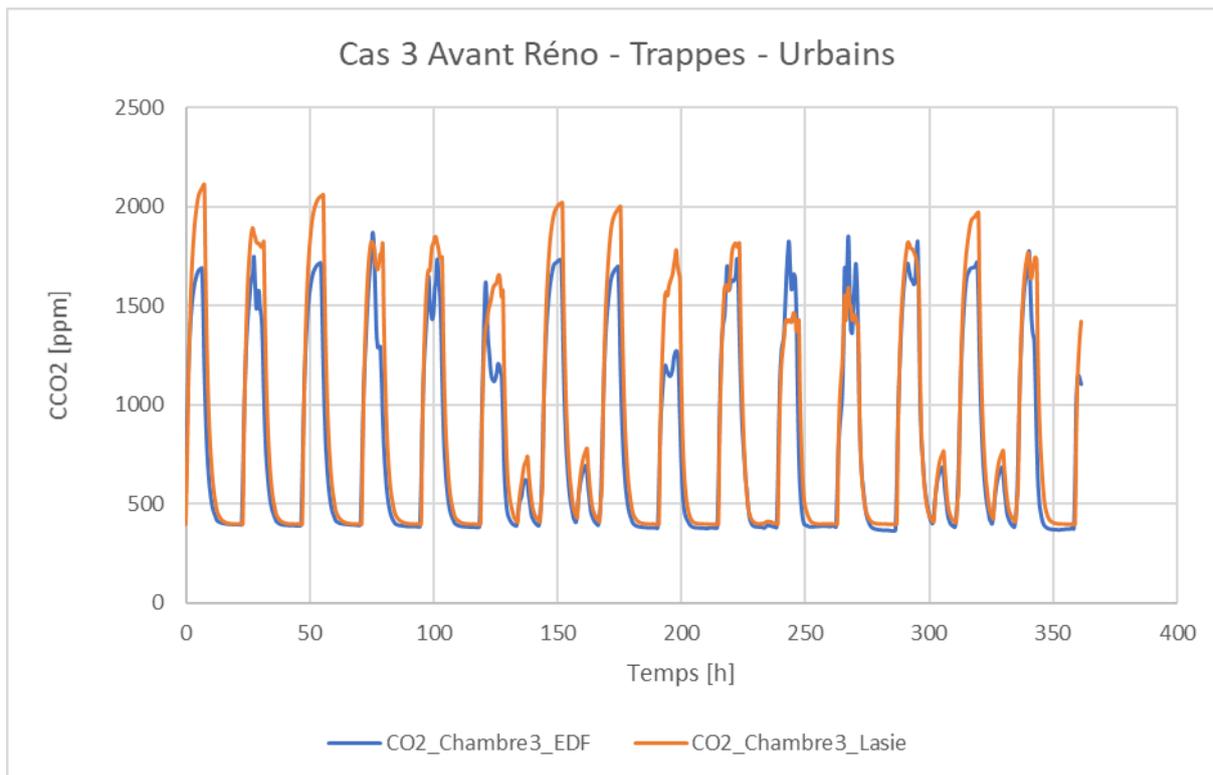


Figure 59 : Concentration de CO<sub>2</sub> dans la Chambre 3 – Cas 3 avant Réno du 1 au 15 Janvier.

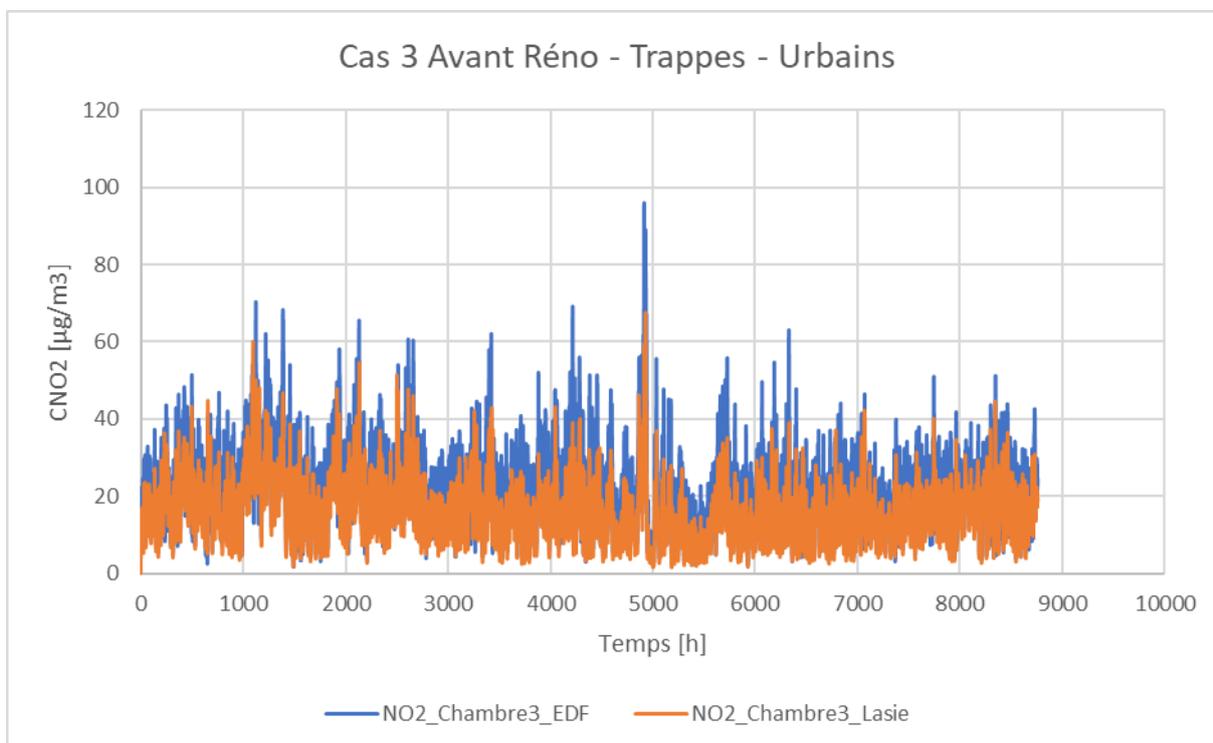


Figure 60 : Concentration de NO<sub>2</sub> dans la Chambre 3 – Cas 3 avant Réno.

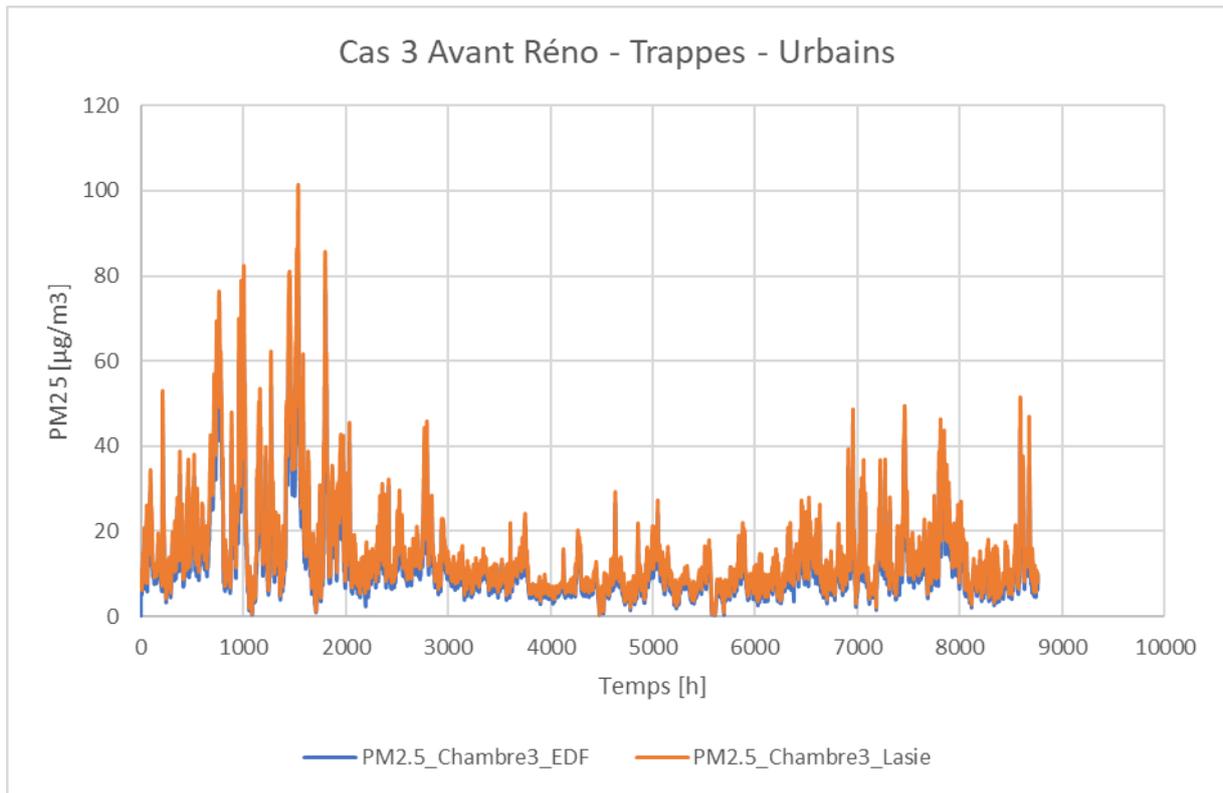


Figure 61 : Concentration de PM2,5 dans la Chambre 3 – Cas 3 avant Réno.

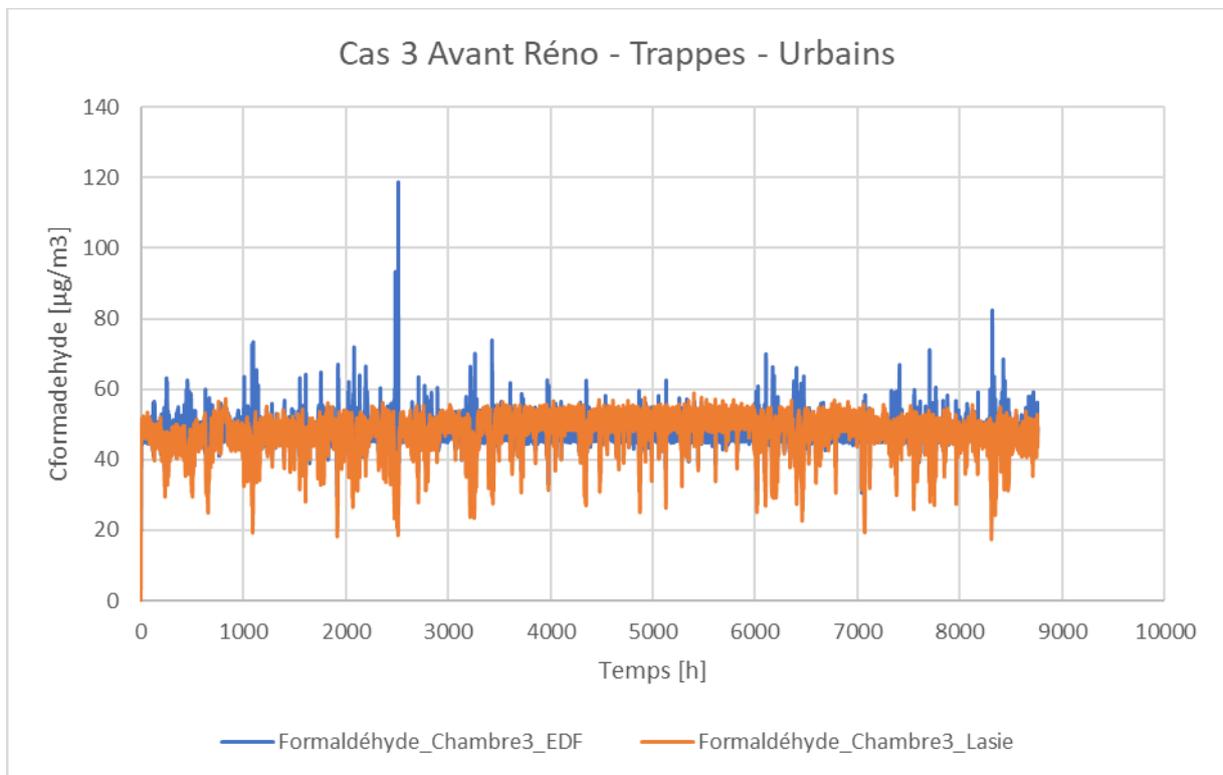


Figure 62 : Concentration de Formaldéhyde dans la Chambre 3 – Cas 3 avant Réno.

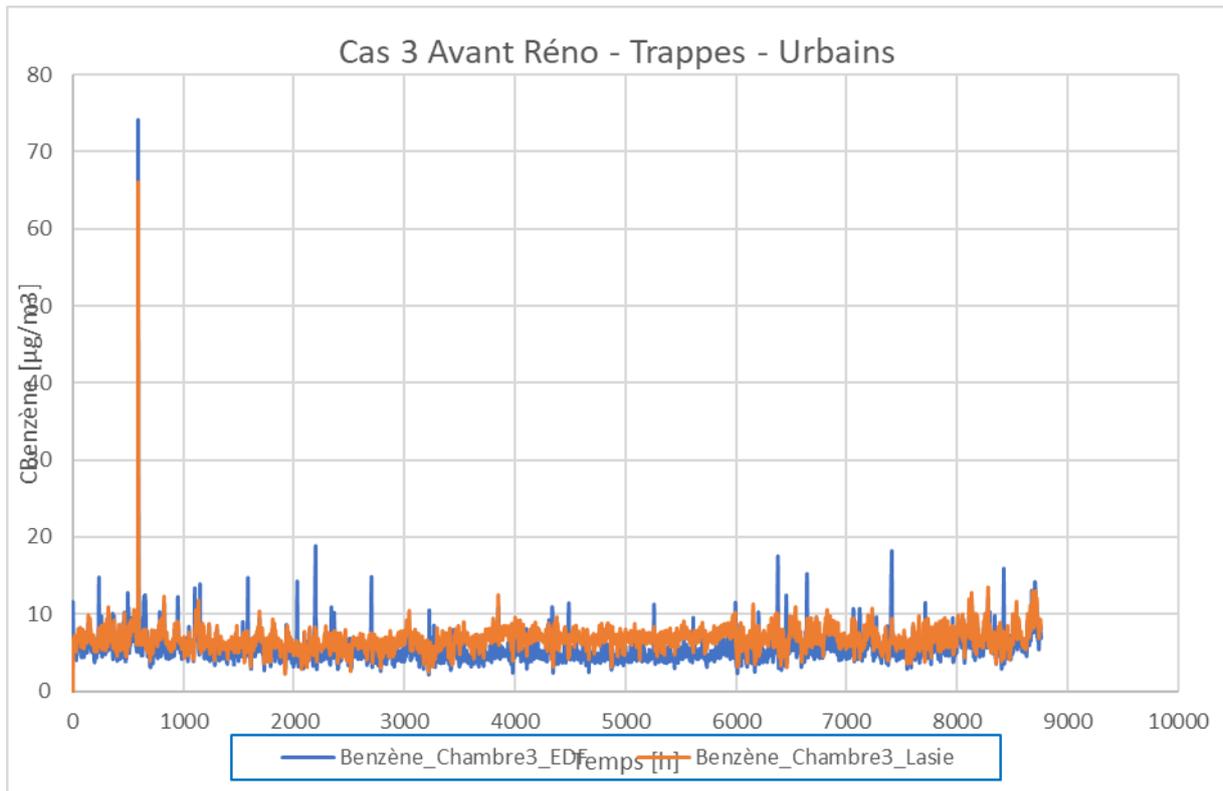


Figure 63 : Concentration de Benzène dans la Chambre 3 – Cas 3 avant Réno.

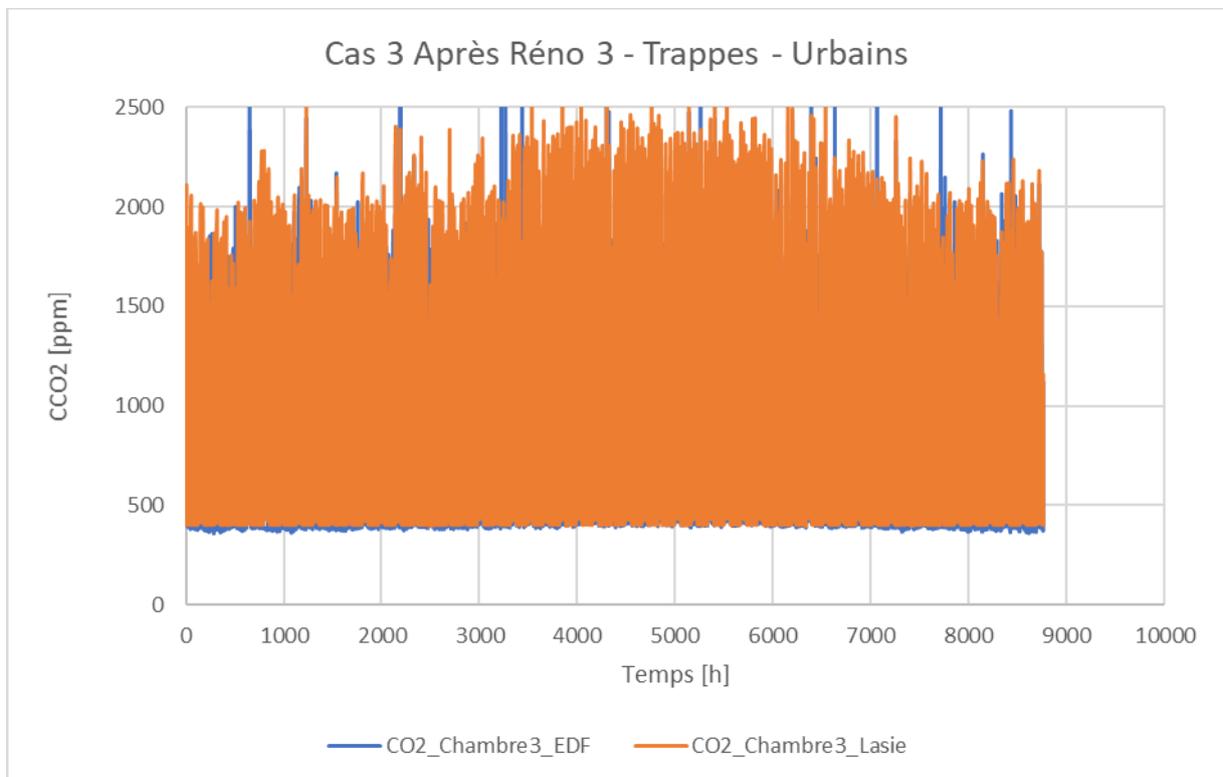


Figure 64 : Concentration de CO2 dans la Chambre 3 – Cas 3 après Réno #3.

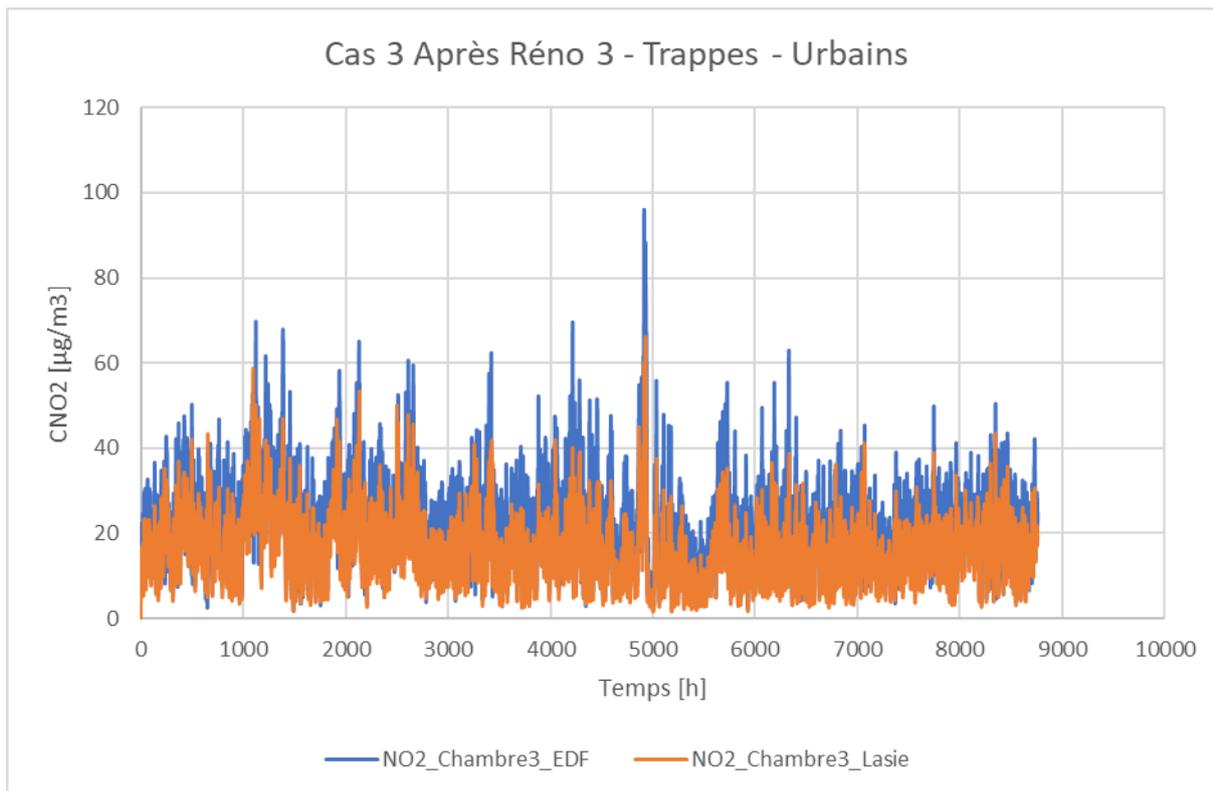


Figure 65 : Concentration de NO<sub>2</sub> dans la Chambre 3 – Cas 3 après Réno #3.

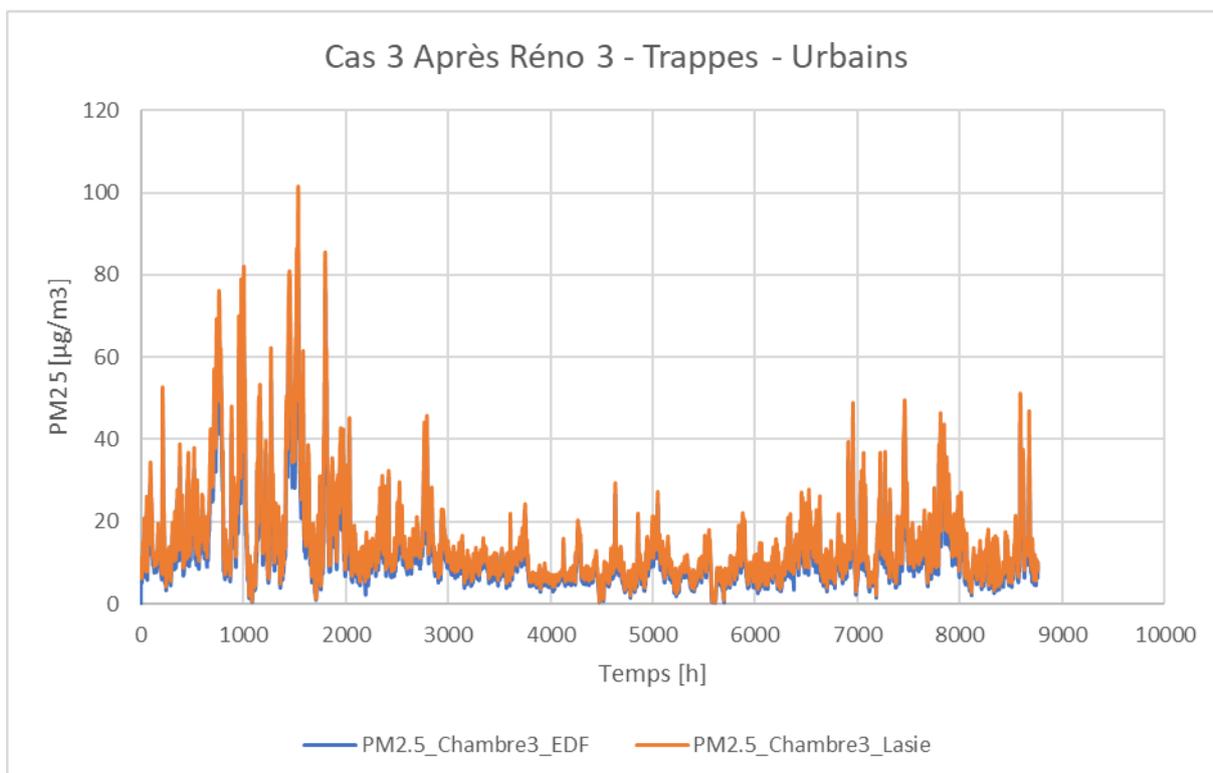


Figure 66 : Concentration de PM<sub>2,5</sub> dans la Chambre 3 – Cas 3 après Réno #3.

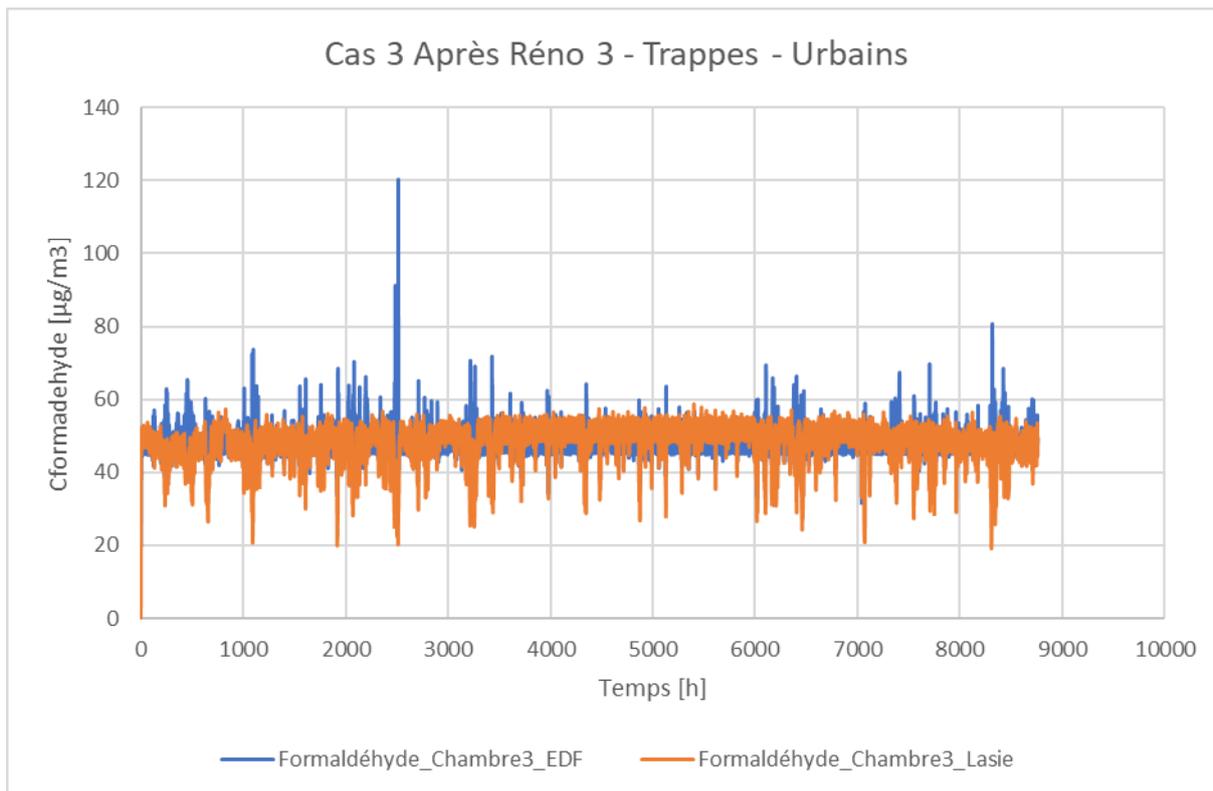


Figure 67 : Concentration de Formaldéhyde dans la Chambre 3 – Cas 3 après Réno #3.

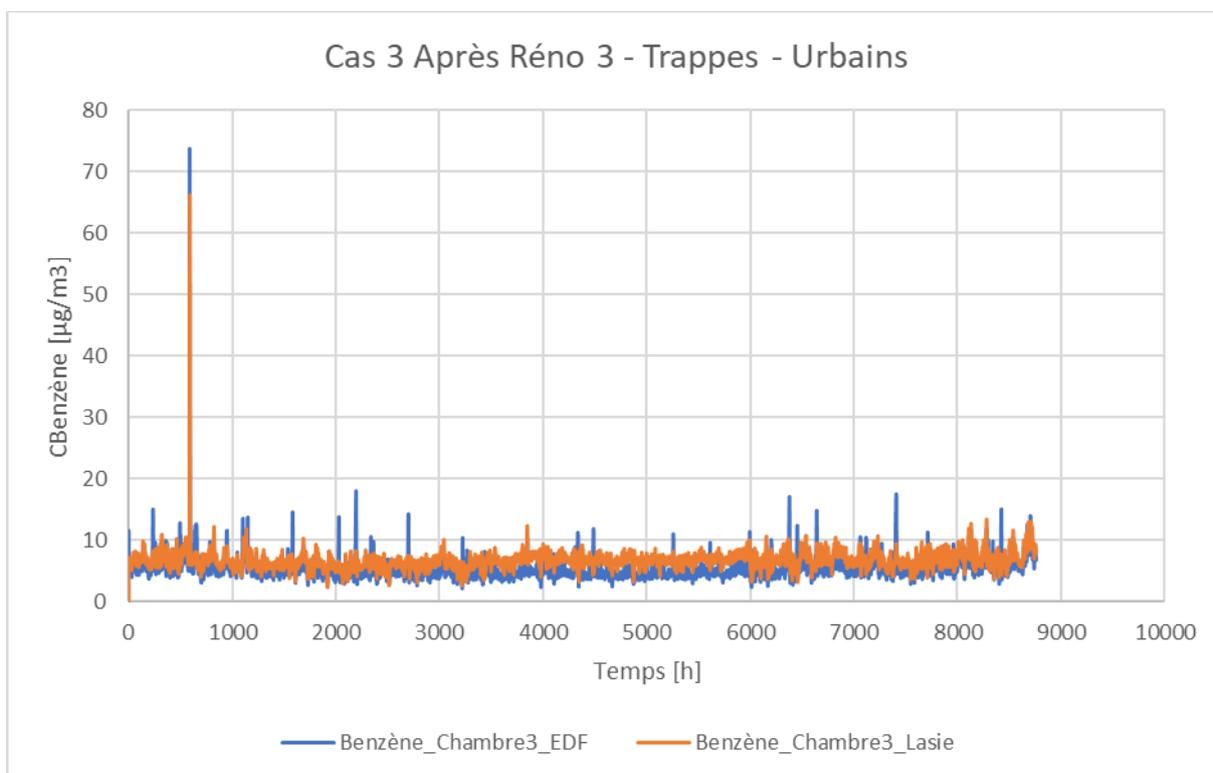


Figure 68 : Concentration de Benzène dans la Chambre 3 – Cas 3 après Réno #3.

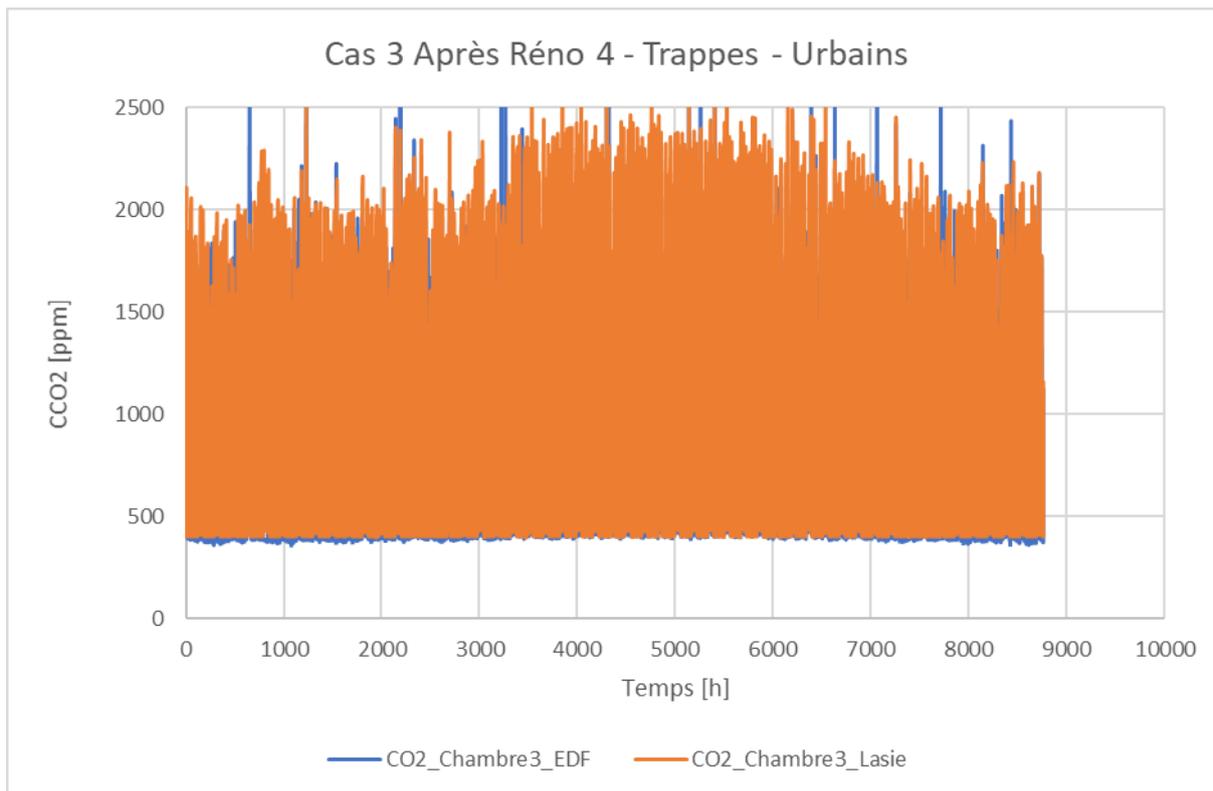


Figure 69 : Concentration de CO2 dans la Chambre 3 – Cas 3 après Réno #4.

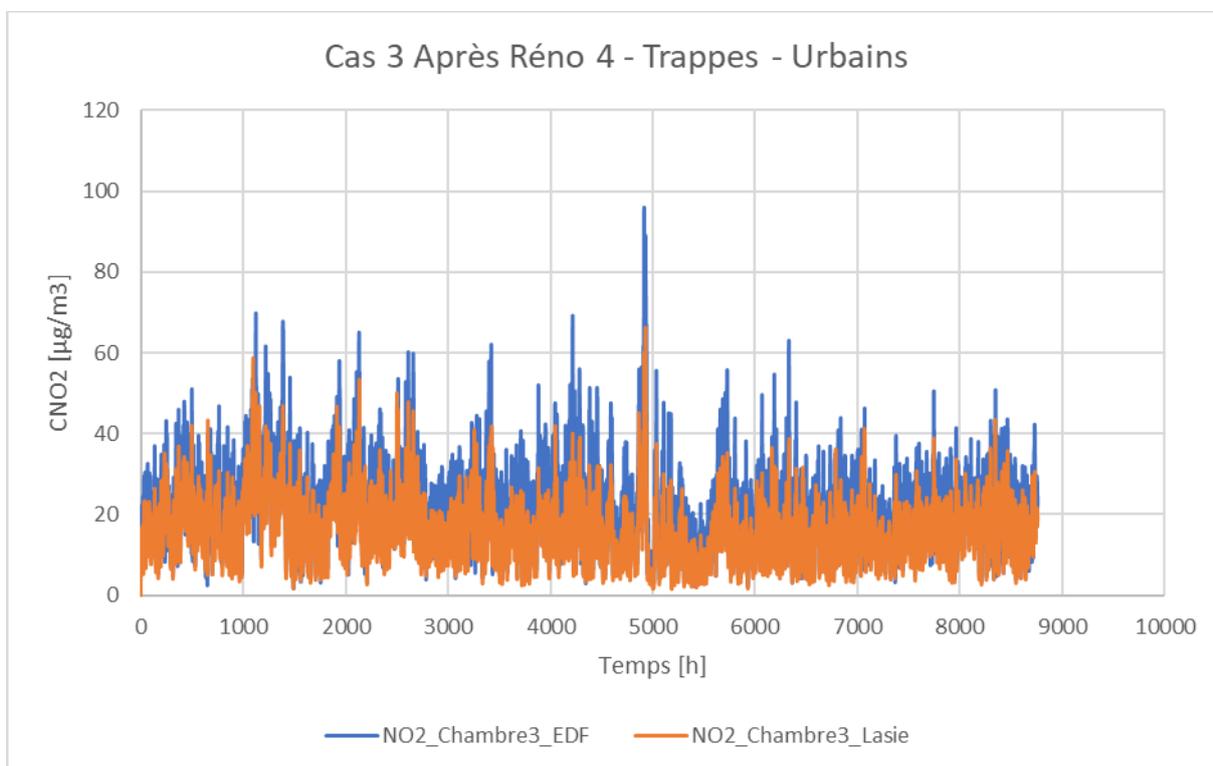


Figure 70 : Concentration de NO2 dans la Chambre 3 – Cas 3 après Réno #4.

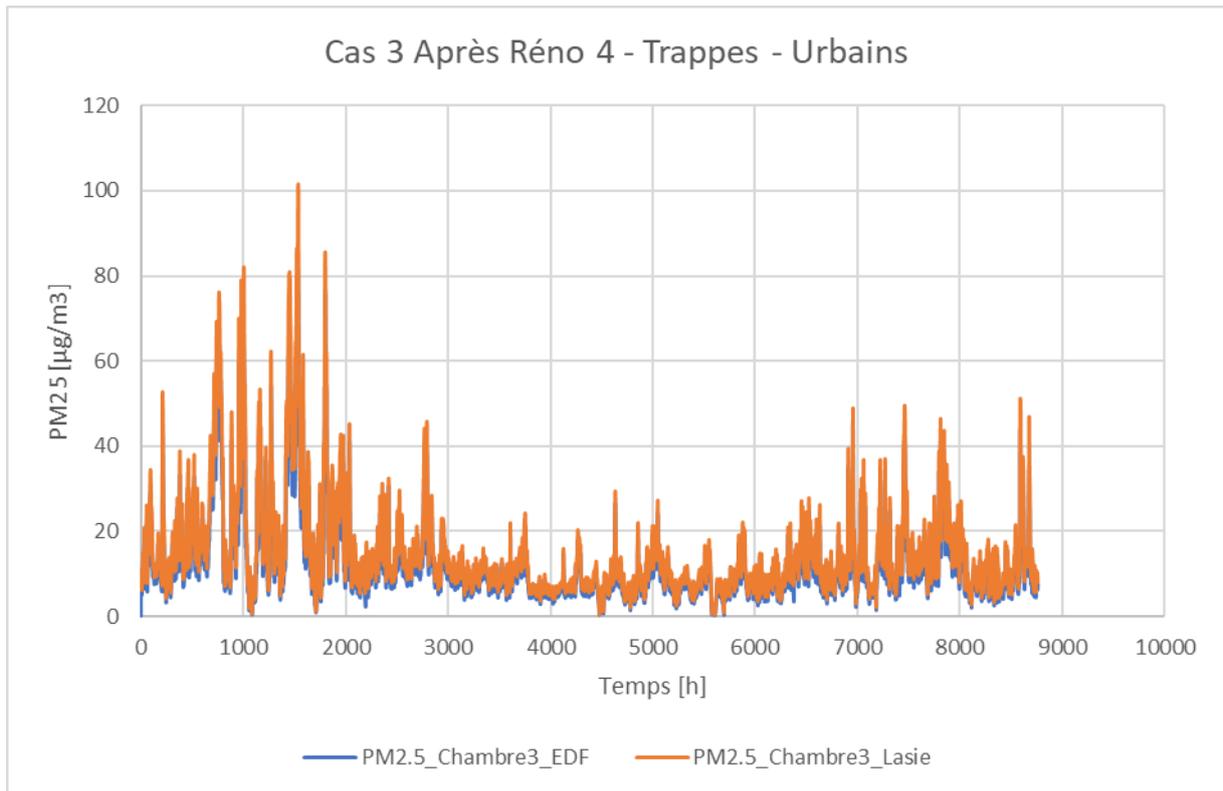


Figure 71 : Concentration de PM2,5 dans la Chambre 3 – Cas 3 après Réno #4.

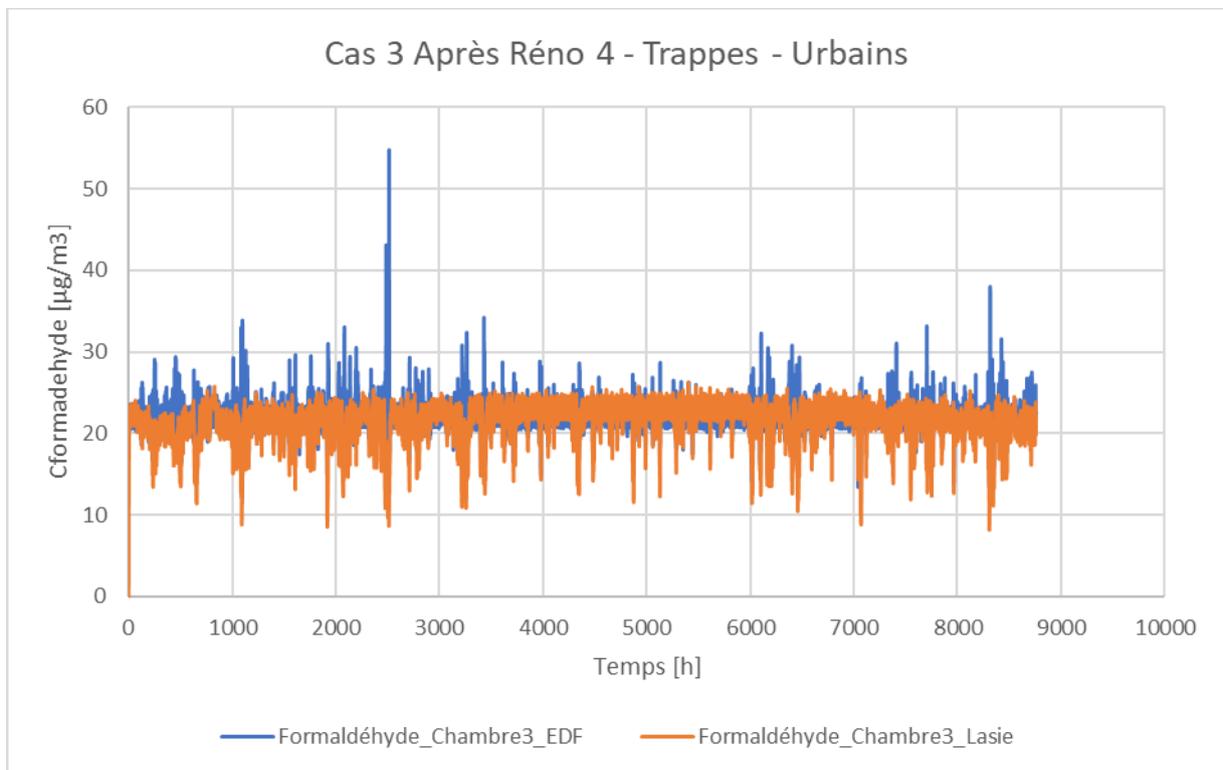


Figure 72 : Concentration de Formaldéhyde dans la Chambre 3 – Cas 3 après Réno #4.

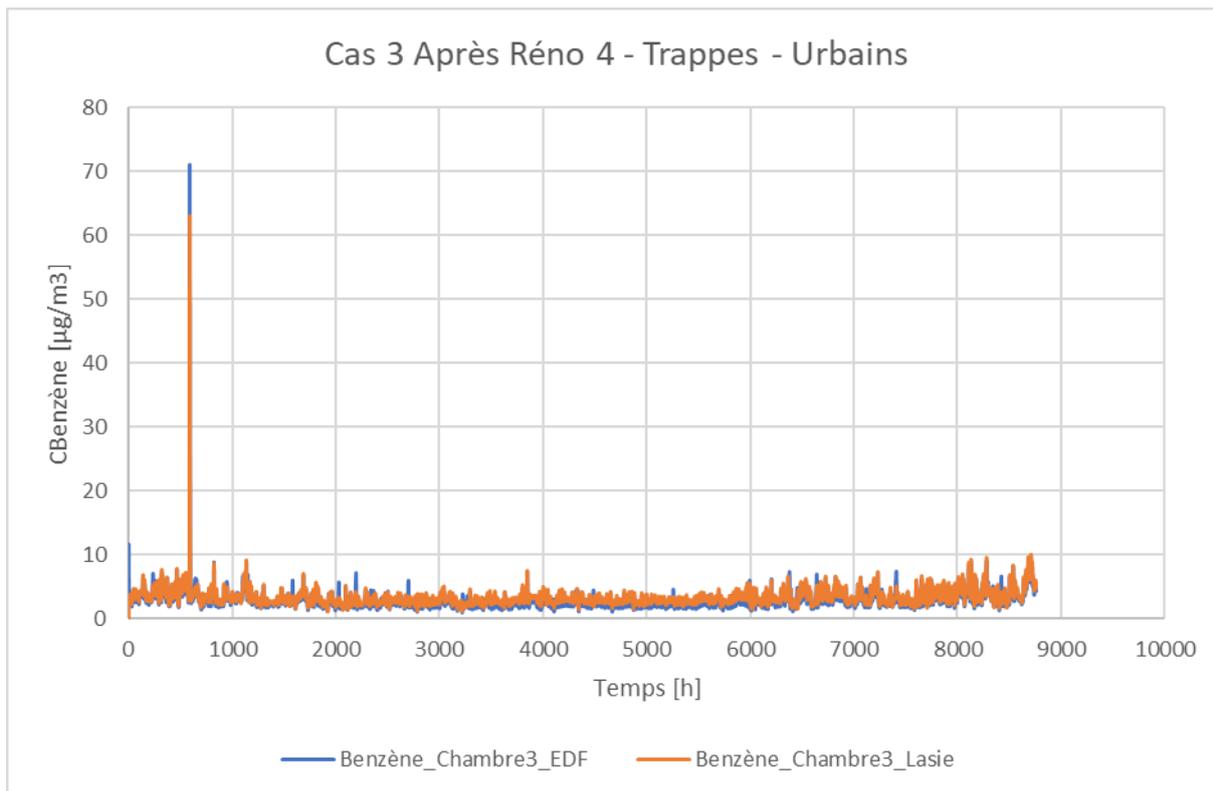


Figure 73 : Concentration de Benzène dans la Chambre 3 – Cas 3 après Réno #4.

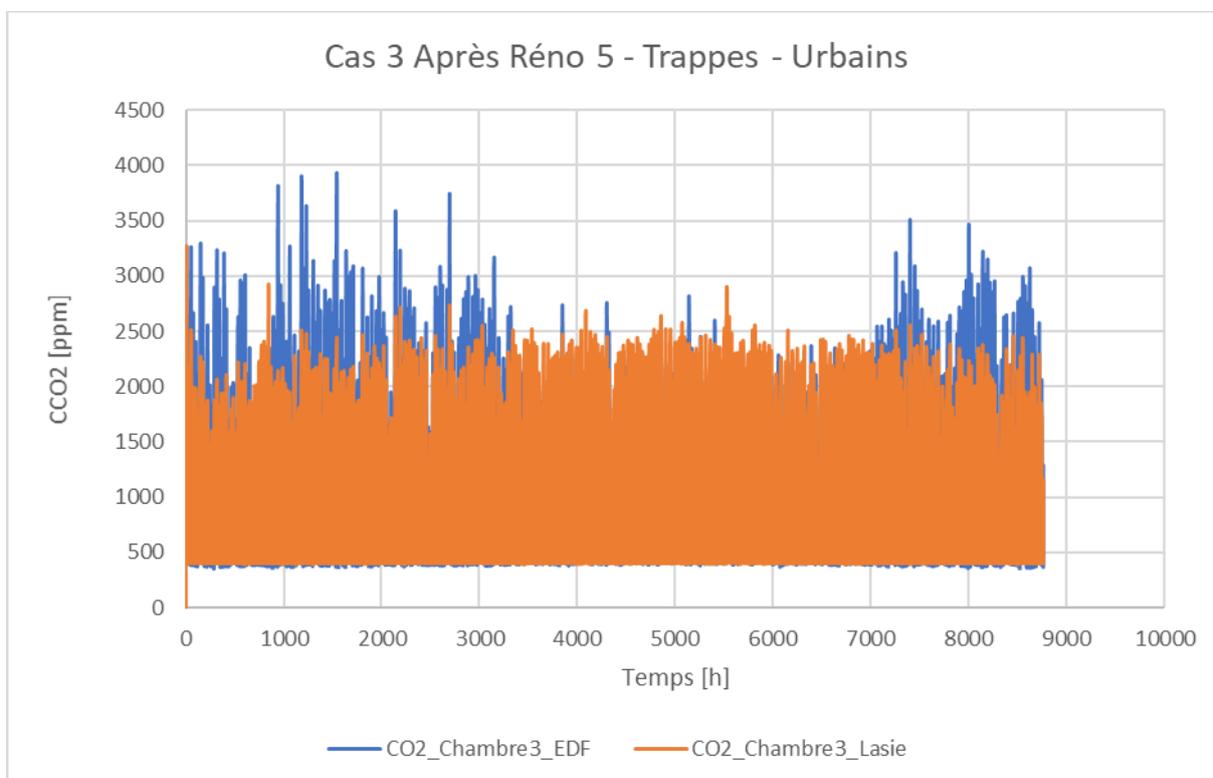


Figure 74 : Concentration de CO<sub>2</sub> dans la Chambre 3 – Cas 3 après Réno #5.

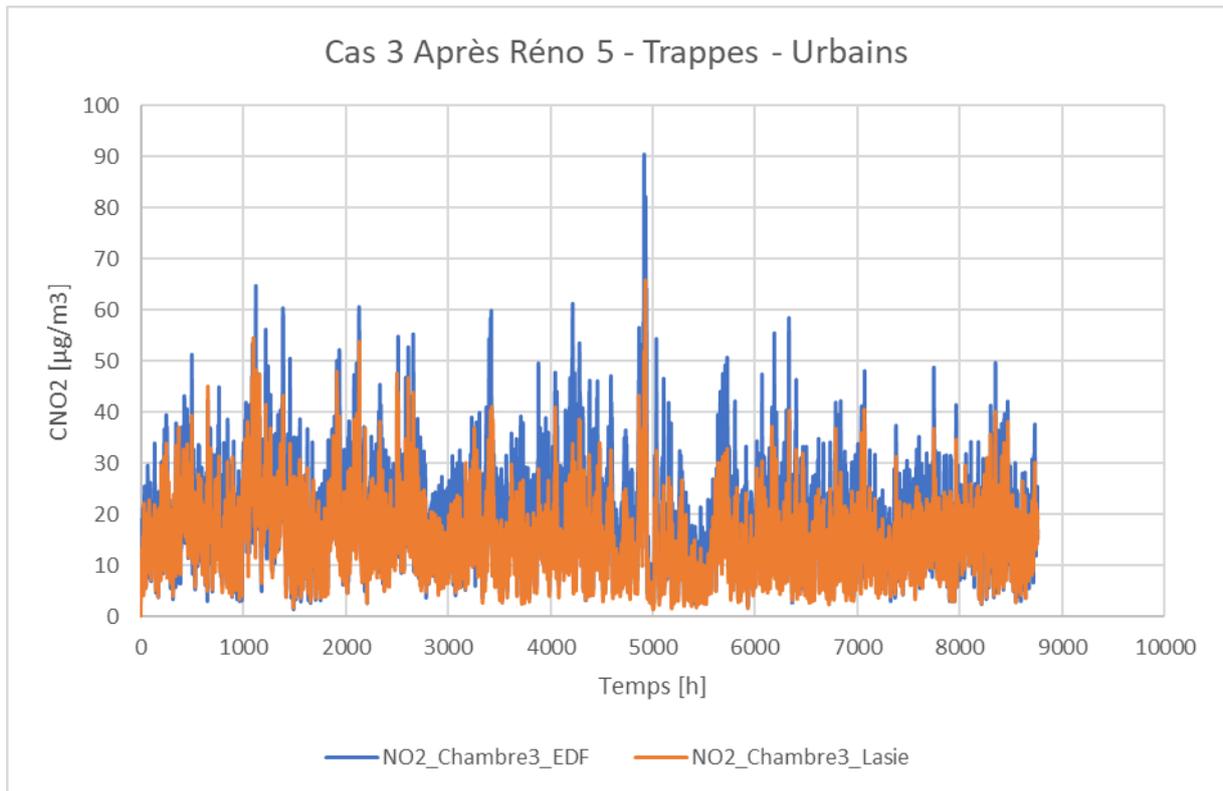


Figure 75 : Concentration de NO2 dans la Chambre 3 – Cas 3 après Réno #5.

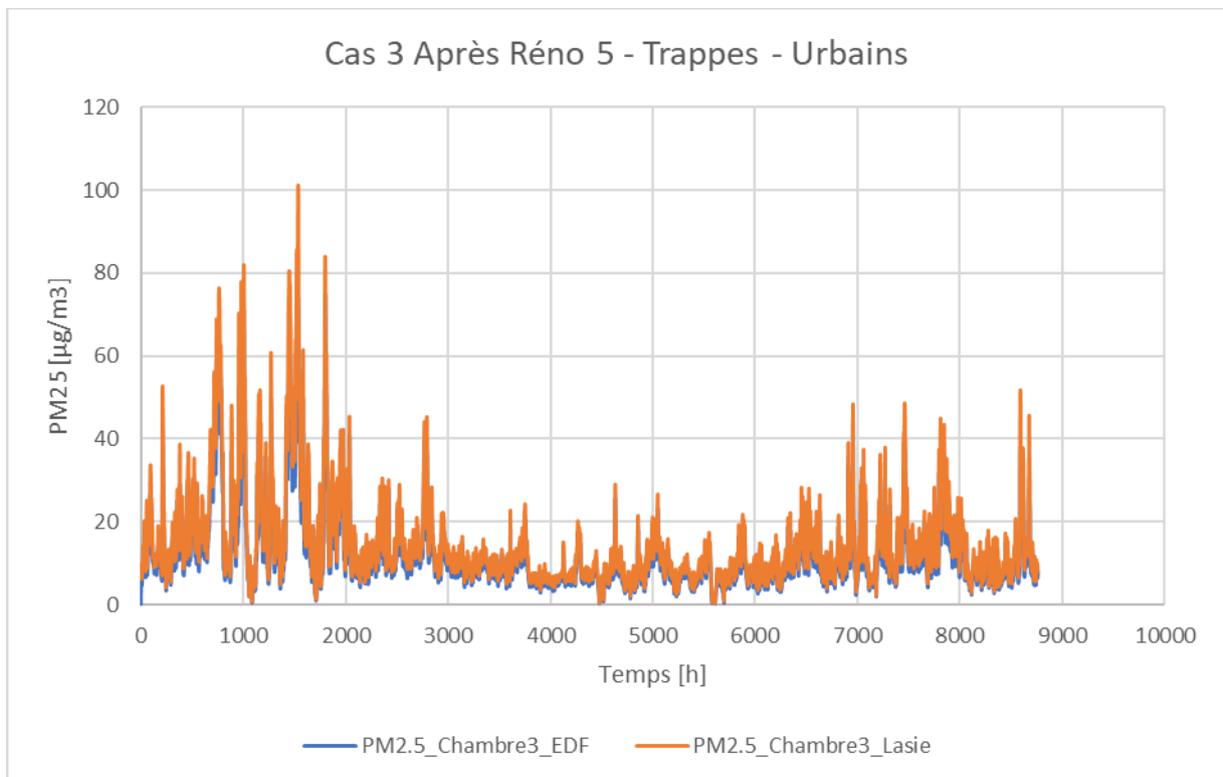


Figure 76 : Concentration de PM2,5 dans la Chambre 3 – Cas 3 après Réno #5.

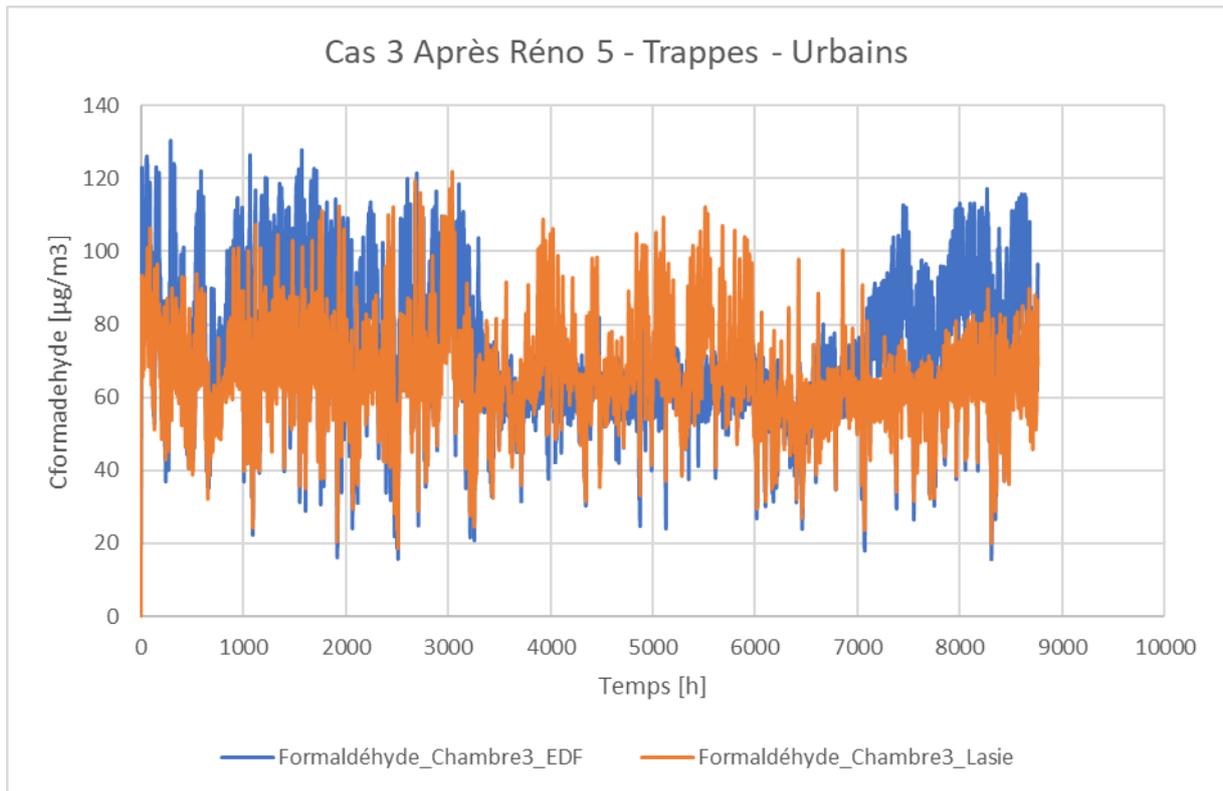


Figure 77 : Concentration de Formaldéhyde dans la Chambre 3 – Cas 3 après Réno #5.

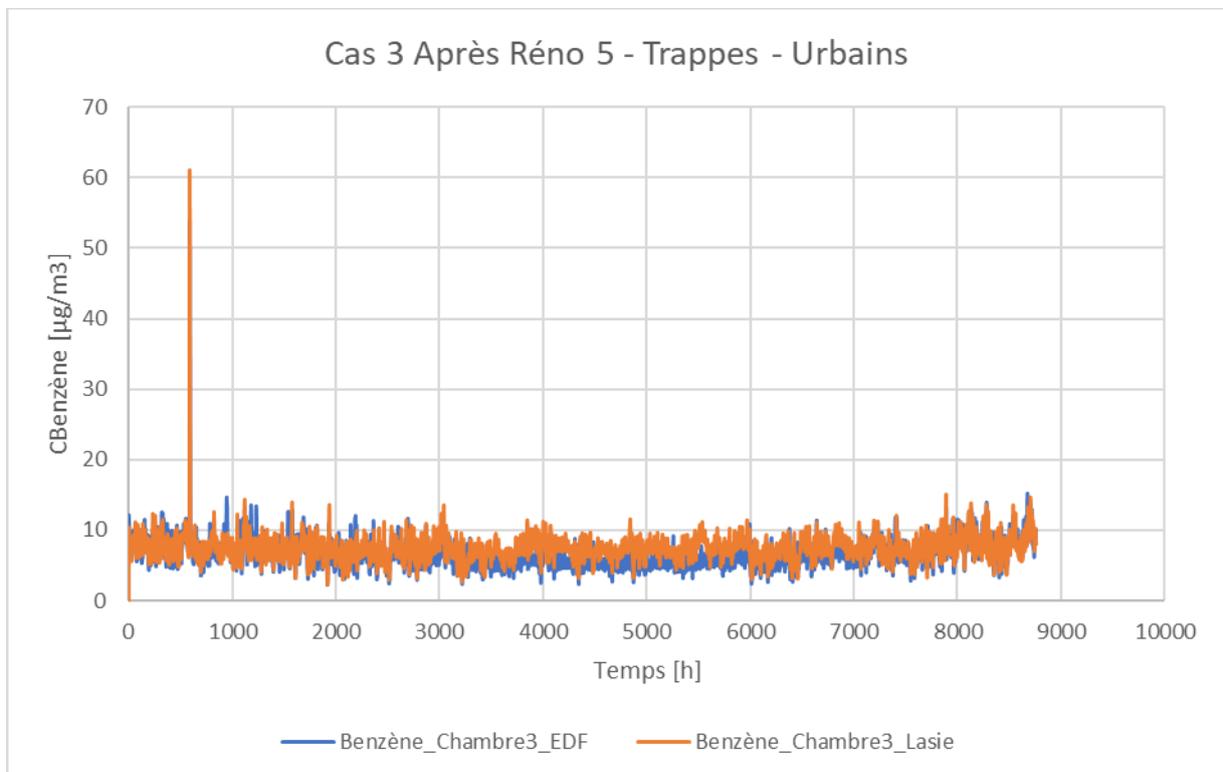


Figure 78 : Concentration de Benzène dans la Chambre 3 – Cas 3 après Réno #5.

## 5.5 Comparaison des indicateurs de confort thermique et de QAI

Afin de quantifier les effets des actions de rénovation sur le confort thermique et la QAI, un indicateur global (et des sous-indicateurs par année et saisons pour le confort thermique d'une part et la QAI d'autre part) ont été calculés. La méthodologie employée et l'ensemble des résultats sont présentés dans le Livrable de la tâche 5 de ce volet intitulé « T3.5 – Analyse du gain de confort et de QAI ». L'échelle des indicateurs varie de 0 (mauvais) à 100 (idéal) avec un code couleur de rouge à vert.

Nous reprenons dans les deux figures suivantes les tableaux d'indicateurs obtenus à partir des résultats de BuildSysPro (Figure 79) et de TRNSYS-CONTAM (Figure 80) pour le cas qui nous a servi de comparaison (Cas 3, zone climatique H1, pollution urbaine).

On observe que l'indicateur global varie de 74 pour l'état initial jusqu'à 82 pour le dernier bouquet pour BuildSysPro et de 69 à 80 pour TRNSYS-CONTAM. Rappelons que l'indicateur global est la moyenne des sous-indicateurs de confort thermique et de QAI. Ainsi, une observation un peu plus précise permet de remarquer que les valeurs des sous-indices de confort (année) sont très proches entre les deux environnements de simulation (de 71 à 76) conformément aux comparaisons précédentes montrant une prédiction très proche des conditions en température. La différence provient en fait de l'évaluation de la QAI pour lesquels le sous-indicateur annuel varie de 77 à 89 pour BuildSysPro et de 66 à 84 pour TRNSYS-CONTAM. Ainsi, TRNSYS-CONTAM prédit une QAI moins bonne que BuildSysPro ; ce qui a été observé sur les valeurs de concentration en polluants en moyenne supérieures pour TRNSYS-CONTAM en particulier pour les composés organiques volatils (formaldéhyde et benzène). Ainsi, on peut conclure que les deux environnements de simulation ne permettent pas de prédire de manière identique l'indicateur global de confort thermique et de QAI avec des différences pouvant aller jusqu'à 5 points.

Cependant, l'objectif du projet est de quantifier les actions de rénovation sur une échelle commune de confort thermique et de QAI. Ainsi, c'est la variation de cet indicateur entre l'état initial et une action de rénovation qui est importante. C'est l'objet des calculs présentés dans les cases de la colonne de droite. Ces calculs représentent la différence (positive en vert, négative en rouge) des indicateurs (et sous-indicateurs) entre l'état initial et les actions de rénovation. On remarque ainsi que les tendances positives ou négatives sont globalement identiques avec les deux environnements de simulation et que les valeurs de ces écarts restent très proches (0 à 3 points) ce qui montre que la quantification des effets des actions de rénovation sur le confort thermique et la QAI peut être effectué à partir de BuildSysPro et de TRNSYS-CONTAM.

Après 1975	#0 Etat Initial	<b>74</b>	71 55 78 91 59 77 70 80 81 75	Indicateur Année Hiver Printemps Eté Automne Confort QAI
Zone climatique H1	#1 Remplacement des ouvrants	<b>74</b>	72 56 80 89 63 77 70 80 82 76	<b>1</b> 1 1 2 -2 4 0 0 0 1 0
Urbaine	#2 Isolation des parois verticales	<b>75</b>	74 57 84 89 66 77 70 80 82 76	<b>2</b> 3 2 5 -2 7 0 0 0 1 0
	#3 Isolation des combles perdus	<b>74</b>	72 56 81 89 62 77 70 80 82 76	<b>1</b> 1 1 3 -2 4 0 0 0 1 0
	#4 Décoration - Finitions	<b>81</b>	71 55 78 91 59 90 80 97 98 87	<b>7</b> 0 0 0 0 0 14 10 17 17 12
	#5 Ventilation	<b>67</b>	71 56 79 90 60 62 43 70 64 71	<b>-7</b> 1 1 1 -1 1 -15 -27 -10 -17 -4
	Bouquet : #1 + #2 + #3 + #4	<b>83</b>	76 59 88 79 76 90 80 97 98 87	<b>9</b> 5 4 10 -12 17 14 10 17 17 12
	Bouquet : #1 + #2 + #3 + #4 + #5	<b>82</b>	76 60 89 75 78 89 77 96 95 87	<b>8</b> 5 5 -11 -16 -19 12 7 16 14 11

Figure 79 : Indicateurs de confort thermique et de QAI pour le Cas 3 (zone climatique H1, pollution urbaine) obtenus à partir des résultats de simulation de BuildSysPro (EDF) .

Après 1975	#0 Etat Initial	<b>69</b>	72 52 79 92 66 66 64 72 65 65	Indicateur Année Hiver Printemps Eté Automne Confort QAI
Zone climatique H1	#1 Remplacement des ouvrants	<b>69</b>	72 53 77 95 62 67 63 72 67 66	<b>0</b> 0 1 -2 3 -4 1 -1 1 1 1
Urbaine	#2 Isolation des parois verticales	<b>70</b>	74 54 83 87 73 67 63 72 66 65	<b>1</b> 2 2 4 -5 7 0 -1 0 1 0
	#3 Isolation des combles perdus	<b>70</b>	74 54 81 90 69 67 63 72 67 66	<b>1</b> 1 2 2 -2 4 0 -1 0 1 0
	#4 Décoration - Finitions	<b>79</b>	72 52 79 92 66 85 72 94 96 80	<b>9</b> 0 0 0 0 0 19 8 22 30 15
	#5 Ventilation	<b>63</b>	69 54 71 96 54 57 52 63 53 61	<b>-6</b> -3 2 -8 4 -12 -9 -12 -8 -13 -4
	Bouquet : #1 + #2 + #3 + #4	<b>80</b>	75 58 82 92 69 85 72 94 96 80	<b>11</b> 3 6 3 -1 3 19 8 22 30 15
	Bouquet : #1 + #2 + #3 + #4 + #5	<b>80</b>	76 59 83 91 70 84 74 92 92 80	<b>11</b> 3 7 4 -2 4 18 10 20 26 15

Figure 80 : Indicateurs de confort thermique et de QAI pour le Cas 3 (zone climatique H1, pollution urbaine) obtenus à partir des résultats de simulation de TRNSYS-CONTAM (LaSIE) .

## Conclusion/Synthèse

Ce livrable décrit les 3 cas envisagés dans l'étude du volet 3, toutes les caractéristiques thermiques, aérauliques et les scénarii d'occupation, d'émissions de polluants et de fonctionnement des systèmes, et précisent les 7 opérations de rénovation qui ont été utilisés pour effectuer les simulations numériques 0D/1D dont l'analyse des résultats a permis de calculer des indices de confort thermique et de QAI pour quantifier les effets d'opérations de rénovation sur des bâtiments résidentiels. Les résultats de ces simulations ont alors été utilisés pour calculer des indicateurs de confort et de QAI. Ce travail fait l'objet du livrable T3.5 – Analyse du gain de confort et de QAI.

Deux environnements de simulation BuidlSysPro et Trnsys-Contam ont été utilisés pour effectuer l'ensemble des simulations numériques après la réalisation d'une phase de consolidation des résultats présentés dans ce rapport. Malgré un cahier des charges très précis, les valeurs prédites par les deux environnements présentent quelques différences dont l'impact sur le calcul des indicateurs de confort et de QAI est faible (Figure 79 et Figure 80).

Les travaux présentés dans ce livrable et dans le livrable T3.5 permettent de démontrer qu'il a été possible par la simulation 0D/1D de définir et calculer des indicateurs qui permettent in fine de quantifier les impacts d'opération de rénovation sur le confort thermique et sur la qualité de l'air intérieur.

## Références

- C. Dimitroulopoulou, M.R. Ashmore, M.T.R. Hill, M.A. Byrne, R. Kinnersley, INDAIR: A probabilistic model of indoor air pollution in UK homes, *Atmospheric Environment*, Volume 40, Issue 33, 2006, Pages 6362-6379.
- Cong Liu, Jiayu Yang, Siyu Ji, Yuxin Lu, Peichan Wu, Chun Chen, Influence of natural ventilation rate on indoor PM2.5 deposition, *Building and Environment*, Volume 144, 2018, Pages 357-364.
- Cony Renaud-Salis L., Ramalho O., Abadie M. Towards the definition of an indoor air quality index for residential buildings based on long- and short-term exposure limit values. *International journal of ventilation*, VEETECH, 2019, pp.1-12.
- Dols WS, Emmerich SJ et Polidoro BJ. 2016. « Coupling the multizone airflow and contaminant transport software CONTAM with EnergyPlus using co-simulation ». *Building Simulation*, vol. 9, no 4, p. 469-479.
- Klein S, Beckman W, Mitchell J, Duffie J, Freeman T, Brau J, Evans B, Kummer J, Urban R, Fiksel A, Thornton J, Blair N, Williams P, Bradley D, McDowell T et Kummert M. 2017. TRNSYS 18 - A TRaNsient System Simulation program: User manual.
- Long CM, Suh HH, Catalano PJ, Koutrakis P. Using time- and size-resolved particulate data to quantify indoor penetration and deposition behavior [published correction appears in *Environ Sci Technol* 2001 Nov 15;35(22):4584]. *Environ Sci Technol*. 2001;35(10):2089-2099.
- Picard, C.F., Elghazi, A., Abadie, M.O., Limam, K., Wall-Ribot, B., & Duforestel, T., 2018. Can modeling tools be a reliable source of information on IAQ with only a limited set of data on the studied case? *Proceedings of Indoor Air 2018*.
- Picard, C.F., Rigault, B., Abadie, M.O., Limam, K., Wall-Ribot, B., & Duforestel, T., 2018. Modélothèque « Qualité de l'Air Intérieur » de BuildSysPro : nouveaux développements et application au benchmark ST5-1 de l'Annexe 68. *Proceedings of IBPSA 2018*.
- Picard CF., 2019. Développement de méthodes et d'outils associant la modélisation numérique et des mesures in situ afin de concilier la qualité de l'air intérieur et l'efficacité énergétique. Thèse de doctorat, Université de la Rochelle. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02781482>.
- Plessis, G., Keammerlen, A., & Lindsay, A., 2014. BuildSysPro: a Modelica library for modelling building and energy systems. *Proceedings of the 10th International Modelica Conference*.
- Tourreilles C., 2015. Qualification énergétique et sanitaire des systèmes d'épuration intégrés aux réseaux de ventilation. Thèse de doctorat, Université de la Rochelle. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01373408/document>.
- Schumann, M., Charrier, B., Plessis, G., & Wall-Ribot, B., 2016. BuildSysPro : une bibliothèque Modelica open-source pour l'énergie des bâtiments et des quartiers. *Proceedings of IBPSA*.

## ANNEXE A : Description des équipements de chauffage et des systèmes de ventilation

### Systèmes de chauffage

Pour les besoins du volet 3 du projet Smart Réno, il n'a pas été nécessaire de simuler des systèmes de chauffage en détails. Ainsi dans les simulations, seules des puissances de chauffage dans chaque pièce et pour chaque cas ont été prises en compte. Ces puissances ont été calculées à partir du logiciel Perrenoud. Les puissances appliquées pour chaque cas sont résumées dans les tableaux ci-dessous.

Tableau 28 : Puissances de Chauffage par pièce pour le Cas 1.

Zone	Puissance installée (W)
Séjour	6750
Cuisine	1250
SdB-Rdc	1000
Entrée	1600
Chambre 1	1700
Chambre 2	2000
Chambre 3	1500
SdB-1 <sup>er</sup> étage	1000
Escalier	1600

Tableau 29 : Puissance de Chauffage par pièce pour le Cas 2.

Zone	Puissance installée (W)
Séjour	6750
Cuisine	1250
Chambre 1	1700
Chambre 2	2000
Chambre 3	1500
SdB/WC	1000
Entrée	1600

Tableau 30 : Puissance de chauffage pour le Cas 3.

Zone	Puissance installée (W)
Séjour	5250
Cuisine	750
Chambre 1	1250
Chambre 2	1250
Chambre 3	1250
SdB/WC	750
Entrée	1250

## Températures de consigne de chauffage

A partir des températures de consignes du Tableau 31 issues de l'étude CREDOC (Centre de recherche pour l'Etude et l'Observation des Conditions de Vie) à partir de sondages (5365 données collectées en 2013), nous avons fait le choix de retenir une unique **température de consigne de 20 °C** pour toutes les zones climatiques et pour les trois cas considérés dans notre étude. Nous avons également fait l'hypothèse qu'en période d'inoccupation et la nuit la température de consigne était de 16°C.

Tableau 31 : Moyennes des températures de consigne en zone jour pour les logements individuels des différentes zones climatiques en fonction de l'âge du bâtiment et d'actes de rénovation (Données statistiques par sondages - source PHEBUS).

		H1	H2	H3
<b>Avant 45</b>	Avant rénovation	19,8	19,7	20,9
	Après rénovation	20,0	19,3	19,9
<b>45-70</b>	Avant rénovation	19,9	19,2	20,4
	Après rénovation	20,0	19,7	20,0
<b>Après 70</b>	Avant rénovation	20,0	19,8	20,2
	Après rénovation	20,3	19,9	20,5

Tableau 32 : Scénari de température de consigne.

Heure	Cas 1, Cas 2 et Cas 3 Avant Rénovation		Cas 1, Cas 2 et Cas 3 Après Rénovation
	Séjour/Cuisine/SdB/Entrée	Chambres 1, 2 et 3	Séjour/Cuisine/SdB/Entrée/Chambres 1,2 et 3
0-1H	20	16	16
1-2H	20	16	16
2-3H	20	16	16
3-4H	20	16	16
4-5H	20	16	16
5-6H	20	16	16
6-7H	20	16	20
7-8H	20	16	20
8-9H	20	16	20
9-10H	20	16	20
10-11H	20	16	20
11-12H	20	16	20
12-13H	20	16	20
13-14H	20	16	20
14-15H	20	16	20
15-16H	20	16	20
16-17H	20	16	20
17-18H	20	16	20
18-19H	20	16	20
19-20H	20	16	20
20-21H	20	16	20
21-22H	20	16	20
22-23H	20	16	16
23-24H	20	16	16

## Systèmes de ventilation

Il a été choisi dans les trois modèles de maisons individuelles des ventilations « naturelles » par infiltrations (cas 1), par conduits (cas 2) et une ventilation simple flux autoréglable (cas 3). Le choix de rénovation s'est quant à lui porté sur une ventilation simple flux hygro B. Un exemple de localisation des entrées d'air et des bouches d'extraction est présenté pour le cas 2 en Figure 81. Pour tous les cas de ventilation mécanique, les mêmes scénarios de ventilation sont considérés pour les jours de la semaine et le week-end c'est-à-dire un débit forcé pendant 1h par jour en cuisine et un débit de base le reste du temps.

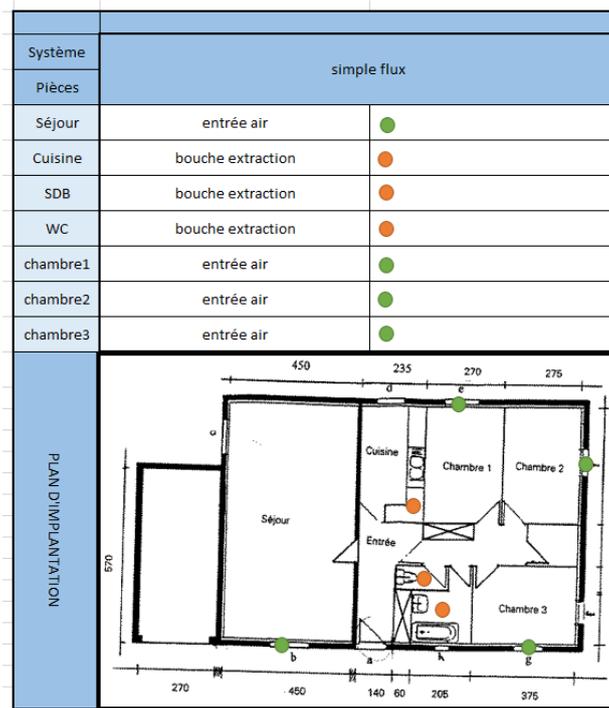


Figure 81 : Exemple d'implémentation des entrées d'air et bouches d'extraction pour la ventilation naturelle par duit (et pour la ventilation mécanique hygroréglable en rénovation) pour le cas 2.

### Ventilation mécanique simple flux autoréglable (cas 3, avant rénovation) :

Les deux tableaux suivants présentent les débits d'extraction dans les pièces de services et la localisation des entrées d'air de la ventilation mécanique simple flux autoréglable conformément à la réglementation. A titre illustratif, la Figure 82 présente la loi débit-pression d'un module d'entrée d'air M30.

Tableau 33 : Débits d'extraction pour la ventilation mécanique simple flux autoréglable.

	Extraction (m <sup>3</sup> /h)
<b>Cuisine</b>	45/120*
<b>SdB+WC</b>	30+30
<b>mini</b>	105
<b>max</b>	180

\*45 m<sup>3</sup>/h petit débit, 120 m<sup>3</sup>/h grand débit, même en inoccupation.

Tableau 34 : Modules d'entrée d'air pour la ventilation mécanique simple flux autoréglable.

	Modules d'entrée d'air sous $\Delta P=20\text{Pa}$ ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	Placement
Salon	2 x 22	Façades ouest et sud
Chambre 1	1 x 30	Façade nord
Chambre 2	1 x 30	Façade est
Chambre 3	1 x 30	Façade est
<b>(somme)</b>	<b>(134)</b>	

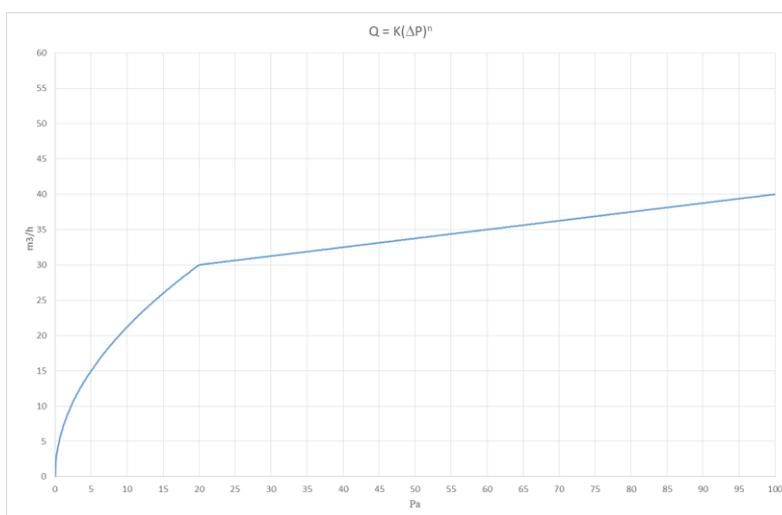


Figure 82 : Loi débit-pression d'un module M30 (module autoréglable).

### Ventilation mécanique simple flux hygroréglable B (tous les cas après rénovation) :

On se référera à l'Avis Technique CSTB « Avis\_technique\_HygroB\_individuel\_AO4172279\_V2.pdf » concernant la VMC Hygro individuelle ATLANTIC, où l'on trouve les règles de dimensionnement des bouches d'entrées d'air et d'extraction (cuisine + SdB/WC), annexe B.3. Le premier extrait de l'avis technique (Figure 83) présente les caractéristiques des entrées d'air hygroréglables implémentées au niveau de chaque pièce principale. Les trois autres extraits de l'avis technique présentent les caractéristiques des bouches d'extraction hygroréglables placées en cuisine (Figure 84), en SdB (Figure 85) et dans les WC (Figure 86).

Valeurs d'humidité relative (% HR)		Différences de pression								
		de caractérisation (ou essai)			calculée			calculée		
		20 Pa			10 Pa			4 Pa		
		Débit en m <sup>3</sup> /h	Tolérance mini en m <sup>3</sup> /h	Tolérance maxi en m <sup>3</sup> /h	Débit en m <sup>3</sup> /h	Tolérance mini en m <sup>3</sup> /h	Tolérance maxi en m <sup>3</sup> /h	Débit en m <sup>3</sup> /h	Tolérance mini en m <sup>3</sup> /h	Tolérance maxi en m <sup>3</sup> /h
HR <sub>min</sub>	50 +/-5	5	-0,0	+4,2	3,5	-0,0	+3,0	2,2	-0,0	+1,9
HR <sub>max</sub>	65 +/-5	45	-0,0	+6,8	31,8	-0,0	+4,8	20,1	-0,0	+3,0

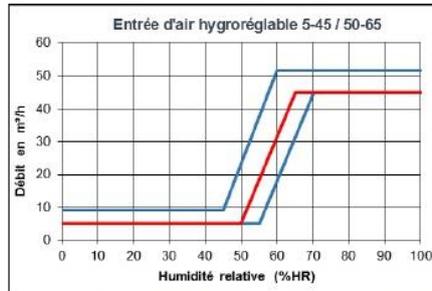


Figure 7 - Entrée d'air hygro-réglable 5-45 / 50-65 (EH)  
Caractéristiques hydroaérauliques pour une différence de pression de 20 Pa

Figure 83 : Entrées d'air hygro-réglables.

Caractéristiques aérauliques												[1]	[2]
Qmin	Qmax	HRmin	HRmax	Qtemp		Tolérances							
				débit	durée	pour Qmin	pour Qmax	pour Qtemp		pour HRmin et HRmax			
sous 80 Pa				sous 70 Pa		débit sous 80 Pa		débit sous 70 Pa	durée				
(m <sup>3</sup> /h)	(m <sup>3</sup> /h)	(%)	(%)	(m <sup>3</sup> /h)	(min)	(m <sup>3</sup> /h)	(m <sup>3</sup> /h)	(m <sup>3</sup> /h)	(min)				
BHC 10/40-90	10	40	50	80	90	30	-0 +3	-0 +12	-0 +27	+/- 6	+/- 5%	35	55
BHC 10/45-135	10	45	20	55	135	30	-0 +3	-0 +13,5	-0 +40,5	+/- 6	+/- 5%	35	55

[1] Lw à 136 Pa et 60%HR ; pour les valeurs de Lw à d'autres pressions de fonctionnement et/ou d'autres débits, se reporter à la documentation technique

[2] Dn,e,w(C)

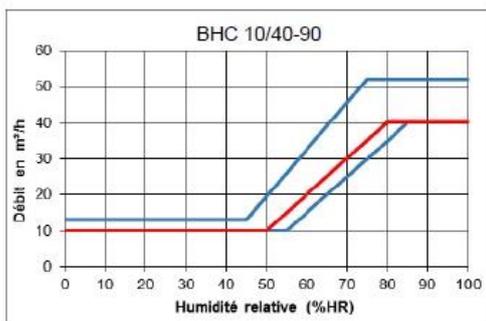


Figure 17 - BHC 10/40-90 (50-80 % HR)

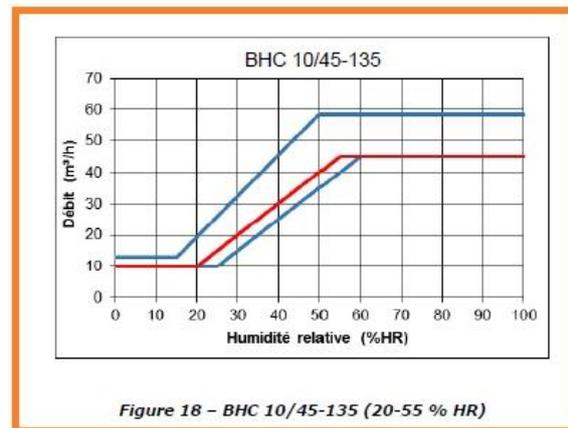


Figure 18 - BHC 10/45-135 (20-55 % HR)

Figure 84 : Bouche d'extraction d'air hygro-réglable placée en cuisine.

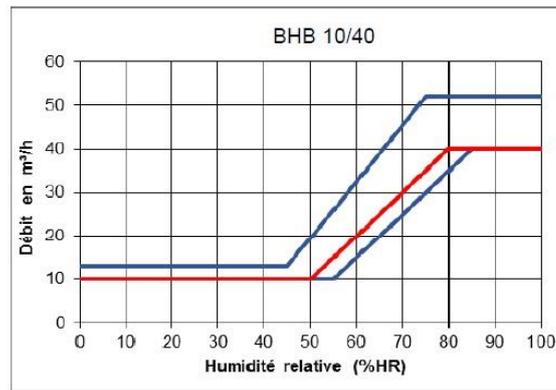


Figure 22 – BHB 10/40 (50-80 % HR)

Figure 85 : Bouche d'extraction d'air hygroréglable placée en SdB.

Caractéristiques aérauliques pour une différence de pression de 80 Pa											[1]	[2]
Qmin	Qmax	HRmin	HRmax	Qtemp [3]		Tolérances						
				débit	durée	pour Qmin	pour Qmax	pour Qtemp		pour HRmin et HRmax		
(m³/h)	(m³/h)	(%)	(%)	(m³/h)	(min)	(m³/h)	(m³/h)	(m³/h)	(min)		dB(A)	dB
BAW 5-30	5			30	30	-0 +3		-0 +9	+/- 6		35	

Figure 86 : Bouche d'extraction d'air hygroréglable placée dans les WC.

### Scénarii de débits de ventilation des deux systèmes mécaniques :

Le tableau suivant présente les débits de ventilation des systèmes autoréglable et hygroréglable au pas de temps de 30 min.

Tableau 35 : débits de ventilation des systèmes autoréglable et hygroréglable.

Cf: occupations jour type semaine/ type weekend

		Débits (en m3/h)					
		VMC autoréglable (avant rénovation)			VMC hygroréglable B (après rénovation)		
		Extractions d'air			Extractions d'air		
		Cuisine	Salle de bain	WC	Cuisine	Salle de bain	WC
H o r a i r e s	[0h00 - 0h30[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[0h30 - 1h00[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[1h00 - 1h30[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[1h30 - 2h00[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[2h00 - 2h30[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[2h30 - 3h00[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[3h00 - 3h30[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[3h30 - 4h00[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[4h00 - 4h30[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[4h30 - 5h00[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[5h00 - 5h30[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[5h30 - 6h00[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[6h00 - 6h30[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[6h30 - 7h00[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[7h00 - 7h30[	45	30	30	10-45	10 - 40	30
	[7h30 - 8h00[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[8h00 - 8h30[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[8h30 - 9h00[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[9h00 - 9h30[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[9h30 - 10h00[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[10h00 - 10h30[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[10h30 - 11h00[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[11h00 - 11h30[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[11h30 - 12h00[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[12h00 - 12h30[	120	30	30	135	10 - 40	5
	[12h30 - 13h00[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[13h00 - 13h30[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[13h30 - 14h00[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[14h00 - 14h30[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[14h30 - 15h00[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[15h00 - 15h30[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[15h30 - 16h00[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[16h00 - 16h30[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[16h30 - 17h00[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[17h00 - 17h30[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[17h30 - 18h00[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[18h00 - 18h30[	45	30	30	10-45	10 - 40	30
	[18h30 - 19h00[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[19h00 - 19h30[	120	30	30	135	10 - 40	5
	[19h30 - 20h00[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[20h00 - 20h30[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[20h30 - 21h00[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[21h00 - 21h30[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[21h30 - 22h00[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[22h00 - 22h30[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[22h30 - 23h00[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[23h00 - 23h30[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
	[23h30 - 0h00[	45	30	30	10-45	10 - 40	5
		débit mini total =105 m3/h					

## ANNEXE B : Synthèse des réflexions concernant l'évaluation des indices de confort thermique et de QAI pour les simulations

Les indices permettant l'évaluation de la Qualité Environnementale Intérieure (QEI) ont été présentés dans le livrable 3.3 « Définition des indicateurs de confort ». Ce livrable visait à définir de manière globale, exhaustive, les différents paramètres et variables nécessaires à l'estimation de la QEI et leurs relations avec les actions de rénovations énergétiques des maisons individuelles. Ainsi, les principales composantes de la QEI ont été analysées : confort hygrothermique, qualité de l'air intérieur, confort acoustique et confort visuel. Les phases suivantes du projet Smart-Réno, aussi bien les études numériques et expérimentales des tâches 4, 5 et 6, sont quant à elles focalisées sur les deux premières composantes c'est-à-dire sur le confort hygrothermique et la QAI. Nous ne minorons pas pour autant le rôle que peuvent jouer les confort acoustique et visuel dans le cadre de rénovations énergétiques. Des études complémentaires et indépendantes des développements ici effectués pourront être néanmoins effectuées a posteriori des études de Smart-Réno.

### Indices de Confort Thermique

Ces indices sont décrits en détail au sein du livrable 3.3.

Le Tableau 36 récapitule la liste des indicateurs de confort hygrothermique décrits et des principales variables et principaux paramètres spécifiques à ces indicateurs. L'ensemble de ces indicateurs peuvent être évalués en phase de simulation.

Concernant les modèles thermophysiques, le modèle de Gagge doit permettre de calculer, avec un faible coût en temps de calcul, les indicateurs de confort SET et ET\* permettant de substituer aux indicateurs PMV-PPD adaptés à des conditions d'ambiance stables (en hiver ici grâce au chauffage et au maintien d'une température constante) les indicateurs PMV\*-PPD\* utilisables pour des conditions variables (périodes sans chauffage comme le printemps et l'automne). En ce qui concerne le confort d'été, au début du programme Smart-Réno, il semblait pertinent de privilégier la DIES, potentiellement associée aux prochaines réglementations, par rapport à la Tic. Les avancées et évolutions de la RE2020 nous amènent à ne considérer plus que les degré-heures d'inconfort (DH) qui reste le seul critère de confort d'été réglementaire. Un dernier critère a priori nécessaire à notre étude pour refléter au mieux l'effet d'une rénovation concerne l'effet de paroi froide/chaude induit par le passage d'un simple à un double/triple vitrage et/ou une augmentation de l'isolation des parois. Ainsi, le critère d'inconfort induit par l'asymétrie de rayonnement, calculé ici à partir de la différence entre la surface la plus froide/chaude et la température d'air intérieur, est ajouté à nos critères. Pour résumer, les indicateurs évalués sont : PMV-PPD (hiver/saison avec chauffage), PMV\*-PPD\* (saisons intermédiaires c'est-à-dire printemps et automne), DH (été) et inconfort induit par l'asymétrie de rayonnement (toutes les saisons).

Ces calculs seront effectués en post-traitement à partir des différentes variables (températures d'air et radiante moyenne, humidité relative...) évaluées par la simulation.

Tableau 36 : Tableau récapitulatif des indicateurs de confort hygrothermique décrits et des principaux paramètres et variables spécifiques à ces indicateurs.

Variables (en gras) ou paramètres spécifiques	Indicateurs décrits										
	PMV	PPD	Cour. Air	Asym. Ray.	T <sub>op</sub>	DH	DIES	ET*/SET	PMV*-PPD*	IADI	WBGT
<b>T<sub>a</sub> température de l'air (K)</b>	x	X	x		x	x	x	X	x	x	
T <sub>r</sub> température de rayonnement du corps (K)	x	x					x	x	x		
<b>p<sub>v</sub> pression partielle en vapeur d'eau (Pa)</b>	x	x					x	x	x	x	
<b>v<sub>air</sub> vitesse relative de l'air (m.s<sup>-1</sup>)</b>	x	x	x				x	x	x		
I <sub>cl</sub> est l'isolement thermique du vêtement (m <sup>2</sup> .K.W <sup>-1</sup> )	x	x					x	x	x		
h <sub>c</sub> coefficient de transfert de chaleur par convection (W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> )	x	x			x	x	x	x	x		
M production de chaleur métabolique M (W.m <sup>-2</sup> )	x	x					x	x	x		
σ <sub>v</sub> écart-type de la distribution des vitesses d'air ou turbulence absolue (m.s <sup>-1</sup> ).			x								
<b>Δt<sub>pr</sub> différence de température entre la paroi froide et la paroi chaude</b>				x							
<b>t<sub>sol</sub> température de surface du plancher bas (K)</b>				x							
<b>température extérieure moyenne journalière glissante (K)</b>	x	x					x				
<b>T<sub>rm</sub> température radiante moyenne de la pièce (K)</b>					x	x	x				
h <sub>r</sub> coefficient linéarisé de transfert de chaleur par rayonnement (W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> )					x	x	x				
Paramètres du modèle du Gagge								x	x		
T <sub>w</sub> température humide naturelle (K)											x
T <sub>gn</sub> température humide naturelle (K)											x

PMV : Predicted Mean Vote, PPD : Predicted Percentage of Dissatisfied, Cour. Air : courant d'air, Asym. Ray. : asymétrie de rayonnement, T<sub>op</sub> : Température opérative, Tic : température intérieure conventionnelle, DH : Degré heure d'inconfort, DIES : Durée d'Inconfort d'Eté Statistique, ET\* : température effective, SET : température effective standard, IADI : Indoor Air Discomfort Index.

## Indices de QAI

Ces indices sont décrits en détail au sein du livrable 3.3.

Le Tableau 37 récapitule les indicateurs de QAI décrits précédemment. Comme pour la partie sur le confort hygrothermique, le livrable 3.3 visait à recenser l'ensemble des indicateurs de QAI pouvant être utilisé à partir des données de concentrations obtenus soit par la simulation numérique, soit par la mesure in situ, soit par les deux. Cependant, Cony et al. (2019) ont montré que la plupart des indicateurs cités ne permettaient pas de prendre en considération l'effet réel de chacun des polluants lors de leur agrégation pour le calcul d'un indicateur unique. Les auteurs ont ainsi proposé un nouvel indicateur, ULR-QAI, corrigeant ce défaut principal et étant applicable à un nombre illimité de polluants. Cependant, cet indicateur, comme tous ceux présentés dans le tableau (à part le DALY),

repose sur la comparaison des concentrations en polluants à des valeurs de référence comme les Valeurs Guides de l'Air Intérieur (VGAI) définies par l'ANSES. Une autre voie d'évaluation des effets des polluants est également possible, l'évaluation du DALY. Largement utilisée dans le monde médical, elle consiste à déterminer le nombre d'années de vie perdues en bonne santé à cause de maladies et/ou d'une mortalité précoce consécutives à l'exposition aux polluants.

En ce qui concerne les polluants cibles de notre étude, la liste du tableau a été dressée en fonction des hiérarchisations effectuées en particulier par l'Observatoire de la QAI pour les résidences françaises. Parmi ces polluants, certains sont écartés par leurs caractères spécifiques. Ainsi, le Radon ne sera pas pris en compte car il est d'une part spécifique à des territoires particuliers et d'autre part son étude numérique requiert des caractéristiques d'interface sol-bâtiment faisant intervenir de nombreux paramètres difficiles à quantifier (localisation et concentration de la source de Radon, perméabilité à l'air et coefficient de diffusion du sol, structure et perméabilité des fondations...). A l'heure actuelle, seule la mesure sur site est possible.

Le développement de moisissures dans l'habitat est lié soit au maintien d'une humidité relative de l'air élevée induisant des conditions en surface des matériaux de construction favorables soit à des matériaux fortement humides lié à des infiltrations d'eau liquide. L'objet des simulations numériques effectuées ici ne traitent pas des malfaçons en termes de rénovation (focus du volet 1 du programme Smart-Réno). La problématique des moisissures n'est donc pas incluse ici.

De même, les dangers bien réels du monoxyde de carbone (CO) dans l'habitat sont essentiellement liés à des équipements à gaz mal réglés ; le CO est donc exclu de l'étude. Comme pour le Radon et compte tenue de la multiplicité des sources bactériennes dans l'habitat, seule la mesure in situ permet réellement d'évaluer le nombre d'unité formant colonie de bactéries dans l'air intérieur qui ne peuvent être modélisées numériquement.

Les COVT ne sont pas un polluant en particulier mais un moyen d'exprimer l'ensemble des polluants présent par rapport à une équivalence à polluant de référence (équivalent iso butylène ou toluène). Pour modéliser correctement les COVT, il serait nécessaire de modéliser l'ensemble des COV présents dans l'air (plusieurs centaines) avec leurs sources propres et les interactions avec, en particulier, les matériaux présents. C'est inimaginable dans l'état actuel des connaissances. Il existe des approches nécessitant le calage de paramètres uniquement mesurés in-situ, sur des cas particuliers et qui, à ce jour, n'ont pas pu être globalisées pour leur utilisation en simulation numérique. Les COVT sont donc exclus de notre étude.

Enfin, l'Acroléine apparaît dans les hiérarchisations les plus anciennes qui prennent en compte le fait de fumer des cigarettes à l'intérieur. Le choix est ici fait d'exclure cette activité de notre étude car l'effet d'une rénovation incluant une amélioration de la ventilation n'aura aucun effet sur la QAI en présence de fumeurs tant cette source de polluant est prépondérante sur l'ensemble des autres polluants.

Ainsi, les polluants pris en compte dans les simulations seront : PM<sub>2,5</sub> (polluant d'origine intérieure et extérieure ; les PM<sub>10</sub> sont exclues car les PM<sub>2,5</sub> sont un bien meilleur indicateur de la QAI), NO<sub>2</sub> (polluant essentiellement extérieur), Formaldéhyde, Benzène et Toluène (COV, sources essentiellement intérieures) et CO<sub>2</sub> (qui permet la vérification de l'adéquation de la ventilation/aération par rapport aux occupants, évaluation du confinement).

Pour résumer, seuls deux indicateurs de santé (ULR-QAI et DALY) seront calculés en post-traitement des concentrations de polluants (PM<sub>2,5</sub>, NO<sub>2</sub>, Formaldéhyde, Benzène, Toluène et CO<sub>2</sub>) obtenues par la simulation numérique.

Tableau 37 : Tableau récapitulatif des indicateurs de QAI décrits et des principaux paramètres et variables spécifiques à ces indicateurs. Un « o » signifie que la variable est facultative pour le calcul de l'indicateur. Les variables en rouges sont les variables citées précédemment mais dont la prise en compte dans ce projet n'est pas prévue, leur présence permet cependant d'évaluer l'impact de leur absence sur le calcul de certains indicateurs.

Variables (en gras) ou paramètres spécifiques x pour obligatoire, o pour facultatif pour le calcul de l'indicateur associé	Indicateurs décrits										
	LHVP	Clim 2000	BILGA	GAPI	IAP1	QUAD-BBC	DALY	IQAI	ICONE	ULR-QAI	IADI
[CO] concentration en monoxyde de carbone (ppm)	x	x	o	o	o		o	x		o	
[CO <sub>2</sub> ] concentration en dioxyde de carbone (ppm)	x	x	o	o	o	x	o	x	x	o	
<b>DTB dénombrement total bactérien (UFC/m<sup>3</sup>)</b>	x				o		o	x			
<b>Moisissures</b>					o		o	x			
[NO <sub>2</sub> ] concentration en dioxyde d'azote (mg/m <sup>3</sup> )		x	o	o	o		o	x		o	
[HCHO] concentration en formaldéhyde (mg/m <sup>3</sup> )		x	o	o	o	x/o	o	x		o	
<b>[C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>] concentration en Toluène (mg/m<sup>3</sup>)</b>			o	o	o		o			o	
<b>[C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>] concentration en Benzène (mg/m<sup>3</sup>)</b>			o	o	o		o			o	
TVOC					o			x			
<b>Concentration en Acroléine (mg/m<sup>3</sup>)</b>			o	o	o		o			o	
<b>Concentration en PM<sub>2,5</sub> (mg/m<sup>3</sup>)</b>					o	x	o			o	
<b>Concentration en PM<sub>10</sub> (mg/m<sup>3</sup>)</b>					o						
<b>Radon</b>			o			x	o	x		o	
<b>Humidité relative</b>						x					
Valeurs à Risques Limités (VRL)			x								
la Valeur à Risques Importants (VRI)			x								
$W_i$ est le coefficient d'impact du COV $i$ (FDS)				x							
Concentrations minimales et maximales issues de l'étude BASE ou de l'étude de référence choisie					x						
Pop la population exposée							x				
$y_0$ niveau de prévalence de la maladie par an (-)							x				
$\beta$ est le coefficient de changement de concentration							x				
VGAI à court et long terme										x	

