



Contribution à la modélisation microclimatique des situations hivernales en milieu urbain

Abderrahmen Khalifa

► To cite this version:

Abderrahmen Khalifa. Contribution à la modélisation microclimatique des situations hivernales en milieu urbain. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Lorraine, 2015. Français. <NNT : 2015LORR0295>. <tel-01692351v2>

HAL Id: tel-01692351

<https://hal.science/tel-01692351v2>

Submitted on 25 Jan 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Université de Lorraine

École Doctorale Ressources, Procédés, Produits et Environnement

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du grade de

Docteur de l'Université de Lorraine

Spécialité : Mécanique – Génie Civil

Abderrahmen KHALIFA

Contribution à la modélisation microclimatique des situations hivernales en milieu urbain

Soutenue publiquement le 9 octobre 2015 devant le jury

Youssef DIAB, Professeur

Valéry MASSON, ICPEF Chercheur

Pierre RIBSTEIN, Professeur

Yves CANDAU, Professeur

Ludovic BOUILLOUD, Docteur

Katia CHANCIBAULT, Docteur

Michel BUÈS, Professeur

Mario MARCHETTI, Docteur (HDR)

Morgane COLOMBERT, Docteur

Julien BOUYER, Docteur

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Examineur

Examineur

Co-directrice

Directeur

Co-Directeur

Invitée

Invité

Remerciements

*Soyons reconnaissants aux personnes qui nous donnent
du bonheur ; elles sont les charmants jardiniers
par qui nos âmes sont fleuries.*

Marcel Proust

*« Je fais partie des personnes qui croient mordicus qu'il n'y a de force ni de puissance que par Dieu
« ALLAH ». Cela étant, je commence par Le remercier d'avoir eu la bonté de m'entourer de personnes
formidables qui ont, chacune à leur façon, et ce, à différentes étapes de mon cheminement, contribué, d'une
manière ou d'une autre, à la réalisation de cette thèse de doctorat ».*

Je tiens à remercier l'IFSTTAR et Météo-France pour avoir fait le choix d'assurer le support financier et avoir mis en œuvre les moyens nécessaires à la réalisation de ce travail. Je remercie aussi Météo-France pour m'avoir donné la licence d'utiliser le modèle TEB afin d'aboutir aux objectifs de cette thèse. Egalement, je remercie la Direction Territoriale Est du Cerema (ex-CETE de l'Est) pour m'avoir accueilli et de m'offrir les conditions de travail nécessaires pour le bon déroulement de ce travail. Je remercie le laboratoire Géoressource de l'Université de Lorraine d'avoir accepté de m'avoir accueillir pour l'inscription en tant que doctorant à l'école doctorale RP2E.

Je tiens tout d'abord à adresser mes remerciements les plus sincères à Monsieur **Youssef Diab** et Monsieur **Valéry Masson** pour avoir accepté d'être rapporteurs de ce travail. Je tiens également à remercier Monsieur **Pierre Ribstien**, Monsieur **Yves Candau**, Monsieur **Ludovic Bouilloud** et Madame **Morgane Colombert** de m'avoir fait l'honneur de participer à ce jury de thèse.

Mes plus vifs remerciements s'adressent ensuite à Monsieur **Michel Buès** qui, malgré ses nombreuses occupations, a accepté de prendre la direction de cette thèse, transformant ainsi les difficultés rencontrées en une expérience enrichissante. Je lui suis également reconnaissante de m'avoir assuré un encadrement rigoureux tout au long de ces années, tout en me donnant la possibilité de trouver mon cheminement personnel. Monsieur Buès a su diriger mes travaux avec beaucoup de disponibilité, de tact et d'intérêt. Il m'a toujours accordé généreusement le temps nécessaire pour partager avec moi ses idées et sa grande expérience. De même, tout au long de cette thèse, il n'a ménagé ni ses commentaires, toujours judicieux et rigoureux, ni ses encouragements. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Il m'est impossible d'exprimer toute ma gratitude à **Mario Marchetti**, mon co-directeur de thèse qui est devenu au fil des années plus qu'un frère (j'espère qu'il acceptera ce terme), dont la confiance et les conseils m'ont été si précieux aussi bien dans ma carrière scientifique que personnelle. Son enthousiasme, son optimisme inébranlable, son encouragement et sa confiance en moi m'ont porté pendant les trois ans et m'ont engagé à ne pas le décevoir. A chacune de mes demandes (généralement urgentes), il a été disponible. Il les a même parfois anticipées. J'espère que cette thèse sera un remerciement suffisant au soutien et à la confiance sans cesse renouvelée dont il a fait preuve en mon égard. J'espère avoir été digne de cette confiance qu'il m'a accordée et que ce travail est finalement à la hauteur de ses espérances. Quoi qu'il en soit, j'ai beaucoup appris à ses côtés et je suis très honoré de l'avoir eu comme co-directeur de thèse.

J'adresse de chaleureux remerciements à **Katia Chacibault**, ma co-directrice de thèse, pour son attention de tout instant sur mes travaux, pour ses nombreuses suggestions, ses conseils avisés et son écoute qui ont été prépondérants pour la bonne réussite de cette thèse. Son œil critique m'a été très précieux pour améliorer la qualité de ce travail. Je lui suis très reconnaissant pour le temps qu'elle m'a accordé, ses qualités pédagogiques et scientifiques, sa franchise, sa sympathie et pour le soutien scientifique et moral qu'il m'a apporté tout au long de cette thèse. **Katia**, j'ai pris un grand plaisir à travailler avec vous.

*Michel, Mario, Katia, je vous remercie pour les relectures enrichissantes de ce manuscrit de thèse. Vos
différentes remarques et commentaires m'ont permis de clarifier ma pensée parfois embrouillée et ont souvent
fait preuve d'un enthousiasme communicatif à l'égard de ma prose.*

Les choses ne se seraient sans doute pas aussi bien passées si je n'avais pas eu comme co-encadrants **Eric Martin** et **Ludovic Bouilloud** de météo-France, qui m'ont accueilli à Toulouse pour m'initier au modèle numérique TEB et m'ont apporté durant ces trois ans une aide précieuse pour mettre en œuvre mes modélisations numériques. Je les remercie également pour leurs disponibilités et la qualité de leurs conseils tout au long de cette thèse. Nos nombreuses discussions scientifiques ont constitué une très grande aide et ont grandement contribué à l'accomplissement de ce travail.

J'associe à ces remerciements **Julien Bouyer** et **Ivana Durickovic** qui ont beaucoup apporté à ce travail, aussi bien par les discussions que j'ai eu la chance d'avoir avec eux, leurs suggestions et les remarques constructives qu'ils ont fait sur mon projet de thèse. Merci également pour vos conseils qui ont fait avancer ma réflexion. **Julien, Ivana**, je vous remercie énormément pour votre implication dans ma thèse.

Un merci tout particulier à **Mathieu** et **Stéphane** pour l'aide inconditionnelle qu'ils m'ont apportée durant la phase de terrain en instrumentation. Ils ont été mes (co)pilotes durant ces jours et ces nuits passées à sillonner Nancy et surtout la rue Charles III où s'est déroulé la majorité des mesures et des expériences. Bien des résultats n'existeraient tout simplement sans eux.

Je tiens également à exprimer mes chaleureux remerciements à tous les membres présents et passés de l'équipe ICE **Bruno, Damien, Ethel, Fatiha, Laurent, Patrick, Rémy, Stéphanie, Stéphane** pour leur accueil et leur gentillesse ainsi que les conditions de travail privilégiées qui m'ont été offertes. J'associe à ces remerciements l'ensemble des membres de la Direction Territoriale Est du Cerema (ex-CETE de l'Est) et du laboratoire Géoressources de l'Université de Lorraine.

Je tiens à remercier **Rémi Suaire, François Leconte** et **Riyad Bouzouidja** de m'avoir soutenu lors de ces trois années d'efforts...

Je n'oublierai pas les aides permanentes reçues du personnel administratif : Patricia et Catherine pour leur gentillesse. Et comment oublier notre sympathique et agréable secrétaire de l'école doctorale **Christine Fivet** ! Enfin, les mots les plus simples étant les plus forts, j'adresse toute mon affection à ma famille, et en particulier à mes parents **Salem Khalifa & Amina Omrani** qui m'ont fait comprendre que la vie n'est pas faite que de problèmes qu'on pourrait résoudre grâce à des formules mathématiques et des algorithmes. Malgré mon éloignement depuis de (trop) nombreuses années, leur intelligence, leur confiance, leur tendresse, leur amour me portent et me guident tous les jours. C'est avec émotion qu'à mon tour je leur dévoile le fruit de mes efforts. J'espère être à la hauteur de leur fierté inconditionnelle. Merci pour avoir fait de moi ce que je suis aujourd'hui. Est-ce un bon endroit pour dire ce genre de choses ? Je n'en connais en tous cas pas de mauvais. Je vous aime.

The last remerciement but not least, s'adressent à ma fiancée **Esra**, qui, pour mon plus grand bonheur partage ma vie et mes expériences professionnelles depuis leurs origines. Elle est simplement le pilier de toutes mes constructions et la base de tous mes projets. Elle a su, tout au long de cette thèse, réfréner mes « ras-le-bol » et m'encourager dans ma voie. Son soutien a été sans faille et je lui serai éternellement reconnaissant d'avoir été la pierre angulaire de cette entreprise. Elle est la clef de ma réussite, sans elle à mes côtés, cette réalisation n'aurait pas la même saveur.



اللَّهُمَّ إِنِّي أَسْأَلُكَ خَيْرَ الْمَسْأَلَةِ، وَخَيْرَ الدُّعَاءِ

، وَخَيْرَ النَّجَاحِ، وَخَيْرَ الْعَمَلِ

وَخَيْرَ الثَّوَابِ، وَخَيْرَ الْحَيَاةِ، وَخَيْرَ الْمَمَاتِ

وَتُبِّئَنِي، وَثَقِّلْ مَوَازِينِي، وَحَقِّقْ إِيْمَانِي

وَارْفَعْ دَرَجَاتِي وَتَقَبَّلْ صَلَاتِي وَاغْفِرْ خَطِيئَتِي

وَأَسْأَلُكَ الدَّرَجَاتِ الْعُلَى مِنَ الْجَنَّةِ

SOMMAIRE

SOMMAIRE	7
LISTE DES ABRÉVIATIONS	19
INTRODUCTION GENERALE	25
CHAPITRE 1	31

CHAPITRE 1 : LA VIABILITE HIVERNALE. DE LA PROBLEMATIQUE GLOBALE AUX MODELES

NUMERIQUES LOCAUX DE PREVISION	33
1 Qu'est-ce que la viabilité hivernale (VH) ?	34
1.1 Quelques définitions	34
1.2 La viabilité hivernale, dans le monde et en France	34
1.3 Les opérations relatives à la viabilité hivernale et pourquoi ?	42
1.4 État des connaissances et pistes d'actions	47
2 Les modèles de prévision. Quels paramètres ? Pour quelle utilisation ?	47
2.1 Le modèle IceBreak	48
2.2 Le Road Conditions Model (RCM)	49
2.3 Le modèle IceMister	50
2.4 ISBA-Route (Météo-France)	51
2.5 Le modèle Road Surface Temperature (RST) forecast	52
2.6 Modèles de prévision et configuration climatique de la zone d'étude	54
3 Microclimat urbain et température de surface de la route (TSR)	55
3.1 Influence de la morphologie urbaine sur la TSR	56
3.2 Les flux de chaleur anthropiques	61
3.3 Prise en compte des facteurs d'impacts du microclimat urbain dans la modélisation de la TSR	63
3.4 Synthèse et présentation de la démarche choisie	65

CHAPITRE 2

CHAPITRE 2 : LES IMPACTS THERMIQUES DU FLUX ANTHROPIQUE LIE AU TRAFIC

AUTOMOBILE EN MILIEU URBAIN	71
------------------------------------	-----------

1	Étude bibliographique de la modification du bilan énergétique par le flux anthropique du trafic automobile en milieu urbain en hiver	72
1.1	<i>État de l'art</i>	72
1.2	<i>Processus physiques associés au trafic automobile</i>	73
1.3	<i>Prise en compte du trafic automobile dans la modélisation de la TSR</i>	90
2	Études expérimentales de l'appréciation de l'impact du trafic automobile	92
2.2	<i>Influence du microclimat urbain sur la TSR</i>	94
2.3	<i>Appréciation de l'influence du trafic automobile sur la TSR</i>	105
2.4	<i>Étendue spatiale de l'impact du trafic automobile</i>	110
3	Conclusion	118

CHAPITRE 3 **121**

CHAPITRE 3 : MODELISATION NUMERIQUE DES IMPACTS THERMIQUES DU TRAFIC	123
1	Description du modèle Town Energy Balance (TEB) 125
1.1	<i>Présentation succincte de TEB</i> 125
1.2	<i>Concept du bilan énergétique de surface de la route</i> 126
1.3	<i>Paramétrisation initiale du flux anthropique lié au trafic dans TEB</i> 131
2	Proposition d'amélioration de la prise en compte du flux anthropique associé au trafic dans TEB 133
2.1	<i>Évaluation globale des apports thermiques anthropiques associés au trafic</i> 134
2.2	<i>Évaluation détaillée des apports thermiques du trafic automobile</i> 135
3	Analyse comparée des deux approches de paramétrisation 139
3.1	<i>Résultats de l'intégration du trafic dans TEB selon une paramétrisation globale</i> 141
3.2	<i>Résultats de l'intégration du trafic dans TEB selon une paramétrisation détaillée</i> 148
4	Étude de sensibilité du modèle TEB dans la configuration d'une paramétrisation détaillée des effets anthropiques du trafic 158
4.1	<i>Sensibilité de la TSR et de T_{air} aux processus physiques liés au trafic automobile</i> 158
4.2	<i>Influence de la géométrie du canyon urbain sur la modélisation de la TSR et de T_{air}</i> 170
5	Conclusion 172

CHAPITRE 4 **177**

CHAPITRE 4 : IMPACT DE LA LAME D'EAU PRESENTE EN SURFACE SUR LA TSR	179
--	------------

1	Évolution des interactions hydro-énergétiques en milieu urbain	180
2	Concept du bilan hydrique dans TEB : de TEB à TEB-Hydro	182
2.1	<i>Spécificité du bilan hydrologique en milieu urbain</i>	182
2.2	<i>Configuration initiale du bilan hydrologique dans TEB</i>	184
2.3	<i>De TEB à TEB-Hydro</i>	185
3	Modélisation de la lame d'eau présente en surface de la route et de la TSR avec le modèle TEB-Hydro	190
3.1	<i>Appréciation des améliorations apportées par TEB-Hydro sur la modélisation de la lame d'eau en situation hivernale</i>	192
3.2	<i>Appréciation des améliorations apportées par TEB-Hydro sur la modélisation de la TSR en hiver</i>	197
4	Prise en compte des influences anthropiques sur la lame d'eau en surface de la route	200
4.1	<i>Nébulisation des eaux de surface par le trafic automobile</i>	200
4.2	<i>Cas particulier de la présence de fondants routiers et influence sur la TSR</i>	203
5	Conclusion	207

CONCLUSION GÉNÉRALE	209
----------------------------	------------

CONCLUSION GENERALE	211
RÉFÉRENCES	217
RESUME	233
ABSTRACT	233

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Densités de population et du réseau routier pour des pays avec une politique de viabilité hivernale, (Snow and Ice Databook, 2010).....	35
Figure 2. Régions climatiques en France (Météo-France, 2014)	39
Figure 3. Zones climatiques hivernales en France (Snow and IceDatabook, 2006)	40
Figure 4. Estimation des ventes de fondants routiers réalisées en France sur les 40 dernières années	46
Figure 5. Flux d'énergie de rayonnement au-dessus d'une zone urbaine (gauche) et d'une zone rurale (droite)	57
Figure 6. Influence de l'occupation de sol sur la température en ville ((a) image infrarouge d'une journée à New_York (NASA, Landsat 7), (b) image de localisation de végétation sur la même zone)	58
Figure 7. Fish-eye des quatre types d'espaces (respectivement de gauche à droite : espace ouvert, semi-ouvert et deux canyons urbains).....	59
Figure 8. Effet de piégeage radiatif sur les rayonnements solaires (1) et infrarouge (2)	59
Figure 9. Variation de l'albédo dans un milieu urbain (Goodman, 1999)	60
Figure 10. Profil de la vitesse de vent pour différentes surfaces (Chatelet et al., 1998).....	61
Figure 11. Illustration schématique des différents processus physiques associés au trafic avec des impacts sur la TSR (adaptée de Prusa et al., 2002).....	74
Figure 12. Illustration de l'expérience menée pour déduire la densité de flux de chaleur liée au frottement pneumatique (Fujimoto et al., 2006a) avec (a) le prototype de cette expérience, et (b) zoom sur la zone encadrée en rouge et positions des sondes de mesure	75
Figure 13. Variation de la vitesse du vent induit par le passage des véhicules V_w pour différentes vitesses de circulation, dans le cas des véhicules légers (a), et véhicules poids-lourds (b) (Fujimoto et al., 2007)	77
Figure 14. Simulation de la vitesse de vent induite par le passage de véhicules	78
Figure 15. Variation spatiale de la température de la partie inférieure du véhicule T_{veh_inf}	80
Figure 16. Variation transversale de la vitesse de vent induit par le passage du véhicule, avec (a) protocole de l'expérience (Fujimoto et al., 2012) et (b) les résultats pour une vitesse de circulation $V_{veh}= 30$ km/h.....	89
Figure 17. Illustration schématique de la zone d'impact du trafic Z_{trafic}	90
Figure 18. Thermoroute®, avec différents instruments de mesures	93

Figure 19. Itinéraire utilisé pour analyser la variation des paramètres météorologiques et routiers entre un milieu urbain (rouge) et périurbain (bleu) en période hivernale	95
Figure 20. Variation des paramètres météorologiques et routiers pour la journée 14/02/2013 à 13h00.....	99
Figure 21. Variation des paramètres météorologiques et routiers pour la journée 15/03/2013 à 2h15	100
Figure 22. Variation des paramètres météorologiques et routiers pour la journée 20/02/2014 à 7h45	101
Figure 23. Variation des paramètres météorologiques et routiers pour la journée 20/02/2014 à 18h25	102
Figure 24. Variation des paramètres météorologiques et routiers pour la journée 22/02/2014 à 12h00	103
Figure 25. Variation des paramètres météorologiques et routiers pour la journée 22/03/2014 à 11h00	104
Figure 26. Vue aérienne d'une section de la rue Charles III – Nancy et du point de mesures	105
Figure 27. Schéma de l'expérience de mesure de la TSR d'une zone circulée et d'une zone non circulée avec les instruments de mesures ((1) caméra infrarouge, (2) radiomètre infrarouge, (3) mesure de T_{air} et HR, (4) pyranomètre, (5) pyrgéomètre)	106
Figure 28. Différence de la température de surface entre une zone sans trafic (TSR_non-circulée) et une zone circulée (TSR_circulée) pour les trois campagnes expérimentales.....	109
Figure 29. Densité du trafic D_{trafic} de la Rue Charles III pour la journée du 20 au 21 novembre 2014, et évolution de la TSR correspondante en zones circulée et non circulée	110
Figure 30. Illustration schématique du protocole des mesures embarquées de la TSR en milieu urbain.....	111
Figure 31. Vue aérienne de l'itinéraire urbain de l'expérience avec mesures embarquées de la TSR en milieu urbain	112
Figure 32. Schéma de l'expérience de quantification de l'effet de masque et de vent induit par le passage d'un véhicule.....	113
Figure 33. Quantification des processus d'impacts du trafic	114
Figure 34. Zones d'impact des processus physiques associés au trafic	115
Figure 35. Modification de la densité de flux radiatif reçu par la surface de la route avec le passage d'un véhicule pour une vitesse de circulation de (a) 10 km/h, (b) 20 km/h, (c) 30 km/h, (d) 40 km/h, (e) 50 km/h et (f) 60 km/h	117

Figure 36. Modification de la vitesse du vent suite au passage d'un véhicule, (a) pour une vitesse de circulation de 30 km/h et (b) pour une vitesse de 40 km/h.....	118
Figure 37. Représentation schématique d'un canyon urbain générique de TEB (source Météo France).....	125
Figure 38. Résistances aérodynamiques, flux de chaleurs sensibles et latentes et paramètres climatiques intervenant dans le schéma de TEB (Masson et al., 2002).	131
Figure 39. Configuration du modèle TEB avec une paramétrisation détaillée des processus physiques liés au trafic	136
Figure 40. Évaluation de l'impact du trafic sur la TSR et illustration de la température moyenne pondérée mesurée pour la première expérience (du 20 au 21 novembre 2014)	140
Figure 41. Comparaison des résultats de (a) la TSR et (b) de T_{air} , modélisés selon la configuration initiale et l'approche A1 d'intégration du trafic dans TEB avec les mesures de terrain, pour la première expérience du 20 au 21 novembre 2014.....	142
Figure 42. Comparaison des résultats de (a) la TSR et (b) de T_{air} , modélisés selon la configuration initiale et l'approche A1 d'intégration du trafic dans TEB avec les mesures de terrain, pour la deuxième expérience du 16 au 17 décembre 2014.....	143
Figure 43. Comparaison des résultats de (a) la TSR et (b) de T_{air} , modélisés selon la configuration initiale et l'approche A1 d'intégration du trafic dans TEB avec les mesures de terrain, pour la troisième expérience du 04 au 06 février 2015.....	144
Figure 44. Différence d'évaluation de la densité de flux de chaleur globale générés par le trafic $Q_{trafic}(W/m^2)$ selon la CI et l'approche A1 en fonction de la densité du trafic D_{trafic} pour l'expérience du 20 au 21 novembre 2014	146
Figure 45. Évaluation de la sensibilité de (a) la TSR et de (b) la T_{air} au flux de chaleur sensible Q_{H_trafic} , selon la configuration initiale d'intégration du trafic dans TEB	147
Figure 46. Comparaison des résultats de (a) la TSR et (b) de T_{air} , modélisés selon la configuration initiale et l'approche A2 d'intégration du trafic dans TEB avec les mesures de terrain, pour la première expérience du 20 au 21 novembre 2014.....	149
Figure 47. Comparaison des résultats de (a) la TSR et (b) de T_{air} , modélisés selon la configuration initiale et l'approche A2 d'intégration du trafic dans TEB avec les mesures de terrain, pour la deuxième expérience du 16 au 17 décembre 2014.....	150
Figure 48. Comparaison des résultats de (a) la TSR et (b) de T_{air} , modélisés selon la configuration initiale et l'approche A2 d'intégration du trafic dans TEB avec les mesures de terrain, pour la troisième expérience du 04 au 06 février 2015.....	151

Figure 49. Impact de l'étendue de la zone d'impact du trafic Z_{trafic} sur la modélisation de la TSR, pour la première expérience du 20 au 21 novembre 2014	153
Figure 50. Comparaison de la TSR mesurée et celle modélisée avec TEB en fonction de Z_{trafic} , pour la première expérience du 20 au 21 novembre 2014	154
Figure 51. Impact de l'étendu de la zone d'impact du trafic Z_{trafic} sur la modélisation de la T_{air} , pour la première expérience du 20 au 21 novembre 2014	155
Figure 52. Variation des résultats de la modélisation de (a) la TSR et (b) de T_{air} en fonction de la configuration des flux S_m , E_{ex} et S_{va} dans le modèle TEB, pour la première expérience du 20 au 21 novembre 2014	157
Figure 53. Apport énergétique de la densité de flux de chaleur S_t due aux frottements des pneumatiques à la modélisation de la TSR, (a) pour l'expérience du 20 au 21 novembre 2014, et (b) pour l'expérience du 16 au 17 décembre 2014	159
Figure 54. Impact de l'effet de masque C_{masque} et l'apport radiatif du trafic sur la TSR : amplitude de chaque processus ainsi que leurs effets combinés, (a) pour les expériences du 20 au 21 novembre 2014, et (b) du 16 au 17 décembre 2014	161
Figure 55. Sensibilité de la TSR à la modification de la résistance aérodynamique de l'air et comparaison entre l'approche de Prusa et al. (2002) et celle de Denby et Sundvor (2012), (a) pour l'expérience du 20 au 21 novembre 2014, et (b) celle du 16 au 17 décembre 2014.....	163
Figure 56. Apport énergétique de la densité de flux de chaleur sensible S_{va} due à l'augmentation de la vitesse du vent induit par le passage des véhicules, (a) pour les expériences du 20 au 21 novembre 2014, et (b) du 16 au 17 décembre 2014	164
Figure 57. Apport énergétique de la densité de flux de chaleur dégagé par le moteur E_{comb} et par le système d'échappement E_{ex} à la TSR, (a) pour les expériences du 20 au 21 novembre 2014, et (b) du 16 au 17 décembre 2014	165
Figure 58. Apport énergétique de l'effet cumulatif des densités de flux de chaleur sensible S_{va} , du système d'échappement E_{ex} et du moteur S_m à la modélisation de la T_{air} , (a) pour les expériences du 20 au 21 novembre 2014, et (b) du 16 au 17 décembre 2014	166
Figure 59. Pourcentage de contribution de chacun des processus physiques associés au trafic pour l'expérience du 20 au 21 novembre 2014	168
Figure 60. Pourcentage de contribution de chacun des processus physiques associés au trafic pour l'expérience du 16 au 17 décembre 2014	169
Figure 61. Variation de la densité du trafic D_{trafic} entre les deux expériences du 20 au 21 novembre 2014, et du 2 du 16 au 17 décembre 2014.....	169

Figure 62. Influence des bâtiments sur la modélisation de (a) la TSR et (b) de T_{air} , pour la troisième expérience du 04 au 06 février 2015	171
Figure 63. Effet de l'imperméabilisation sur les eaux pluviales et le bilan hydrologique entre différents milieux (rural (haut), périurbain (milieu) et urbain (bas)) définis par la densité de bâti (Butler et Davies, 2004).	183
Figure 64. Discrétisation du sol telle que prescrite par l'utilisateur pour la voirie est fonction du type de végétation pour les jardins (a) et telle qu'homogénéisée par le modèle (b)	187
Figure 65. Variation de la modélisation du réservoir de surface Wsroute (a) et du ruissellement Roffroute (b) selon la configuration initiale de TEB et selon TEB-Hydro, pour la période du 01/12/2011 au 10/12/2011	193
Figure 66. Variation de la modélisation du réservoir de surface Wsroute (a) et du ruissellement Roffroute (b) selon la configuration initiale de TEB et selon TEB-Hydro, pour le mois de décembre 2012.....	195
Figure 67. Flux de chaleur latente de la surface de la route $Q_{E-route}$ traduit en mm d'eau évaporée, modélisé par TEB et par TEB-Hydro, pour le mois de décembre 2012.....	196
Figure 68. Variations de la TSR modélisée par TEB et TEB_Hydro et des précipitations en fonction du temps pour la période du 01-10/11/2011	197
Figure 69. Variations de la TSR modélisée par TEB et TEB_Hydro et de Wsroute (lié à l'ESR) en fonction du temps pour la période du 01/12/2011 au 10/12/2011	198
Figure 70. Variations de la TSR modélisée par TEB et TEB_Hydro et de Wsroute (lié à l'ESR) en fonction du temps pour le mois de décembre 2012	199
Figure 71. Nébulisation des eaux de surface de la route par le véhicule	201

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Données climatiques des pays avec politique de viabilité hivernale (Snow and Ice Databook, 2010).....	36
Tableau 2. Besoins d'entretien et types de conditions hivernales pour des pays ayant une politique de viabilité hivernale, (Snow and Ice Databook, 2006).....	37
Tableau 3. Définition des conditions de circulation.....	41
Tableau 4. Variables météorologiques et paramètres physiques d'entrée du modèle IceBreak.	49
Tableau 5. Paramètres météorologiques d'entrée du modèle RCM.....	50
Tableau 6. Paramètres géographiques intégré dans le modèle IceMister	51
Tableau 7. Principales caractéristiques de différents modèles	53
Tableau 8. Taux d'émission anthropique et bilan radiatif net dans plusieurs pays du monde (Oke, 1978 ; Taha, 1997)	62
Tableau 9. Variables définies par Fujimoto et al. (Fujimoto et al., 2007) pour la détermination de la vitesse de vent induit par les véhicules légers et poids-lourds	79
Tableau 10. Paramètres du véhicule pour les différents scénarios de conditions de circulation (Prusa et al., 2002).....	85
Tableau 11. Contribution des différents mécanismes en chaleur dégagée par le véhicule	86
Tableau 12. Caractéristiques des instruments de mesures embarqués sur Thermoroute®	94
Tableau 13. Conditions météorologiques des expériences pour l'appréciation de l'influence du microclimat urbain sur la TSR en hiver	96
Tableau 14. Conditions météorologiques des expériences pour les mesures embarquées de la TSR en milieu urbain	112
Tableau 15. Étendue spatiale et pourcentage de chaque processus physique associés au trafic en fonction de la dimension totale du véhicule	116
Tableau 16. Synthèse des résultats de la paramétrisation des flux anthropiques associés au trafic dans TEB, des améliorations apportées à la modélisation de la TSR et à celle de T_{air} et contribution à la viabilité hivernale en milieu urbain	174
Tableau 17. Paramètres spécifiques au modèle TEB-Hydro, cas particulier de la rue Charles III à Nancy.....	191

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Abréviations	Synonyme	Unité
<i>Partie thermique</i>		
$a_{bât}$	Densité de bâtiments dans le canyon urbain	-
a_{route}	Albédo de la route	-
$a_{route-traffic}$	Albédo de la route impactée avec le trafic	-
a_{type}	Coefficient de turbulence causé par le passage du véhicule	s/véhicule
a_{veh}	Coefficient de turbulence causé par le passage des véhicules légers	s/véhicule
a_{veh}^{VL}	Coefficient de turbulence causé par le passage des véhicules poids lourds	s/véhicule
a_{veh}^{VPL}		
C_I	Capacité calorifique volumique de la première couche de surface de la route	J/m ³ /K
C_k	Capacité calorifique volumique de la k ^{ième} couche de la route	J/m ³ /K
c_{ex}	Chaleur spécifique de produit de combustion	J/kg/K
C_{fuel}	Consommation en carburant du véhicule	m ³ /m
C_{masque}	Coefficient d'effet de masque	-
C_p	Capacité thermique massique de la route	J/kg/K
$C_{turb_traffic}$	Coefficient de turbulence évalué par Prusa	-
d_I	Épaisseur de la première couche de surface de la route	m
d_k	Épaisseur des couches du sol	m
$D_{traffic}$	Densité du trafic	s ⁻¹
DVD	Nombre de kilomètres parcourus en moyenne par jour par tous les véhicules du parc automobile de la ville	km/jour
E_{ex}	Densité de flux de chaleur dégagée par le système d'échappement	W/m ²
E_{tot}	Flux de chaleur total dégagé par la réaction de combustion	W
E_{veh}	Énergie rejetée par véhicule par kilomètre parcouru	J/km
f_{route}	Fraction de la route par rapport à la largeur du canyon urbain	m
$h_{bât}$	Hauteur des bâtiments	m
FE	Consommation moyenne en carburant du véhicule	l/km
K_t	Conductivité thermique du pneumatique	W/m/K
K_{20}	Conductivité thermique du pneumatique à 20°C	W/m/K
$L_{mesuré}$	Luminance mesurée par la caméra infrarouge	W/m ² /sr
$L_{environnement}$	Luminance émise par l'environnement	W/m ² /sr
$L_{atmosphère}$	Luminance émise par l'atmosphère	W/m ² /sr
L_{veh}	Longueur du véhicule	m
L_{pneu}	Longueur de la zone d'impact des frottements des pneumatiques	m
L_{moteur}	Longueur de la zone d'impact du moteur	m
L_v	Chaleur latente d'évaporation de l'eau liquide	J/kg
m_{fuel}	Taux de consommation en carburant du véhicule	kg/s
m_{ex}	Débit massique de produit de combustion	kg/s
m_{H_2O}	Fraction massique de vapeur d'eau	-
NHC	Chaleur nette de combustion de carburant	J/kg
N_{veh}	Nombre de véhicules	s ⁻¹
$PLW_{S_to_R}$	Coefficient d'interaction radiatif entre le soleil et la route	W/m ² /K ⁴
$PLW_{R_to_R}$	Coefficient d'interaction radiatif entre route et elle-même	W/m ² /K ⁴
$PLW_{NR_to_R}$	Coefficient d'interaction radiatif entre la couche de neige et la route	W/m ² /K ⁴
$PLW_{W_to_R}$	Coefficient d'interaction radiatif entre les murs et la route	W/m ² /K ⁴
$PLW_{G_to_R}$	Coefficient d'interaction radiatif entre le jardin et la route	W/m ² /K ⁴
Q_{LE}	Densité de flux de chaleur latente	W/m ²
Q_H	Densité de flux de chaleur sensible	W/m ²
Q_{route_sat}	Humidité spécifique à saturation à la surface de la route	kg/kg
Q_{canyon}	Humidité spécifique de l'air à la couche limite inférieure du canyon urbain (à 2 m au dessus de la surface de la route)	kg/kg
$Q_{H_traffic}$	Densité de flux de chaleur sensible du trafic	W/m ²
Q_{H_murs}	Densité de flux de chaleur sensible des murs	W/m ²
Q_{H_top}	Densité de flux de chaleur sensible du canyon urbain	W/m ²

Q_{E_trafic}	Densité de flux de chaleur latente du trafic	W/m ²
Q_{E_top}	Densité de flux de chaleur latente du canyon urbain	W/m ²
Q_{veh}	Densité de flux de chaleur total dégagée par le véhicule	W/m ²
Q_{trafic}	Densité de flux de chaleur total dégagé par le trafic	W/m ²
R_{gabs}	Rayonnement global absorbé par la surface de la route	W/m ²
R_{LW}	Rayonnement de grandes longueurs d'onde émis par la surface de la route	W/m ²
R_n	Rayonnement net résultant du bilan radiatif dans le visible et l'infrarouge	W/m ²
R_{nl}	Rayonnements nets de grandes longueurs d'onde reçus par la surface de la route	W/m ²
R_{ns}	Rayonnements nets de courtes longueurs d'onde reçus par la surface de la route	W/m ²
R_{ld}	Rayonnement de grandes longueurs d'onde descendant	W/m ²
R_{lu}	Rayonnement de grandes longueurs d'onde ascendant	W/m ²
R_{sd}	Rayonnement de courtes longueurs d'onde descendant	W/m ²
R_{su}	Rayonnement de courtes longueurs d'onde ascendant	W/m ²
R_{veh}	Densité de flux radiatif émis par le véhicule	W/m ²
R_{veh_inf}	Densité de flux radiatif émis par la partie inférieure du véhicule	W/m ²
R_{veh_sup}	Densité de flux radiatif émis par la partie supérieure du véhicule	W/m ²
R_{route}	La résistance aérodynamique de l'air proche d'une surface de route sèche	s/m
R_{route_humide}	La résistance aérodynamique de l'air proche d'une surface de route humide	s/m
$R_{route-traffic}$	La résistance aérodynamique de l'air proche d'une surface de la route sèche impactée par le trafic	s/m
$R_{route-traffic_humide}$	La résistance aérodynamique de l'air proche d'une surface de la route humide impactée par le trafic	s/m
R_{ex}	Rayon de la zone d'impact du système d'échappement	m
SVF_{route}	Facteur de vue de ciel de la route	-
SVF_{murs}	Facteur de vue de ciel des murs	-
S_t	Densité de flux de chaleur due aux frottements des pneumatiques	W/m ²
S_{comb}	Densité de flux de chaleur dégagée par le moteur	W/m ²
S_{va}	Densité de flux turbulent de chaleur sensible induit par le trafic	W/m ²
S_{veh}	Écart entre deux véhicules successifs	m
S_{moteur}	Étendue spatiale de la zone d'impact du moteur	m ²
S_{pneu}	Étendue spatiale de la zone d'impact des frottements des pneumatiques	m ²
S_{ex}	Étendue spatiale de la zone d'impact du système d'échappement	m ²
$S_{radiatif}$	Étendue spatiale de la zone d'impact radiative du véhicule	m ²
T_{air}	Température de l'air	K
T_{canyon}	Température de la couche limite inférieure du canyon urbain (à 2 m de la surface de la route)	K
T_{Murs}	Températures des parois des murs	K
T_{Neige}	Température de la couche de neige	K
T_{Jardin}	Température à la surface de couvert végétal (pelouses)	K
TSR	Température de surface de la route	K
T_{route_k}	Température de la k ^{ième} couche de la surface de la route	K
T_{route}	Température radiative de la surface de la route mesurée par la caméra infrarouge	K
$T_{environnement}$	Température radiative moyenne de l'environnement	K
T_t	Température du pneumatique	K
T_{veh}	Température du véhicule	K
$T_{veh-inf}$	Température représentative de la partie inférieure du véhicule	K
$T_{veh-sup}$	Température représentative de la partie supérieure du véhicule	K
T_{ex}	Température de sortie de système d'échappement	K
t_{masque}	Temps de masquage causé par le passage d'un certain nombre de véhicules	s
t_{veh}	Temps de masquage causé par le passage d'un seul véhicule	s
t_{vmax}	Temps nécessaire pour que le véhicule atteigne V_{vmax}	s

t_{v0}	Temps nécessaire pour que le véhicule décélère et s'arrête	s
t_{temps}	Pas de temps utilisé dans la modélisation	s
V_{veh}	Vitesse de circulation du véhicule	m/s
V_{vmax}	Vitesse maximale autorisée pour la circulation des véhicules	m/s
V_{wmax}	Vitesse maximale du vent induit par le passage de véhicules à une vitesse V_{vmax}	m/s
V_w	Vitesse de vent induit par le passage du véhicule	m/s
V_w^{VL}	Vitesse de vent induit par le passage des véhicules légers	m/s
V_w^{VPL}	Vitesse de vent induit par le passage des véhicules poids lourds	m/s
V_{veh}^{VL}	Vitesse de circulation des véhicules légers	m/s
V_{veh}^{VPL}	Vitesse de circulation des véhicules poids lourds	m/s
W_{canyon}	Largeur du canyon urbain	m
W_{veh}	Largeur du véhicule	m
W_{trafic}	Largeur de la zone d'impact du trafic	m
W_{pneu}	Largeur de la zone d'impact des frottements pneumatiques	m
W_{moteur}	Largeur de la zone d'impact du moteur	m
Z_{trafic}	Pourcentage de la zone d'impact du trafic par rapport à la largeur totale de la route	-
Z_{moteur}	Pourcentage de l'étendue spatiale de la zone d'impact du moteur par rapport à la surface totale du véhicule	-
Z_{pneu}	Pourcentage de l'étendue spatiale de la zone d'impact des frottements pneumatiques par rapport à la surface totale du véhicule	-
Z_{ex}	Pourcentage de l'étendue spatiale de la zone d'impact du système d'échappement par rapport à la surface totale du véhicule	-
$Z_{radiatif}$	Pourcentage de l'étendue spatiale de la zone d'impact radiative du véhicule par rapport à la surface totale du véhicule	-
α_{comb}	Fraction de vapeur d'eau qui se condense	-
α_{tp}	Coefficient de transfert thermique entre le pneumatique et la surface de la route	W/m ² /K
α_{va}	Coefficient de transfert thermique entre la surface de la route et l'atmosphère	W/m ² /K
ΔQ_s	Terme de stockage de chaleur dans le sol	W/m ²
ΔW_s^{route}	Réservoir de la surface de la route	mm
λ_k	Conductivité thermique de k ^{ieme} couche de la surface de la route	W/m/K
λ_{fuel}	Chaleur latente de combustion du carburant	J/kg
λ_{fg}	Chaleur latente de condensation	J/kg
ϵ_{veh}	Émissivité du véhicule	-
ϵ_{route}	Émissivité de la route	-
ϵ_{murs}	Émissivité des parois des murs	-
ϵ_{jardin}	Émissivité du couvert végétal	-
σ	la constante de Stefan-Boltzmann	W/m ² /K ⁴
ρ_a	Masse volumique de l'air	kg/m ³
ρ_{fuel}	Masse volumique du carburant	kg/m ³
Ψ_{SAT}	Potentiel hydrique à saturation	-
$\tau_{atmosphère}$	Coefficient de transmission de l'atmosphère	-

Partie hydrologique

Cl	Nombre d'ions de chlore libérables par une molécule de fondant routier	-
Cl_{bf}	Quantité de chlore naturellement présent dans l'environnement	g/m ²
C_{sew}	Taux de raccordement des surfaces imperméabilisées au réseau d'assainissement	-
D_{trafic}^{VL}	Densité de trafic des véhicules légers	s ⁻¹
D_{trafic}^{VPL}	Densité de trafic des véhicules poids lourds	s ⁻¹
D_{sew}	Profondeur moyenne des réseaux	m
EXP_{Cl}	Quantité de chlorures expulsés et récoltés hors de la chaussée	g/m ²
E^{route}	Taux d'évaporation de la surface de la route	mm/s

F_{rs}	Facteur d'état de surface	-
f_{spray}^{VL}	Facteurs de nébulisation pour les véhicules légers	-
f_{spray}^{VPL}	Facteurs de nébulisation pour les véhicules poids lourds	-
$f_{0,spray}^{VL}$	Facteurs de nébulisation référence pour les véhicules légers	-
$f_{0,spray}^{VPL}$	Facteurs de nébulisation référence pour les véhicules poids lourds	-
i	Constante de Van Hoff	-
I_{route}	Taux d'infiltration à travers la voirie	mm/s
INF_{sew}	Taux d'infiltration parasite dans les réseaux d'assainissement	m ³ /s
I_p^{sew}	Paramètre sans dimension représentant la qualité du réseau d'assainissement	-
k	Pourcentage auquel les bandes de roulement s'appauvrissent en sel	-
K_c	Constante cryoscopique de l'eau	kg.K/mol
K_{route}	Taux d'infiltration à travers la voirie	m/s
K_{sat}	Conductivité hydraulique à saturation du sol	m/s
K_{sat}^{moy}	Conductivité hydraulique moyenne à saturation de la route	m/s
L	Distance caractéristique pour le transfert latéral	m
L_{sew}^{maille}	Longueur du réseau d'assainissement dans la maille de TEB	m
L_{sew}^{max}	Longueur du réseau d'assainissement maximale de la zone d'étude	m
m	Quantité du soluté	mol/kg
N_{voies}	Nombre de voies de la route	-
P_{route}	Taux de précipitations interceptées par la surface de la route	mm/s
PC_{eq}	Equivalent du cumul du nombre de véhicules particuliers	-
R_{spray}	Taux de nébulisation total généré par le trafic	s ⁻¹
R_{route}^{off}	Taux de ruissellement de la surface de la route	mm/s
S_{app}	Quantité de fondants routiers appliquée pendant l'opération de salage	g/m ²
$S_{veh,spray}$	Quantité d'eau nébulisée par le trafic	mm
T_c	Température de congélation	K
V_{cp}	Composante du vent perpendiculaire à l'axe de la chaussée	-
$V_{ref,spray}$	Vitesse de circulation de référence (Denby et Sundvor, 2012)	m/s
W_{route}^s	Capacité du réservoir de la surface de la route	mm
$W_{route}^{s,min}$	Hauteur minimale (seuil) de la lame d'eau pour le déclenchement du processus de la nébulisation	mm
$W_{route}^{s,max}$	Capacité maximale de stockage de la surface de la route	mm
W_{SAT}	Contenu en eau du sol à la saturation	mm
W_{FC}	Contenu en eau du sol à la capacité au champ	mm
W_{WILT}	Contenu en eau du sol au point de flétrissement	mm
W_{res}	Contenu en eau du sol dans la couche du sol où se situe le réseau d'assainissement	m ³ /m ³
W_{sat}	Contenu en eau du sol à saturation	m ³ /m ³
W_{seuil}	Contenu en eau du sol seuil	m ³ /m ³
W_{comp}	Contenu en eau du sol du compartiment (bâti, voirie, jardin)	m ³ /m ³
W_{ind}^{comp}	Contenu en eau du sol calculé pour le compartiment avant homogénéisation	m ³ /m ³
W_{moy}	Contenu en eau du sol moyen entre les compartiments	m ³ /m ³
$W_{s,max}^{toit}$	Capacité maximale d'interception des toitures	mm

Avant-propos

Ce travail de recherche s'inscrit dans le cadre d'un sujet de thèse en collaboration entre Météo-France, l'IFSTTAR et le Cerema sur l'amélioration de la modélisation micro-météorologique des situations hivernales en milieu urbain.

L'IFSTTAR, le Cerema et Météo-France souhaitent poursuivre la collaboration sur ce thème, notamment par l'étude des processus physiques impliqués dans le comportement hivernal des surfaces et de leur modélisation. Cette coopération fait suite à celles antérieures (projet GELCRO) sur l'évolution de la neige sur une chaussée non déneigée. Pour l'IFSTTAR et le Cerema, cette coopération a été entamée dans le cadre de l'action de recherche PALM (Prévision et Alerte de situations Météo-routières dégradées). Pour Météo-France, elle se situe à la fois dans le cadre du Pôle-Route de la Direction de la Prévision, responsable des aspects R&D et de la production opérationnelle de prévisions météo-routières multi-échelles (spatiales et temporelles), et du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) au travers du Groupe de Météorologie à Moyenne Échelle.

Introduction générale

Les déplacements par infrastructures de transport (routes, voies ferrées, aéroports, etc.) sont une composante essentielle de la vie quotidienne pour la majorité de la population partout dans le monde. Il y a toujours une nécessité de se déplacer de son domicile vers son lieu de travail, une école, un marché ou vers une autre localité. Il est crucial que l'ensemble de ces déplacements se fassent de manière sûre quelles que soient les conditions météorologiques. Cette mobilité est plus difficile en conditions météorologiques dégradées. Bien que le nombre de victimes sur les routes a considérablement baissé en France au cours de la dernière décennie, des accidents demeurent avec des blessés graves pour diverses raisons liées à ces conducteurs, aux véhicules, à la signalisation et à la praticabilité des infrastructures liée à ces conditions météorologiques. En France, on enregistre sur les routes plusieurs milliers de collisions par année et des milliers de blessés et de décès par accident (ONISR, 2013, 2014). Ces statistiques alarmantes interpellent à la fois les autorités et les populations. Il est impératif de réunir les conditions nécessaires pour améliorer la mobilité et la sécurité routière de manière substantielle.

La présence de mauvaises conditions météorologiques, notamment durant l'hiver, a un effet direct sur la sécurité routière et sur l'économie (pertes de production, délais de livraison des marchandises, etc.). L'hiver est caractérisé par la présence de la neige et la formation de la glace sur les surfaces circulées, mais aussi par des pluies accompagnées de vents parfois violents. En cas de neige ou de verglas, l'état des routes se dégrade de façon plus ou moins importante. Sans les interventions des services d'exploitation déployées par les gestionnaires de réseaux, leur praticabilité serait fortement réduite, voire impossible. Ces interventions, regroupées sous le terme « *viabilité hivernale* » visent à garantir aux usagers de la route des conditions optimales de sécurité et de mobilité.

Afin de garantir la mobilité et la sécurité attendues par les usagers, les gestionnaires des réseaux sont organisés de différentes manières. En effet, en se basant sur les observations et les prévisions données par les services météorologiques, ils mettent en place, en hiver, différents niveaux de service en s'appuyant sur des traitements précuratifs ou curatifs à l'aide de fondants routiers (notamment le chlorure de sodium (NaCl)). En France, depuis plusieurs décennies, les réseaux scientifiques et techniques de service d'exploitation hivernale sont devenus conscients des risques environnementaux que fait peser l'usage quasi généralisé de

fondants routiers sur les réseaux routiers. De ce fait, ils ont commencé à chercher par des actions de formations et de productions scientifiques, normatives et réglementaires, à sensibiliser les exploitants des réseaux à la maîtrise des quantités de fondant ainsi épandues. Des réflexions récentes sont menées dans le cadre de l'amélioration de la prévision de l'état de surface de la route. Une prévision des épisodes neigeux sur les routes et/ou les aéroports facilite la coordination et une plus grande rapidité d'intervention des services d'exploitation hivernale, contribue à la réduction du coût des opérations de maintenance, comme le déneigement et l'épandage de fondants routiers, ainsi que l'atténuation des impacts environnementaux due à l'utilisation inadaptée des fondants routiers. La clé d'une prise de décision efficace en viabilité hivernale repose donc sur la connaissance anticipée des précipitations (notamment la neige et sa tenue au sol) ainsi qu'un éventuel risque de formation de verglas et son lieu d'occurrence.

La prévision des conditions météorologiques et de la praticabilité des infrastructures constituent un défi important, surtout pendant l'hiver. Les prévisions à moyen et long termes ont seulement un degré de fiabilité. L'interaction entre les variations des conditions météorologiques et l'état de surface n'est pas forcément bien maîtrisée jusqu'à présent (Petty et Mahoney, 2008). Les infrastructures sont souvent caractérisées tout le long de leur linéaire par des situations de microclimats dues à la variation de topographie, la présence ou non de couvert végétal de densité variable, l'urbanisation et la présence de cours d'eau. Il convient d'y ajouter l'ampleur des impacts anthropiques liés à la configuration du milieu (urbain, périurbain ou rural), les apports thermiques du trafic et celles thermo-hydriques des traitements par fondants routiers. Cette variabilité locale combinée au type du revêtement influence l'état de surface et met au défi les systèmes de prévision de l'état des routes. Dans le contexte actuel de changement climatique, la variabilité des conditions routières en particulier devient plus difficile à appréhender. Une meilleure assimilation des données météorologiques, environnementales (topographie, couvert végétal, etc.) et des caractéristiques des routes (configuration, trafic et traitements par fondants routiers) s'impose afin de mieux prévoir cet état de surface.

Afin de le prévoir, les exploitants en charge de la viabilité hivernale disposent d'outils, dont des modèles de prévision de la température de surface de route. Ces modèles sont continuellement améliorés pour introduire aussi bien les paramètres météorologiques que les paramètres géographiques ainsi que les caractéristiques du réseau étudié. Cependant, les facteurs anthropiques comme le trafic automobile, l'utilisation des fondants routiers, et la

configuration spécifique du milieu urbain, ont été jusqu'à présent très difficiles à introduire dans cette prévision de la température de la surface de la route (TSR). Ces facteurs anthropiques sont délicats à estimer et la quantification de leurs effets sur cette TSR tout autant. Le trafic modifie le bilan énergétique avec une convection forcée liée au passage des véhicules, ainsi qu'une modification des bilans radiatif et hydrique. Le fondant routier agit sur la température de congélation de l'eau présente à la surface. En effet, le risque de glissance associé à l'apparition d'une phase aqueuse solide n'est plus seulement et spécifiquement autour de 0°C en raison de leur présence. De plus, la fusion induite de la glace, provoque un abaissement de la TSR par la mobilisation de la chaleur latente. Quant à la morphologie urbaine, elle affecte les facteurs d'échanges radiatifs et convectifs de la chaleur.

L'intérêt principal de cette contribution à la modélisation microclimatique des situations hivernales en milieu urbain est d'intégrer dans un modèle numérique la spécificité de cette configuration, les impacts du trafic sur le bilan énergétique de la surface, des effets de traitements par fondants routiers, ainsi qu'une meilleure description de l'eau sur la surface en fonction de la géométrie, de la structure et de la nature des matériaux constitutifs. Le modèle numérique permettra également d'établir quand la température de protection, correspondant à la température de transition de phase solide-liquide du fluide présent à la surface, apportée par le fondant routier devient insuffisante en fonction des observations et par la suite des prévisions météorologiques.

Le manuscrit s'organise en quatre chapitres aux objectifs distincts et complémentaires.

Le **chapitre 1** se propose de faire une synthèse sur les connaissances et les outils utilisés en exploitation des infrastructures en hiver. Dans un premier temps, nous présentons des aspects généraux de la viabilité hivernale dans le monde et plus particulièrement en France. Nous décrivons aussi comment la météorologie, les opérations de maintenance hivernale qui en découlent (déneigement, épandage de fondants routiers) ainsi que les paramètres anthropiques tels que le trafic, influencent l'état de surface. Dans un deuxième temps, nous présentons les différents modèles numériques de prévision de l'état de la route utilisés dans le monde. Ils en existent de nombreux et permettent une analyse des interactions chaussée - atmosphère à différentes échelles temporelles et spatiales. Chaque modèle repose sur des hypothèses, qui lui confèrent une portée et des limites qu'il est nécessaire d'analyser pour le choisir en vue d'une application à la configuration urbaine. Enfin, la le troisième temps de ce chapitre présentera l'aspect spécifique du milieu urbain et l'impact de ces facteurs sur les bilans thermique et

hydrique. À ce niveau, on identifie et on apprécie comment la configuration spécifique du milieu urbain impacte le bilan énergétique de surface de la route, et quels sont les processus physiques qui devraient être pris en compte dans la modélisation de l'état de surface de la route ?

Une étude bibliographique approfondie sur les impacts thermiques du trafic sera présentée dans la première partie du **chapitre 2**. Dans cette partie, nous présentons les différents processus d'impacts du trafic sur le bilan énergétique de surface de la route ainsi que leurs équations descriptives pour la modélisation. Nous décrivons aussi les approches d'intégration du trafic dans la modélisation de la TSR. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous présenterons la méthodologie des expériences réalisées afin d'identifier et de quantifier les impacts thermiques du trafic. La première étude expérimentale, reposant sur des mesures embarquées, consiste à identifier et à quantifier la différence de la TSR entre un milieu urbain et périurbain en hiver. L'objectif est d'apprécier l'influence de la spécificité urbaine (configuration et apport thermique anthropique) sur le bilan énergétique de surface. La deuxième étude expérimentale, reposant sur des mesures en point fixe, consiste à évaluer les apports thermiques du trafic à la TSR. L'analyse porte sur la différence de la TSR entre une zone circulée, impactée par le passage du trafic, et une zone non circulée. La différence de la TSR entre ces deux zones est due aux apports thermiques du trafic. La troisième étude expérimentale, reposant aussi bien sur des mesures embarquées et des mesures in-situ, consiste à identifier et à évaluer les différents processus d'impacts du trafic ainsi que leur influence sur la TSR.

La bibliographie ainsi que les expériences entreprises, décrites dans le deuxième chapitre, montrent que le trafic a un effet significatif sur la TSR. L'objectif principal de ce travail consiste alors à paramétrer ces apports thermiques du trafic pour une intégration dans le bilan énergétique de surface du modèle numérique Town Energy Balance (TEB). La méthode de description du trafic et son intégration dans le modèle TEB sont décrits dans le **chapitre 3**, divisé en quatre grandes parties. La première partie est relative au modèle numérique TEB, où on récapitulera les différents processus physiques du transfert thermique à l'interface chaussée-atmosphère et on décrira la conception ainsi que les différents paramètres physiques influençant l'état thermique de la surface de la route (paramètres météorologiques et description de la configuration du milieu urbain). La seconde partie de ce chapitre traitera spécifiquement du trafic dans TEB. Dans un premier temps, on décrira comment le trafic était initialement pris en compte pour l'établissement du bilan thermique de surface de la route. Par

la suite, on présentera les approches élaborées pour mieux intégrer ce flux anthropique dans la prévision de la TSR. Une première approche, en corrélation avec la configuration initiale, a consisté à le décrire d'une manière plus réaliste en prenant en considération la variation de ces apports thermiques dans le temps. Une seconde approche se base sur une description détaillée des différents processus physiques associé au trafic. Les résultats comparés d'intégration du trafic dans le modèle TEB seront présentés dans la troisième partie de ce chapitre 3. Cette comparaison portera notamment sur la confrontation avec des mesures sur le terrain, notamment sur les températures de surface et de l'air, afin de valider l'approche appropriée. Une étude de sensibilité du modèle numérique TEB aux différents processus physiques du trafic sera présentée en dernière partie. Les processus les plus importants responsables de l'amélioration de la TSR seront aussi identifiés et discutés.

Le trafic impacte aussi le bilan hydrique de la surface de la route. Une mise en perspective d'une méthodologie d'intégration des impacts du trafic sur le bilan hydrique de la surface de la route est élaborée dans le **chapitre 4**. Les deux premières parties de ce chapitre décriront la configuration initiale du bilan hydrique du modèle TEB, les différents processus physiques de surface pris en compte dans la modélisation, ainsi que les améliorations apportées afin de décrire de manière plus réaliste le comportement de l'eau sur la surface d'une route urbaine. La troisième partie sera dédiée à la mise en oeuvre de TEB avec l'amélioration de la composante hydrologique pour des situations hivernales, et les effets sur la lame d'eau et la TSR. Dans la quatrième partie de ce chapitre, les approches possibles pour identifier comment le trafic modifie le bilan hydrique seront présentées, et le phénomène de la nébulisation de l'eau de surface de la route suite au passage des véhicules sera évalué. Une méthodologie d'intégration de ce phénomène dans la modélisation sera alors définie. Un point particulier de cette dernière partie expliquera comment est effectuée l'intégration de fondants routiers, couramment utilisé en exploitation hivernale, et affectant la température de congélation des eaux de surface à travers la modification de son calcul.

Enfin, le manuscrit s'achève sur un bilan des travaux réalisés et sur la mise en perspective des différents résultats obtenus, et des analyses et réflexions élaborées durant ce travail de thèse. Des propositions sur les études qui permettront de compléter et de poursuivre cette recherche seront également évoquées dans cette conclusion.

CHAPITRE 1

La viabilité hivernale. De la problématique globale aux modèles numériques locaux de prévision

Chapitre 1 : La viabilité hivernale. De la problématique globale aux modèles numériques locaux de prévision

En période hivernale, la surface de la chaussée située à l'interface entre l'atmosphère et la structure de celle-ci reposant sur le terrain naturel, est le siège d'échanges thermiques permanents et le lieu où se déposent les différents hydrométéores. En cas de neige ou de verglas, l'état de surface des infrastructures de transport se dégrade de façon plus ou moins importante, avec des effets négatifs sur la sécurité des usagers de la route et sur la mobilité. Sans l'intervention des équipes déployées par les gestionnaires de ces infrastructures, emprunter le réseau présenterait des possibilités fortement réduites, voire serait impossible. Ces interventions, regroupées sous le terme «*viabilité hivernale*» (VH), visent à garantir aux usagers des infrastructures de transport et de la route en particulier des conditions optimales de sécurité et de mobilité.

La première partie de ce chapitre se propose de faire le point sur le contexte général de la viabilité hivernale dans le monde et plus particulièrement en France. Les principaux objectifs de ses opérations ainsi que les impacts environnementaux associés par l'utilisation intensive et inadaptée de fondants routiers sont aussi présentés.

Les pays ayant une politique de viabilité hivernale disposent de nombreux outils, dont des modèles numériques de prévision de la température de surface de la route. La deuxième partie de ce chapitre s'attache à présenter un état de l'art non exhaustif de ces modèles physiques à travers le monde. Leur principe, les données d'entrée et les performances de chaque modèle seront présentés.

De nombreux facteurs ont une influence sur l'état de surface. En effet, le microclimat urbain, conjonction de la morphologie et de l'occupation du sol avec des conditions météorologiques, ou encore les flux de chaleurs anthropiques ont une influence plus ou moins importante sur l'état de surface des routes. Ces impacts du microclimat urbain peuvent être sensibles sous plusieurs formes : thermiques ou hydriques. Ainsi, ses différents effets seront présentés dans la troisième partie de ce chapitre.

1 Qu'est-ce que la viabilité hivernale (VH) ?

1.1 Quelques définitions

Afin de faciliter la compréhension de certains termes et notions fréquemment utilisés dans ce manuscrit, quelques définitions sont données.

La viabilité hivernale des infrastructures de transport se définit comme étant le «champ de compétences qui couvre l'ensemble des actions prises par tous les acteurs pour s'adapter à la dégradation des conditions de circulation en situations hivernales» (Sétra, 2010).

Le terme «chaussée» désigne la partie de l'infrastructure normalement utilisée pour la circulation des véhicules. Cette infrastructure peut comporter plusieurs chaussées séparées l'une de l'autre, notamment par un terre-plein central ou une différence de niveau. Dans notre cas d'étude, on désigne par l'expression « chaussée » l'intégralité de la structure verticale de la chaussée routière, constituée de plusieurs couches.

L'état de la route désigne les conditions thermiques et hydriques en surface du revêtement de la chaussée. Plus particulièrement, on s'intéresse à la température de surface du revêtement, utilisée pour la prévision d'un éventuel risque de gel ou de verglas, ou de tenue de la neige au sol.

La température de surface de la route est la température de la première couche de surface de la route. Elle est considérée suffisamment mince typiquement (de l'ordre de 0.001 m) pour que sa température soit représentative de la température à l'interface chaussée-atmosphère.

1.2 La viabilité hivernale, dans le monde et en France

La viabilité hivernale a fortement évolué avec l'accroissement des concentrations urbaines et avec la diversification de la demande de mobilité liée à la structure sociologique de l'habitat. De plus, les technologies de l'information et de surveillance (géo-localisation, etc.) ainsi que les engins d'entretien hivernal se sont améliorés afin de satisfaire au mieux les attentes des usagers des infrastructures. Aujourd'hui, alors que les contraintes budgétaires, environnementales et médiatiques se font croissantes, il devient nécessaire de réfléchir au judicieux déploiement de ces outils dans un contexte de développement durable. Néanmoins, l'organisation de l'entretien hivernal dans son ensemble, la gestion opérationnelle, les besoins

des usagers et de nombreux autres sujets dépendent directement des caractéristiques du pays. C'est la raison pour laquelle que cette première partie est d'abord établie pour faire le point sur les connaissances et les outils utilisés en viabilité hivernale dans le monde, et plus particulièrement en France.

1.2.1 La viabilité hivernale dans le monde

Les travaux sur la viabilité hivernale préoccupent l'ensemble des pays dont les climats affectent l'état de leurs infrastructures et le système de transport. Le réseau routier reflète le besoin de mobilité de la population qui l'utilise. Sa densité est intimement liée à la superficie du territoire à couvrir mais, elle reflète également la nécessité d'assurer le maintien et la sécurité des usagers de ces réseaux.

L'examen de la Figure 1 montre que les pays du continent européen ainsi que le Japon, qui possèdent de fortes populations réparties sur des territoires relativement plus restreints, présentent une densité de réseaux parmi les plus élevées. À l'inverse, et notamment sur le continent nord-américain (États-Unis, Canada), on trouve des populations relativement faibles en regard des territoires disponibles et, conséquemment, leur réseau respectif montre une densité parmi les plus faibles.

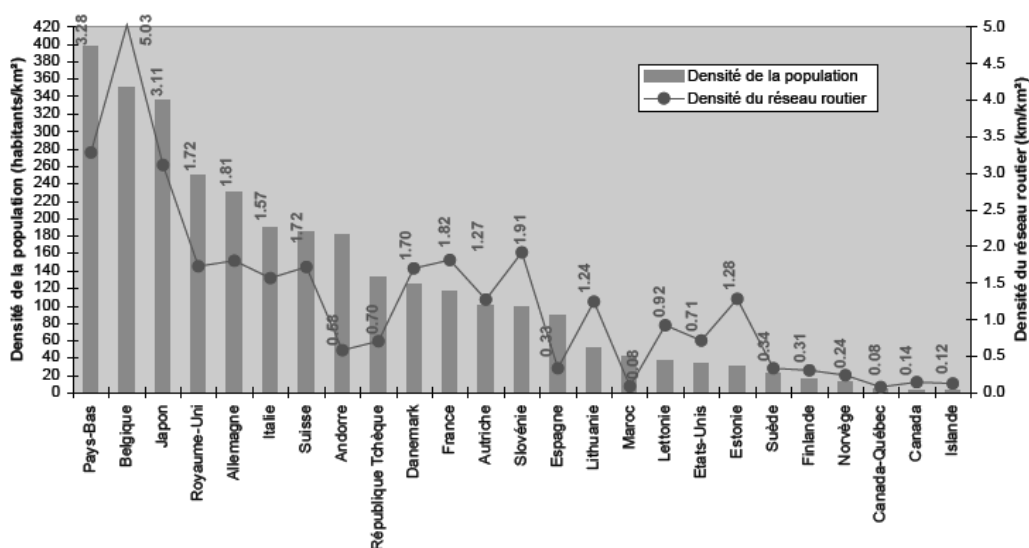


Figure 1. Densités de population et du réseau routier pour des pays avec une politique de viabilité hivernale, (Snow and Ice Databook, 2010)

Cette densité du réseau routier peut être considérée comme un indicateur important de la dispersion des besoins d'entretien hivernal et indirectement comme un paramètre qui influence les caractéristiques organisationnelles et opérationnelles du service hivernal des

pays. Il influence le niveau de décentralisation de l'exploitation, le dimensionnement des moyens opérationnels et le modèle économique choisi (agents de l'état, partenariat public-privé, etc.). En effet, la nécessité de satisfaire les besoins de mobilité d'une population dans un contexte hivernal exige, des différents responsables de réseau, des moyens et des efforts à la mesure des contraintes en place.

Outre que ces deux paramètres que sont la densité de population et la densité du réseau routier du pays, de nombreux types de climats sont responsables de la dégradation des conditions de circulation en hiver (Tableau 1). En effet, selon leur localisation géographique (proximité de la mer, à l'intérieur du continent) et les caractéristiques orographiques (topographie de montagne, plateau, vallée) que présente chaque pays, ceux-ci font face à différents types de conditions hivernales qui sont elles-mêmes caractérisées par leur fréquence, leur durée et leur intensité.

Tableau 1. Données climatiques des pays avec politique de viabilité hivernale (Snow and Ice Databook, 2010)

Pays	Climats
Allemagne	Tempéré – Continental – Maritime (dans certaines zones limitées)
Andorre	Tempéré – Méditerranéen – Montagneux
Autriche	Tempéré – Continental – Montagneux
Belgique	Tempéré maritime – Continental (dans certaines zones limitées)
Canada	Maritime – Continental – Subarctique – Arctique
Canada - Québec	Maritime (dans certaines zones) – Continental – Subarctique – Arctique
Danemark	Tempéré maritime
Espagne	Tempéré maritime – Continental – Montagneux – Méditerranéen
Estonie	Tempéré – Continental (dans certaines zones limitées)
États-Unis	Tempéré maritime – Continental – Montagneux – Subarctique
Finlande	Tempéré – Continental – Subarctique
France	Tempéré maritime – Continental – Montagneux – Méditerranéen
Islande	Maritime – Continental – Montagneux – Subarctique
Italie	Tempéré – Montagneux – Méditerranéen
Japon	Tempéré maritime – Continental – Montagneux
Lettonie	Tempéré maritime – Continental (dans certaines zones limitées)
Lituanie	Tempéré – Continental (dans certaines zones limitées)
Maroc	Tempéré maritime – Continental – Montagneux – Méditerranéen – Désertique
Norvège	Tempéré – Continental – Montagneux – Subarctique
Pays-Bas	Tempéré maritime
République tchèque	Tempéré – Continental – Montagneux
Royaume-Unis	Tempéré maritime
Slovénie	Tempéré – Montagneux – Méditerranéen
Suède	Tempéré – Continental – Montagneux – Subarctique
Suisse	Tempéré – Continental – Montagneux

Le tableau précédent représente les conditions climatiques de certains pays ayant une politique de viabilité hivernale. Il démontre que les pays les plus étendus sont soumis à différents types de conditions climatiques durant l'hiver même si, dans certains cas, ces différences se produisent dans des régions limitées spatialement ou de manière sporadique.

Les gestionnaires du réseau routier sont confrontés à différents phénomènes hivernaux. Le problème de satisfaire les besoins des usagers n'est pas seulement lié à la densité de population et aux conditions climatiques mais aussi à l'utilisation de l'infrastructure. En effet, le niveau de service de celle-ci dépend aussi de l'intensité du trafic, des modes de transport et de divers paramètres relatifs aux conducteurs (mentalité et aptitude, équipement des véhicules, etc.). Le Tableau 2 présente les principaux phénomènes que l'utilisateur peut rencontrer sur une route, ainsi que l'évolution de leur besoin en matière de services d'entretien hivernal.

Tableau 2. Besoins d'entretien et types de conditions hivernales pour des pays ayant une politique de viabilité hivernale, (Snow and Ice Databook, 2006)

Conditions météorologiques hivernales par rapport aux densités de population et de routes										
	Principaux types de conditions météorologiques hivernales									
Densité de population	Brouillard givrant	Gel long et sévère	Température fluctuant au tour de 0°C	Chute de neiges modérées	Chute de neiges brèves et importantes	congères	Verglas	Importante chute de neige	avalanches	Plus élevée <i>Besoins en matière d'entretien</i> Moins élevée
Elevée (>200 hab/km ²)	Belgique Allemagne Pays Bas Royaume-Unis	Japon	Belgique Allemagne Pays Bas Royaume-Unis	Belgique Allemagne Pays Bas Royaume-Unis	Belgique Allemagne Japon	Japon	Belgique Allemagne Japon Pays Bas Royaume-Unis	Japon	Japon	
Moyenne (<200 mais >80 hab/km ²)	Autriche Danemark France Suisse		Autriche Danemark France Italie Slovénie Espagne Suisse	Autriche Danemark France Italie Slovénie Espagne Suisse	Autriche France Italie Slovénie Espagne Suisse	Autriche Slovénie Suisse	Autriche Danemark France Italie Slovénie Espagne Suisse		Autriche Slovénie Suisse	
Basse (<80 hab/km ²)	Etats-Unis	Canada Finlande Norvège Québec Suède États - Unis	Estonie Islande Lettonie Lituanie Norvège Suède Etats-Unis	Norvège Québec Etats-Unis	Canada Norvège Québec Etats-Unis	Canada Islande Norvège Québec Suède Etats-Unis	Canada Estonie Finlande Islande Lettonie Lituanie Norvège Québec Suède États - Unis	Canada Finlande Norvège Québec Suède États - Unis	Norvège États - Unis	
	<i>Besoins en matière d'entretien</i> Moins élevée Plus élevée									

Pour les pays concernés par ces situations, des investissements significatifs sont réalisés dans la prévision des conditions météorologiques, de l'état des chaussées et dans la maintenance

des routes afin de permettre des déplacements sûrs tout en réduisant les délais. Les dépenses annuelles liées à la maintenance des routes durant l'hiver s'élèvent à environ 10 milliards de dollars dans le monde (Petty et Mohoney, 2008). C'est colossal, mais ce n'est rien comparé aux bénéfices qu'on peut en tirer, estimés à huit fois les coûts investis (Petty et Mahoney, 2008). Bien sûr, la vie de l'être humain ne peut, à aucun cas, être comparée avec ces chiffres. De plus, les coûts et les bénéfices varient selon les pays. En effet, chaque pays possède sa propre démographie, son organisation politique, son propre réseau routier, sa propre intensité de trafic et ses propres conditions climatiques. C'est pourquoi les stratégies de gestion opérationnelle des réseaux routiers sont spécifiques à chaque pays, voire à chaque région pour les pays vastes soumis à des conditions climatiques très différentes (Tableau 2). De même, l'usager a également son rôle dans la stratégie de gestion hivernale d'un réseau routier. Par exemple, les régions soumises à des conditions climatiques plus clémentes ont besoin d'un entretien hivernal très important, en raison d'une plus grande demande de la part des citoyens car les personnes vivant dans des régions au climat plus rude sont davantage habituées à des conditions de circulation difficiles (Snow and Ice Databook, 2006).

Pour répondre aux nécessités de déplacements et de transport ainsi qu'aux exigences de sécurité et de mobilité attendues par les usagers, les services d'exploitation hivernale, partout dans le monde, mettent en place différents niveaux de service. Ils ont recours à des traitements précuratifs ou curatifs à l'aide de fondants routiers, et principalement le chlorure de sodium (NaCl). Depuis plusieurs décennies, les réseaux scientifiques et techniques de ces différents pays sont devenus conscients des risques environnementaux que fait peser l'usage quasi-généralisé de ces produits. Par exemple, le Canada a d'abord inscrit les fondants routiers sur la liste des substances d'intérêt prioritaire, dont il fallait rapidement évaluer les effets sur l'environnement et la santé humaine. En 1999, les fondants routiers ont été inscrits au tableau des produits toxiques pour la protection de l'environnement de ce pays. Depuis, le Ministère du transport Québécois travaille sur les mesures à prendre pour encadrer l'usage des fondants routiers dans un esprit de développement durable. En Europe, de nombreux pays (Finlande, Norvège, Suède, Suisse et Allemagne) ont également inscrit la réglementation de l'usage de fondants routiers dans leur code de l'environnement. Elle se traduit, tout comme au Canada, par une optimisation des quantités à épandre et une suppression progressive de traitements dans les secteurs estimés «vulnérables».

En France, aucune réglementation n'encadre véritablement et spécifiquement l'usage des fondants routiers. Certaines législations, essentiellement dédiées à la prévision et à la

restauration des milieux ainsi que la quantité des eaux (de surface, souterraines et potables) peuvent toutefois approcher cette problématique. À titre d'exemple, les articles L, 216-6 et L. 432-2 du code de l'environnement répriment le fait de jeter, déverser ou laisser s'écouler dans les eaux superficielles, souterraines, directement ou indirectement, une ou des substances quelconques entraînant des effets nuisibles sur la santé ou des dommages à la flore ou à la faune [...]. La Directive Cadre sur l'Eau (DCE), du 23 octobre 2000 donne les préconisations sur la gestion des eaux de surface, souterraines, de transition et côtières pour prévenir et réduire les pollutions. La directive sur la responsabilité environnementale du 24 avril 2004 établit un cadre commun de responsabilité en vue de prévenir et de réparer les dommages causés sur la faune, à la flore, sur les habitats naturels et sur les ressources en eau, ainsi que ceux affectant les sols.

1.2.2 La viabilité hivernale en France

La France est un pays de taille moyenne sur la façade atlantique, dont la population de 65 millions d'habitants environ est répartie de façon plutôt inégale. Elle a une densité de population moyenne de l'ordre de 116,5 habitants/km². La géographie est très diversifiée tout comme le climat. Afin de mieux appréhender la viabilité hivernale en France, il est utile de présenter quelques aspects sur la climatologie et ses précipitations. Cinq régions climatiques principales peuvent être identifiées (Figure 2).

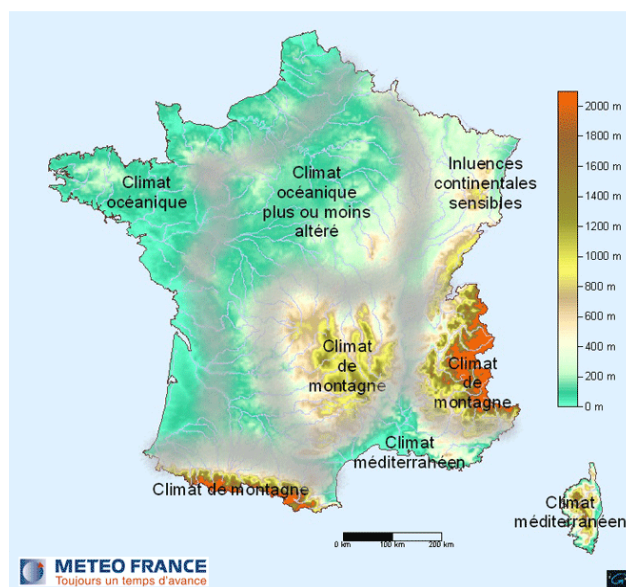


Figure 2. Régions climatiques en France (Météo-France, 2014)

Les différents types de climat en France ont permis de définir des zones selon la rigueur de l'hiver (Figure 3). À partir du nombre de jours avec chutes de neige, notés J_1 , du nombre de

jours avec du verglas lié à des précipitations, notés J_2 , et du nombre de jours avec du verglas ou de la neige sur les routes sans précipitations, notés J_3 , quatre zones climatiques hivernales ressortent, correspondant à :

- ❖ H1 : zone à hiver clément : si $J_1 + J_2 + J_3 \leq 10$ jours
- ❖ H2 : zone à hiver peu rigoureux : si $10 < J_1 + J_2 + J_3 \leq 30$
- ❖ H3 : zone à hiver assez rigoureux : si $30 < J_1 + J_2 + J_3 \leq 50$
- ❖ H4 : zone à hiver rigoureux : si $50 < J_1 + J_2 + J_3 \leq 90$

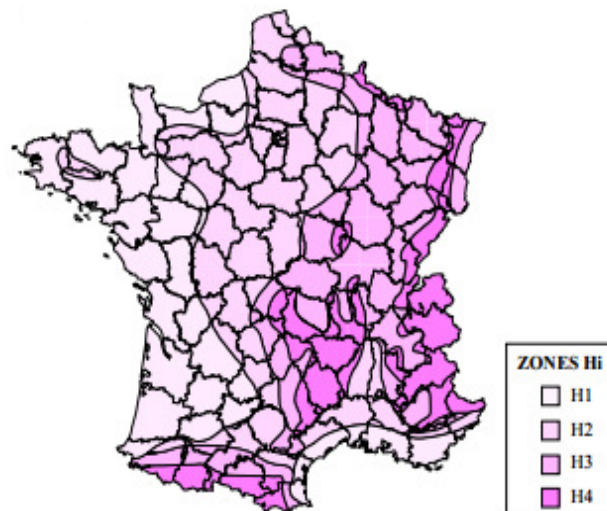


Figure 3. Zones climatiques hivernales en France (Snow and IceDatabook, 2006)

En France, il n'y a aucune obligation légale de faire de la viabilité hivernale. Des documents réalisés et diffusés par le Ministère en charge des infrastructures de transport terrestre définissent des règles générales. La circulaire de 1996 définit les niveaux de service et leur application sur les routes nationales (RN). Il existe aussi deux autres documents pour l'organisation de la viabilité hivernale en France, à savoir le DOVH (Dossier d'Organisation de la Viabilité Hivernale) et le PEVH (Plan d'Exploitation de la Viabilité Hivernale) (Sétra, 2006, 2013 ; DOVH, 2013, 2014).

❖ *Le DOVH*

Le DOVH est un document général dont l'objectif principal est de faire connaître aux divers acteurs concernés les objectifs, les limites et les dispositions générales et particulières prises pour limiter ou supprimer les conséquences de l'hiver sur le réseau routier. Il regroupe tous les principes et modalités d'actions au niveau d'un département et cela dans les différentes





situations. Il assure la cohérence aux diverses limites des réseaux et traite des relations entre les divers acteurs.

❖ *Le PEVH*

Le PEVH est un document, propre à chaque unité en charge des circuits de traitement, qui décrit l'ensemble des moyens et des procédures mis en place pour assurer pratiquement le service hivernal et les diverses actions qui s'y rattachent.

Avec ces documents (circulaire de 1996, DOVH département, PEVH local), on définit les niveaux de service en fonction des zones « H_i », du type de réseau ainsi que les conditions de circulation. Les conditions sont décrites explicitement, selon le phénomène rencontré, afin de permettre à chacun des acteurs de disposer d'une référence objective. Les conditions de circulations hivernales (C_1 à C_4) caractérisant objectivement la viabilité d'une route pendant l'hiver est un langage de référence commun à l'ensemble des acteurs. Dans la pratique, quatre niveaux de conditions de circulation sont utilisés, illustrés dans le Tableau 3.

Tableau 3. Définition des conditions de circulation

Condition de circulation hivernale	Figuration	Etat de chaussée		Traduction pour la communication et l'information des usagers		
		Verglas	Neige	Perception du danger	Probabilité d'un blocage	Conseil à diffuser aux usagers
C₁ Normal		Absence	Absence	Sans objet	Sans objet	« Soyez prudent » Une route ne peut jamais être considérée sans danger
C₂ Délicat		Formations localisées ou plaques de glaces	Fraîche enfaible épaisseur, ou fondante, ou fondue dans les traces	Faible, perte d'adhérence possible localement	Faible pour les VL, possible pour les PL	Réduisez votre vitesse et soyez très vigilants. Augmentez l'interdistance entre véhicules
C₃ Difficile		Formations généralisée par congélation d'humidité existante	Fraîche en épaisseur importante, ou tassée et gelée, ou congères en formation	Aisée pour la neige faible pour le verglas	Forte, d'autant plus que le trafic est important	Différez votredéplacement si vous ne pouvez pas monter deséquipementsshivernaux adaptésur votre véhicule.
C₄ Impossible		Formations généralisée suite à des pluies verglaçantes	Fraîche entrès forteépaisseur, ouformation d'ornières glacées, ou congères formées	Evidente	Blocage effectif quipeutengendrerdess Problèmesde sécuritécivile	Ne circulez pas

Les opérations d'entretien hivernal visent à assurer la sécurité des usagers et à maintenir la fluidité de la circulation. La sécurité concerne essentiellement la qualité de l'adhérence des usagers des infrastructures (piétons, véhicules, etc.). Un bon niveau de sécurité reste un juste compromis entre l'effort consenti en exploitation, d'une part, et l'attitude préventive des usagers quant aux dangers qui surviennent (anticipation, analyse, adaptation du comportement) d'autre part. La fluidité est compromise par ce qui gêne l'avancement (épaisseur de neige, visibilité très réduite) et la réduction de la largeur des voies de circulations (andains ou bancs de neige réduisant la largeur). Les opérations d'entretien hivernal visent en premier lieu à maintenir, durant les phénomènes hivernaux, un certain niveau de sécurité, puis à rétablir la fluidité de la circulation. Afin d'utiliser avec efficience les ressources disponibles, l'entretien d'un réseau doit se faire selon un ordre de priorité en fonction de l'importance de différents éléments constitutifs (trottoir, rue, avenue, autoroute, etc.). De plus, l'entretien se fait selon différents niveaux de service qui tiennent compte de cet ordre de priorité. En effet, durant une intempérie, les niveaux de service établissent dans un premier temps la condition minimale en-dessous de laquelle on ne souhaite pas descendre durant et après l'intempérie. Par la suite, la condition acceptable que l'on vise à rétablir après l'intempérie. Et enfin, le délai pour revenir à la condition de circulation acceptable après l'intempérie. Ce délai est compté à partir de la fin du phénomène et tient compte de l'effet du trafic sur le réseau routier.

Il est à noter que certains facteurs rendent le maintien de la condition minimale et l'atteinte de la condition finale, dans les délais prescrits, difficiles, voire impossibles (exemple de la concomitance de l'heure de pointe avec une forte intensité de chute de neige, une vague de froid intense).

1.3 Les opérations relatives à la viabilité hivernale et pourquoi ?

Sur la base des prévisions délivrées par les services de météorologie, des données des stations météorologiques installées sur leur réseau et des patrouilles réalisées par leur personnel, les gestionnaires routiers décident des traitements les plus appropriés.

Aux deux phénomènes neige et verglas, on propose d'abord le salage et le sablage, puis le raclage et l'évacuation de la neige. Le salage constitue le moyen efficace pour lutter contre le verglas, tandis que le raclage permet de lutter contre la neige, mais on peut aussi racler un verglas épais ou bien saler en cas de chute de neige. On peut aussi distinguer deux sortes

d'interventions. Les interventions préventives se produisent avant l'occurrence de neige ou de verglas sur la chaussée. Celles curatives interviennent après l'apparition du phénomène. Les opérations de maintenance utilisées sont l'épandage de fondants (appliqués de manière préventive ou curative) et le déneigement.

1.3.1 Le raclage ou le déneigement

La neige peut avoir, au moment de sa chute, des caractéristiques variables en fonction de sa température. On distingue en particulier la neige froide et sèche, qui n'est pas compactable, la neige humide qui l'est, et la neige mouillée qui est compactable et ruisselante. Après sa chute, la neige peut passer progressivement de l'état de neige molle à l'état de neige dure, ce qui change les moyens à mettre en œuvre. La hauteur de neige influe beaucoup également sur le choix des matériels de lutte (lame, chargeur, sableuse, etc.).

L'opération de raclage consiste à pousser la neige sur l'accotement (ou des deux côtés de l'engin de déneigement) pour l'évacuer à distance. Cette opération de déneigement reste imparfaite et laisse des quantités de neige et/ou d'eau sur la surface de la chaussée. Avec des températures très basses, cela peut engendrer l'apparition du phénomène de verglas. C'est pour cela que les opérations de raclages sont généralement suivies par celles d'épandage des fondants routiers par mesure de sécurité contre le verglas.

1.3.2 L'épandage de fondants routiers (salage)

Le salage consiste à répandre sur les chaussées des produits dont la fonction est d'empêcher la formation de la glace ou à provoquer la fusion de la glace déjà présente.

1.3.2.1 Qu'est-ce qu'un fondant routier ?

Un fondant routier est un produit solide ou liquide dont les caractéristiques physiques permettent de déplacer l'équilibre entre phases pour abaisser le point de congélation de l'eau. Le fondant routier le plus utilisé en France est le chlorure de sodium, en raison de son efficacité dans les gammes des températures de surface d'utilisation rencontrées (0 à -22°C en laboratoire et 0 à -8°C sur le terrain) et en raison de son prix. En viabilité hivernale, son application sur la glace ou sur la pellicule résiduelle de neige après un raclage permet de favoriser leur fusion même à des températures négatives, tant que l'hygrométrie est au-dessus d'un seuil (Kaufmann, 1960). Le NaCl présent en surface s'humidifie en captant la vapeur d'eau présent dans l'atmosphère si l'humidité relative est supérieure à 75%.

1.3.2.2 Mode d'application et d'action des fondants routiers

Deux types d'actions ont été mis en place par les services en charge de la viabilité hivernale. La première intervention est préventive ou pré-curative, et consiste à intervenir avant l'apparition de la neige et/ou du verglas sur la surface de la chaussée. La seconde procédure est dite curative. Dans ce cas, une pellicule de neige ou de verglas est déjà présente. Le rôle du fondant est alors d'entamer la fusion de celle-ci. La fonte de la neige se traduit par un abaissement de la température de la chaussée (réaction endothermique avec du NaCl), ce qui peut amener de nouveau à une situation d'une route verglacée.

Un fondant routier est un produit hydrosoluble. Le mélange constitué a pour conséquences de diminuer la tension de vapeur d'eau du mélange aqueux, déplacer le point d'équilibre liquide/solide au profit de la phase liquide et d'abaisser la température de congélation du mélange.

Quelle que soit la forme d'application, son efficacité n'est possible que sous forme de saumure (Kaufmann, 1960, Blackburn et *al.*, 2004). L'eau nécessaire pour son humidification peut provenir des phénomènes glissants (eau en surfusion solidifiée, glace vive, neige sèche, etc.) sur la surface traitée, ou bien en captant la vapeur d'eau de l'atmosphère. Ce phénomène d'hydratation n'est pas instantané et peut ne pas se produire par manque d'eau (Marchetti et *al.*, 2006a).

1.3.2.3 Durée de vie des fondants routiers sur les chaussées

La durée de vie d'un fondant routier répandu en période hivernale dépend de nombreux facteurs:

- ❖ le type de fondant utilisé (solide, liquide) et son mode d'épandage (largeur d'épandage, grains, bouillie, etc.)
- ❖ la capacité d'interception et de maintien à la surface routière (macrotexture, microtexture, pentes transversale et longitudinale, etc.)
- ❖ la nature et l'importance du trafic (VL, PL, projection, abrasion, transport, etc.)
- ❖ les conditions d'humidité atmosphérique (hydratation, dilution, etc.), et l'importance des précipitations associées
- ❖ les conditions d'humidité à la surface du revêtement (eau, glace, dilution, drainage de la surface, viscosité dynamique).

En raison de la complexité et de la diversité des paramètres d'influence, il est difficile de prévoir avec précision la durée de vie des fondants sur la chaussée (Sétra, 2013).

1.3.3 Le sablage

D'autres techniques existent, mais restent marginales par rapport à l'utilisation de fondants. Par exemple, l'utilisation préventive de sable, qui peut être chauffé (Vaa, 2004, 2006) ou encore la circulation d'eau dans des canaux (Mimura et *al.*, 2004). L'opération de sablage ne consiste pas à faire fondre la glace mais à compenser la perte d'adhérence en répandant sur la chaussée des produits abrasifs et minimiser les impacts environnementaux.

Les abrasifs doivent être choisis selon le type de glace à traiter. En présence de neige, il convient d'utiliser un matériau anguleux, d'une granulométrie étalée. En présence de glace, il est conseillé d'employer un matériau avec du sel et plus fin. Les dosages peuvent aller de 50 g/m² à 300 g/m². Le moment le mieux adapté pour le sablage se situe avant le dégel, ce qui permet de "clouter" la surface de la glace.

Par rapport au salage, le sablage présente les avantages de rester efficace même pour des températures très basses et de ne pas avoir d'effet négatif sur l'environnement. Les inconvénients sont une efficacité faible, des dosages élevés et le nettoyage ultérieur. En effet, après le dégel, la présence de matériaux sur la chaussée altérerait l'adhérence. Les pratiques de ce genre d'opération sont très diverses. Dans des zones où les préoccupations écologiques ont un poids plus important, le sablage est considéré comme le mode de traitement normal et le salage est alors réservé aux zones délicates, en association avec le sablage.

Le sablage est la méthode la plus ancienne d'entretien hivernal, qui a retrouvé un regain d'intérêt ces dernières années, stimulé par les discussions sur les impacts environnementaux. Dans les régions où les hivers sont rigoureux avec de longues périodes de fortes chutes de neige (Nord de la Scandinavie ou dans les Alpes), cette technique a toujours conservé son importance.

1.3.4 Les impacts environnementaux de fondants routiers

La quantité annuelle de fondants routiers épandue en France a varié entre 200 000 et 2 000 000 tonnes sur les quarante dernières années (Figure 4). Elle a crû au cours de ces dernières années avec le linéaire du réseau routier à traiter et reste très marquée par le caractère aléatoire de la rigueur de différents hivers.

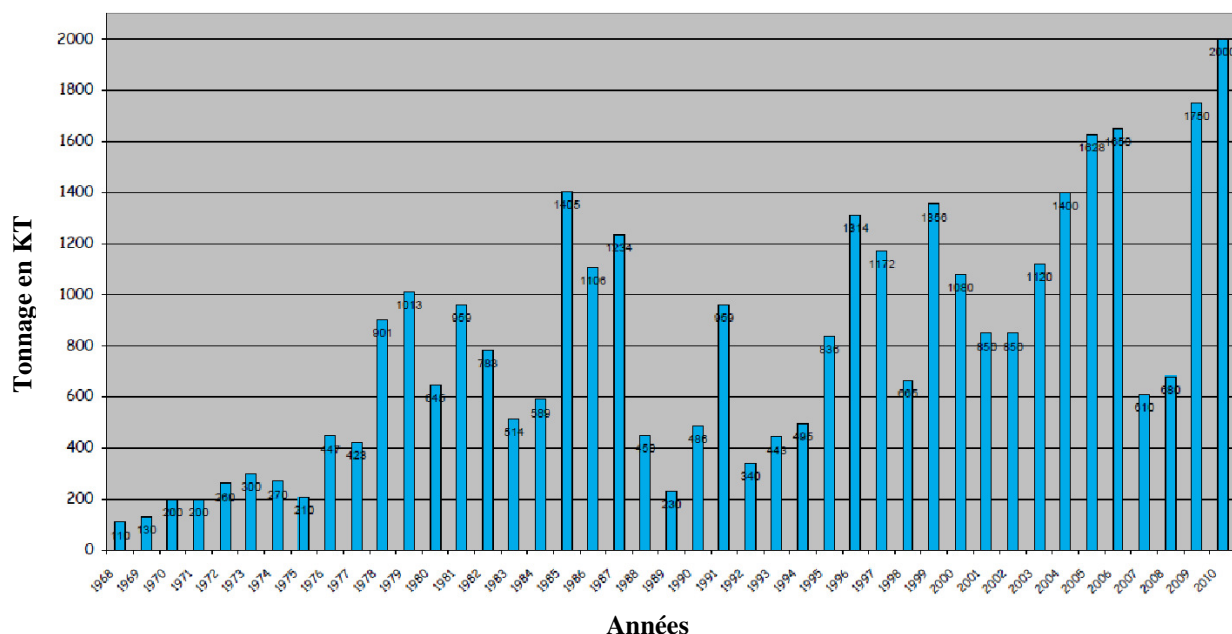


Figure 4. Estimation des ventes de fondants routiers réalisées en France sur les 40 dernières années (Cerema-DTER-Est / Asselvia)

Depuis sa production à son utilisation (épandage) en passant par le transport et le stockage, le fondant routier a un impact sur l'environnement. L'ampleur de ces impacts diffère selon comment il parvient dans l'environnement. Ces impacts se manifestent sur les différents compartiments de l'environnement (eaux, sols, milieu naturel, etc.). En fonction de la durée de l'exposition aux pollutions générées par l'activité hivernale, les organismes peuvent subir des effets consécutifs à une toxicité «chronique» (exposition sur le long terme) ou à une toxicité «aigüe» (exposition sur le court terme).

La réduction des impacts des fondants routiers doit prendre en compte toutes les étapes propres à son cycle de vie (Sétra, 2011). La connaissance des impacts doit également être améliorée ainsi que la sensibilisation des gestionnaires aux risques environnementaux.

Depuis plusieurs décennies, les réseaux scientifiques et techniques des services d'exploitations hivernales sont devenus conscients des risques environnementaux que fait peser l'usage quasi généralisé de fondants sur le réseau routiers. De ce fait, ils ont commencé à chercher par des actions de formations et des productions scientifiques, normatives et réglementaires, à sensibiliser les exploitants de la route à la maîtrise des quantités de fondant ainsi épandues. Le traitement des infrastructures dans le cadre de la viabilité hivernale est mis en œuvre uniquement "*où* et *quand*" cela est nécessaire. Ce but peut être atteint par l'implication de la recherche météorologique dans un programme de viabilité hivernale des routes.

1.4 État des connaissances et pistes d'actions

La nécessité d'assurer la viabilité hivernale est évidente, tant sur le plan économique que pour la sécurité routière et la mobilité. En effet, l'entretien hivernal des infrastructures par le fondant routier permet de réduire de 15 à 20% le risque d'accidents sur chaussée glissante, de fluidifier le trafic et de limiter la consommation de carburant due à la circulation automobile (Sétra, 2013). Les aspects liés au respect de l'environnement, au développement durable et à l'économie d'énergie incitent à utiliser ces fondants routiers de manière optimale, c'est-à-dire un minimum de sel répandu pour une efficacité satisfaisante. Ainsi, l'anticipation des interventions est une des pistes générales d'amélioration de la viabilité hivernale. En effet, il est souvent plus efficace, d'un point de vue pratique et plus satisfaisant aussi par rapport au service à assurer, d'empêcher, de retarder ou de limiter l'apparition d'un phénomène glissant que de vouloir l'éliminer lorsqu'il est apparu. La clé d'une prise de décision efficace en viabilité hivernale est donc de connaître à l'avance un risque de verglas, son lieu d'occurrence, ainsi que le possible tenue de la neige au sol. Au cours des vingt dernières années, les services de la viabilité hivernale ont reconnu que les modèles numériques de prévision de l'état de surface des routes étaient des outils particulièrement appropriés à l'amélioration de la mobilité et à la sécurité durant les périodes hivernales. Ces modèles fournissent les données prévisionnelles de "*où et quand*", par exemple, du verglas est susceptible de se former et ce pour les aider à décider du lieu et de l'heure de l'intervention préventive. Cette méthode aide les gestionnaires des infrastructures à maintenir, voire à améliorer la mobilité, le niveau de la sécurité routière tout en optimisant les quantités de fondants utilisées, les ressources en homme et matériel et en réduisant les impacts sur l'environnement. Depuis le milieu des années quatre-vingts, de nombreux modèles ont été développés dans ce but (Thornes, 1984 ; Paumier et *al.*, 1989 ; Rayer, 1987 ; Shao, 1990 ; Sass, 1992) et continuent de l'être (Chapman, 2000 ; Chapman et *al.*, 2001a ; Bouilloud, 2006).

2 Les modèles de prévision. Quels paramètres ? Pour quelle utilisation ?

Les systèmes d'information météorologique routière (RWIS: Road Weather Information System) sont utilisés pour connaître les variations de la température de surface des chaussées. Les prévisions météorologiques routières fournies par les prévisionnistes utilisent parfois des stations météorologiques routières automatiques placées en des sites stratégiques. Ces stations

routières mesurent des paramètres météorologiques et routiers (TSR, état de surface, etc.). Ses données sont ensuite acheminées vers un centre de traitement où elles sont combinées à des informations météorologiques régionales pour alimenter des modèles de prévision des conditions météorologiques routières. De nombreux modèles ont été développés et utilisent soit un bilan d'énergie à la surface de la chaussée (Sass, 1992, 1997), soit une équation unidimensionnelle de conduction de la chaleur dans le sol (Shao et Lister, 1996), soit une approche neuronale (Krsmanic et *al.*, 2011). Tous ont pour but de produire des températures de surface de la chaussée et des conditions routières prévisionnelles à partir de prévisions météorologiques (Thornes, 1991).

Dans ce paragraphe nous présenterons un état de l'art non exhaustif des modèles numériques de prévision de la température de surface. Le principe, les données d'entrée et les performances de chaque modèle seront présentés. Un tableau de synthèse sera proposé dans la dernière partie de ce paragraphe.

2.1 Le modèle IceBreak

Au Royaume Uni, un modèle de prévision automatique à courte échéance (3 à 6 heures) du verglas routier a été développé en 1996 par Shao et Lister (Shao et Lister, 1996). C'est un modèle numérique de prévision de la température de surface de la route, de l'état de la chaussée (sèche, humide, mouillé, neige, verglas, etc.) et de l'indice d'adhérence de la surface de la route. Le modèle se base sur l'équation de conduction de la chaleur, à une dimension, dans le corps de la chaussée associée à un calcul de la condition initiale et de conditions aux limites (Shao et Jones, 2012). L'équation régissant le modèle est la suivante :

$$C \frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_c \frac{\partial T(z, t)}{\partial z} \right) \quad 1.1$$

où, C est la capacité thermique volumique ($J/m^3/K$), λ_c la conductivité thermique ($W/m/K$) et $T(z, t)$ (K) la température à un instant t et à la profondeur z de la chaussée. Ce modèle se base sur l'hypothèse que la chaussée est horizontalement homogène et que les transferts latéraux de chaleur sont négligeables. Le profil vertical initial de température dans le sol constitue la condition initiale. La condition à la limite inférieure, à 1 m de profondeur, est traitée comme une constante climatologique. La condition à la limite supérieure est décrite par le bilan énergétique à la surface de la route. Le modèle est alimenté par un historique de 24 heures de mesures météorologiques in situ et par des paramètres physiques ajustables au site étudié. Les

variables météorologiques ainsi que les paramètres physiques nécessaires au fonctionnement du modèle sont respectivement donnés par le Tableau 4.

Tableau 4. Variables météorologiques et paramètres physiques d'entrée du modèle IceBreak.

Variables météorologiques
Température de l'air des 24 dernières heures
Température du point de rosée des 24 dernières heures
Vitesse du vent des 24 dernières heures
Précipitation au départ de la prévision
Température et état de la surface du revêtement de la chaussée au départ de la prévision
Profil de la température du corps de la chaussée au départ de la prévision
Pression atmosphérique
Facteur de visibilité du ciel (1 pour un ciel clair et 0 pour un ciel entièrement couvert)
Paramètres physiques
Latitude et longitude
Émissivité de la surface de la route (de 0 à 1)
Coefficient de rugosité de la surface de la route (de 0 à 1)
Conductivité thermique de la route (λ_c)
Capacité thermique volumique de la route (C)
Température climatique du sol à 1 m de profondeur en période hivernale

Les tests de sensibilité du modèle ont montré que les paramètres les plus influents sur la précision de la prévision de la température de surface par ce modèle sont **le coefficient de rugosité et l'émissivité de la route**. Pour améliorer la précision de la prévision, le modèle réalise l'ajustement dynamique de ces deux paramètres. Cet ajustement est réalisé en recherchant les valeurs optimales de ces paramètres permettant de donner le minimum d'écart entre la prévision et la mesure.

2.2 Le Road Conditions Model (RCM)

Au cours des vingt dernières années, l'Institut Danois de Météorologie (DMI) a produit des prévisions météorologiques sur plusieurs points du réseau routier danois (200 stations météo-routières dispersées sur tout le pays). À chacun de ces points, la température de surface de la route (TSR), la température d'air et de point de rosée à 2 m de hauteur ont été mesurées avec un pas de temps de 10 mn. Avec ces données, le DMI a développé un système automatique de prévision de l'état des routes nommé, Road Conditions Model « RCM » (Sass, 1992, 1997). Ce modèle se base sur la résolution de l'équation de la chaleur entre la surface de la chaussée et l'atmosphère. Les paramètres nécessaires au fonctionnement de ce modèle sont les variables météorologiques issues du modèle atmosphérique High Resolution Limited Area

(HIRLAM) et les variables atmosphériques issues des observations synoptiques. L'ensemble de ces paramètres est présenté dans le Tableau 5.

Tableau 5. Paramètres météorologiques d'entrée du modèle RCM

Données issues de HIRLAM
N : Nombre de niveaux du modèle atmosphérique HIRLAM T_i : Température à chaque niveau atmosphérique (°C) ; avec i allant de 1 à N q_i : Humidité spécifique à chaque niveau atmosphérique (kg/kg) ; avec i allant de 1 à N T_{2m} : Température à 2 m de hauteur (°C) q_{2m} : Humidité spécifique à 2 m de hauteur (kg/kg) V_{10m} : Vitesse du vent à 10 m de hauteur (m/s) Q : Intensité des précipitations (kg/m ² /s) P : Pression atmosphérique (Pa)
Données Synoptiques
C_{ob} : Fraction de couverture de ciel H_{ob} : Altitude des nuages
Données issues des stations météo-routières
T_{2m} : Température à 2 m de hauteur (°C) Td_{2m} : Température de rosée à 2 m de hauteur (°C) T₁ : Température à la surface de la chaussée (°C)

L'originalité de ce modèle est sa capacité à initialiser, à chaque pas de temps, les termes du bilan énergétique à la surface de la route, à savoir les flux de chaleurs sensible et latente ainsi que les flux radiatifs. Ceci à partir des données d'entrée issues des stations météo-routières (température, humidité, couverture nuageuse, vitesse du vent et précipitations).

Au début, le modèle était testé sur un nombre limité des stations. À partir de 1995, le modèle est devenu opérationnel sur toutes les stations météo-routières danoises. Le modèle fournit une prévision de la TSR chaque heure sur une période de 5 heures, et avec une marge d'erreur de 1°C maximum (Sass, 1997).

2.3 Le modèle IceMister

Le modèle IceMister a été développé en 2001 par Chapman et *al.* (Chapman et *al.*, 2001a, 2001b). Ce modèle simule le transfert de flux énergétiques, à un endroit donné, entre la route et l'atmosphère. La température de surface de la route représente la température d'équilibre entre ces deux milieux (route et atmosphère). Ceci est expliqué par l'équation suivante :

$$(1 - A)(R_{dir} + R_{diff}) + \psi \sigma T_c^4 - \sigma T_s^4 - R_n = H + LE + G \quad 1.2$$

où A est l'albédo de la chaussée, R_{dir} la densité du flux de rayonnement solaire direct (W/m^2), R_{diff} la densité du flux de rayonnement solaire diffus (W/m^2), σ la constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \cdot 10^{-8} W/m^2/K^4$), T_c la température de la couche limite inférieure de l'hémisphère céleste (K), ψ le facteur de vue de ciel (appelé aussi Sky View Facteur), T_s la température de la surface de la route (K), R_n la densité du flux de rayonnement net infrarouge reçue par la surface de la route (W/m^2), LE la densité du flux de chaleur latente (W/m^2), H la densité du flux de chaleur sensible (W/m^2) et G la densité du flux conductif dans le sol (W/m^2).

L'originalité de ce modèle repose sur la prise en compte de l'influence des paramètres géographiques sur la TSR, ainsi que leurs influences sur les processus du bilan énergétique de surface de la route (Tableau 6).

Tableau 6. Paramètres géographiques intégré dans le modèle IceMister

Paramètres géographiques	Utilité dans le modèle
Latitude	Calcul géométrique de R_{dir} et R_{diff}
Altitude	Quantifie la variation de la température d'air
Topographie	Indice de refroidissement pour la température d'air
Le facteur de vue de ciel	Calcul du flux radiatif reçu par la surface de la route
Projection	Liée au facteur de vue de ciel, et intervient dans le calcul du flux radiatif de surface
Occupation de sol	Calcul des propriétés thermiques du milieu (urbain, périurbain, rural, etc)
Structure routière	Paramétrisation du profil de la température dans la structure routière

Le modèle produit, pour chaque site, des prévisions de la TSR pour ces paramètres géographiques spécifiques. Les prévisions sont fournies chaque jour à midi pour les 24 heures à venir mais elles sont constamment actualisées par la prise en compte des données issues des stations météo-routières (T_{air} , humidité, vitesse du vent, etc.). La marge d'erreur, estimée par la méthode des moindres carrés, accordée à la prévision de la TSR par ce modèle est de l'ordre de $1^\circ C$ (Chapman et *al.*, 2002 ; Thornes et *al.*, 2004).

2.4 ISBA-Route (Météo-France)

Le modèle ISBA (Interaction between Soil-Biosphere-Atmosphere) est un modèle de surface développé par le Centre National de Recherches Météorologiques de Météo-France (Noilhan et Planton, 1989 ; Noilhan et Mahfouf, 1996). ISBA modélise le transfert de masse et d'énergie entre la surface de sol et l'atmosphère. En 2006, Bouilloud et Martin (Bouilloud et

Martin, 2006) ont adapté ce modèle à la problématique des chaussées. Le modèle ainsi élaboré, ISBA-Route, étudie l'état thermique et hydrique de la surface de la chaussée. La chaussée est représentée par un modèle à N niveaux sur une profondeur de 10 mètres. Un bilan d'énergie et de masse ainsi qu'une équation de conduction de la chaleur dans le sol est résolu pour chaque couche. Un profil vertical des températures et du contenu en eau de la chaussée sont restitués. La première couche de surface est considérée suffisamment mince pour qu'elle représente la température à l'interface sol-atmosphère. ISBA-Route nécessite la connaissance des propriétés physiques, thermiques et hydriques de la chaussée, et il doit également être alimenté par des données météorologiques telles que l'humidité de l'air, la vitesse du vent, la température de l'air, le rayonnement solaire global, le rayonnement atmosphérique infrarouge et la quantité de précipitations solides et liquides.

Le Modèle ISBA-Route a été couplé avec le module de neige CROCUS pour la modélisation de l'évolution de la couche de neige à la surface de la route (Bouilloud, 2006). L'étude de validation de ce modèle (ISBA-Route/CROCUS) a été réalisée avec les données issues du site expérimental de Météo-France situé au Col de Porte (1320 m, Isère). Les résultats de cette étude montrent une bonne adéquation entre la mesure et la prévision. Ce travail a permis d'évaluer les échanges thermiques et hydriques mis en jeu à l'interface entre la chaussée et la neige.

2.5 Le modèle Road Surface Temperature (RST) forecast

Le RWIS suédois est constitué de plus de 660 stations météorologiques routières. Ces stations représentent différents types de microclimats et de conditions climatiques locales à savoir la présence des ponts, des vallées, des sections de routes ombragées, des collines, etc. Les recherches et les développements scientifiques autour de ce sujet ont montré l'importance de la prise en compte de ces spécificités dans la prévision de la TSR (Borgen et *al.*, 2000, Chapman et *al.*, 2001a).

L'algorithme du modèle couple trois approches différentes. La première approche numérique se base sur la résolution du bilan énergétique de surface de la route. La deuxième se base sur un module statistique avec, bien sûr, des données spécifiques pour chaque site étudié. La troisième calcule la température de surface de la chaussée avec un modèle de tendance linéaire. Les prévisions sont déterminées par une combinaison complexe de critères où la

tendance précédente mise en relation avec la signature thermique représente le paramètre le plus important.

Selon le moment de la journée et les conditions météorologiques, les gestionnaires du réseau routier choisissent le module le plus pertinent soit en mode offline, soit couplé avec les autres modules. Les données d'entrée du modèle de prévision sont fournies par les stations météorologiques du réseau RWIS mais également par l'Institut Suédois de Météorologie et d'Hydrologie (Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)). Le SMHI fournit des données prévisionnelles telles que la température de l'air et la couverture nuageuse. Le RST forecast donne des prévisions de la TSR toutes les 30 minutes sur une période de 2 à 4 heures. La marge d'erreur, estimée avec la méthode de l'écart absolu moyen, accordée à la prévision de la TSR par ce modèle augmente avec la période de prévision et est de l'ordre de 0.7 °C pour une période de 2 heures et de 1.4°C pour 4 heures. L'originalité de ce modèle repose sur la prise en considération des influences apportées par les microclimats locaux sur la prévision de la TSR. Dans ce cas, le microclimat est représenté par des variations des paramètres géographiques d'un endroit à un autre.

Les principales caractéristiques des différents modèles sont récapitulées dans le Tableau 7 ci-après.

Tableau 7. Principales caractéristiques de différents modèles

Pays	Nom du modèle	Originalité du modèle	Référence
Grande-Bretagne	IceBreak	Ajustement automatique du coefficient de rugosité et de l'émissivité de la route pour réduire les écarts entre la prévision et la mesure.	Shao 1990
Danemark	DMI-Hirham-R	Recalcule les conditions initiales du bilan énergétique de surface de la route à chaque pas de temps de simulation.	Sass 1992
Grande-Bretagne	IceMister	Prise en compte l'influence des paramètres géographiques sur la TSR. Les paramètres sont : latitude, l'altitude, la topographie, la projection, le facteur de vue de ciel, l'occupation du sol et la structure de la route.	Chapman et <i>al.</i> , 2001a
France	ISBA-Route/CROCUS	Modélisation des échanges thermiques et hydriques mises en jeu à l'interface entre la chaussée et la neige	Noilhan et Mahfouf, 1996 ; Bouilloud 2006
Suède	RST-Forecast	Prise en considération des influences apportées par les microclimats locaux sur la prévision de la TSR. Le microclimat est représenté par des variations locales des paramètres géographiques.	Borgen et <i>al.</i> , 2000

D'autres modèles numériques existent, tant pour la prévision de l'état de surface des routes que pour la TSR (Thornes 1984 ; Rayer 1987 ; Sass 1992 ; Jacobs et Raatz 1996 ; Paumier et Arnal, 1998 ; Crevier et Delage, 2001). Ces modèles sont majoritairement unidimensionnels et verticaux, basés sur la résolution du bilan énergétique à la surface de la route.

2.6 Modèles de prévision et configuration climatique de la zone d'étude

Pour la viabilité des infrastructures en conditions météorologiques dégradées, la nécessité de prévoir à l'avance l'état de surface est évidente. Dans ce cadre, l'utilisation des modèles numériques de prévision de la TSR représente un outil primordial pour les services en charge de l'exploitation hivernale. En effet, ces modèles les aident à décider du lieu et de l'heure de l'intervention préventive. Cependant, la performance de ces modèles est liée à la configuration pour laquelle ils ont été élaborés. En effet, un modèle pour une configuration d'autoroute ou périurbaine ne peut en aucun cas fournir des prévisions de TSR fiables pour une configuration urbaine. Ainsi, certains des services d'exploitations hivernales utilisent des modèles non adaptés ni à la spécificité de la configuration de la zone d'étude ni aux conditions climatiques. Les modèles développés pour l'étude des phénomènes climatiques estivaux devraient être amendés et adaptés pour des conditions climatiques hivernales. De la même manière, la configuration spécifique du milieu urbain diffère de celui périurbain, autoroutier et aéroportuaire. Ainsi, le choix du modèle convenable à la situation et aux conditions climatiques est primordial, surtout en viabilité hivernale reliant à la fois la vie humaine (risque d'accidents), la mobilité, et l'environnement (impacts nocifs de fondants routiers).

Un milieu urbain se caractérise par sa morphologie, ses apports énergétiques anthropiques (trafic, industrie, climatisation, etc.), ainsi que des opérations d'entretiens des routes assez spécifiques (rues étroites, voies cyclables, trottoirs, végétations, etc.). Ainsi, ces aspects et autres participent à la création d'un microclimat spécifique au milieu urbain. L'étude de ce microclimat pendant les périodes estivales (îlots de chaleur urbain (ICU), confort urbain, rejets thermiques des bâtiments, etc.) diffère de celui en période hivernale. Par exemple, les aspects spécifiques de la morphologie urbaine tels que, l'occupation du sol, la densité de bâtiments, les impacts sur l'écoulement d'air ainsi que le comportement thermique des matériaux modifient le bilan énergétique en ville et augmente la température d'air (Dettwiller, 1978 ; Gustavsson et *al.*, 2001 ; Crutzen, 2004 ; Colombert, 2008). En période estivale, cette augmentation de température perturbe le confort urbain et provoque une consommation

supplémentaire en énergie à cause de la climatisation. Cependant, en période hivernale, cette augmentation participe au réchauffement des parois des bâtiments, ce qui se traduit indirectement par la réduction en consommation d'énergie pour le chauffage. De même, les apports énergétiques d'origine anthropique, en particulier ceux thermiques du trafic, sont pris en compte différemment dans la modélisation du bilan énergétique en ville entre la saison estivale et celle hivernale.

Ces aspects spécifiques du microclimat urbain n'ont cependant été intégrés que d'une façon marginale, ou n'ont pas été pris en compte dans la modélisation des paramètres de surface et du bilan énergétique en ville. Dans notre cas d'étude, on s'intéresse à la modélisation de l'état de surface de la route. Ce dernier, en dehors des paramètres météorologiques, géographiques et de la structure de la chaussée, est influencé aussi par les caractéristiques spécifiques de la zone d'étude (urbain, périurbain, rurale, autoroute, etc.) (Escourrou 1982, 1991 ; Rayer, 1987 ; Paumier et Arnal, 1998). Néanmoins, la littérature ainsi que la précédente présentation de certains modèles, montrent que les influences thermiques du microclimat urbain ont été négligées ou insuffisamment intégrées dans la modélisation des paramètres de surface de la route. Ceci peut expliquer, dans une certaine limite, la modélisation imparfaite de l'état de surface de la route. L'objectif de la présente étude consiste alors à mieux prendre en compte les influences du microclimat urbain et des apports énergétiques anthropiques générés par le trafic sur la modélisation de l'état de surface de la route.

3 Microclimat urbain et température de surface de la route (TSR)

La surface de la chaussée constitue une interface entre deux milieux très différents en termes de comportement thermique, l'atmosphère et le sol. De ce fait, elle traduit à chaque instant le niveau d'échanges entre ces deux milieux.

Dans un environnement complexe comme une zone urbaine, le microclimat est essentiellement gouverné par les échanges d'énergie locaux. Ces échanges se font sous forme de rayonnement (dans le domaine de courtes longueurs d'onde ou dans l'infrarouge essentiellement), par conduction, par convection (flux de chaleur sensible) ou par évapotranspiration. La compréhension des mécanismes associés à ces transferts est indispensable à l'étude de la température de surface du sol.

Un milieu urbain se caractérise et se différencie des zones non et/ou faiblement bâties par et par la production d'énergie anthropique. Cette énergie est étroitement liée à la taille et à la densité de la ville, sa fonction et son industrialisation. Un milieu urbain se caractérise aussi par un important stockage de chaleur dans la journée en raison des propriétés thermiques des matériaux de construction. De plus, la verticalité des façades des immeubles augmente les surfaces d'échange par rayonnement par rapport à ce que l'on peut trouver en campagne. Dans un milieu urbain, la vitesse du vent des basses couches est réduite, ceci est dû généralement à l'augmentation de la rugosité de surface causée par les constructions. La réduction de la végétation et l'imperméabilisation de la majorité de la surface en milieu urbain engendrent également une nette diminution de l'évapotranspiration. En effet, un bassin urbain répond plus vite aux précipitations, et les sorties d'eau par ruissellement y sont donc plus importantes. Par conséquent, le stockage d'eau est moins important qu'à la campagne. De même, le réseau d'assainissement des eaux usées en soustrait un volume considérable.

Tous ces facteurs sont responsables des spécificités du climat du milieu urbain et l'importance de ces différents processus est fonction de la saison, des caractéristiques de la surface urbaine et des conditions météorologiques.

3.1 Influence de la morphologie urbaine sur la TSR

La morphologie urbaine se rapporte aux formes tridimensionnelles, à leur densité, à leur orientation, à l'organisation et à l'espacement des bâtiments dans une ville (Nunez et Oke, 1977 Giguère, 2009) et participe à la modification du climat urbain essentiellement par le réchauffement (Bärring, 1985 ; Eliasson, 1996, 2000 ; Gustavsson et *al.*, 2001). L'impact de la morphologie urbaine sur le climat local varie en fonction de plusieurs paramètres, notamment l'occupation du sol, le facteur de vue de ciel, le comportement thermique des matériaux, ainsi que la rugosité de la ville. De plus, l'espace urbain dispose de peu de moyens naturels (eau et végétation) de rafraîchissement. En effet, ceux-ci ont un important pouvoir de rafraîchissement de l'air grâce à l'évaporation et l'évapotranspiration, mais sont beaucoup moins présentes en ville (Oke, 1988).

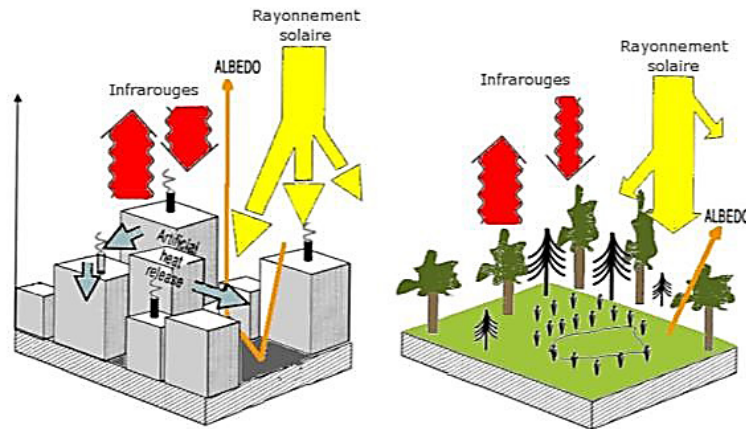


Figure 5. Flux d'énergie de rayonnement au-dessus d'une zone urbaine (gauche) et d'une zone rurale (droite)

3.1.1 Le facteur d'occupation de sol

La température en un lieu est dépendante de la nature des surfaces environnantes et est influencée par l'occupation du site et par son relief. En effet, les sols couverts de végétation favorisent la transpiration d'eau et ainsi la réduction de l'échauffement de l'air, alors que les sols aménagés par l'homme et couverts par des matériaux à forte inertie (béton, pavés, enrobés, etc.), stockent la chaleur durant les journées ensoleillées et la rayonnent à partir début de soirée. Ils ont pour effet de retarder la chute de température nocturne. Ainsi, toute modification importante du couvert végétal a des conséquences climatiques et hydrologiques (Lean et Warilow, 1989 ; Svensson, 2002). L'impact de l'utilisation des terres sur la température peut être clairement illustré par la différence de température entre un milieu urbain et un autre rural. Généralement dans les zones urbaines la température est plus élevée que dans les zones périurbaines et rurales. Elliasson (Elliasson, 1996) a montré qu'il y a une différence de température de 4°C entre le centre de Gothenburg (Suède) et un parc situé au sud-ouest du centre. Une image infrarouge prise pour une journée à New-York (Figure 6) montre la différence de température selon la localisation des végétations.

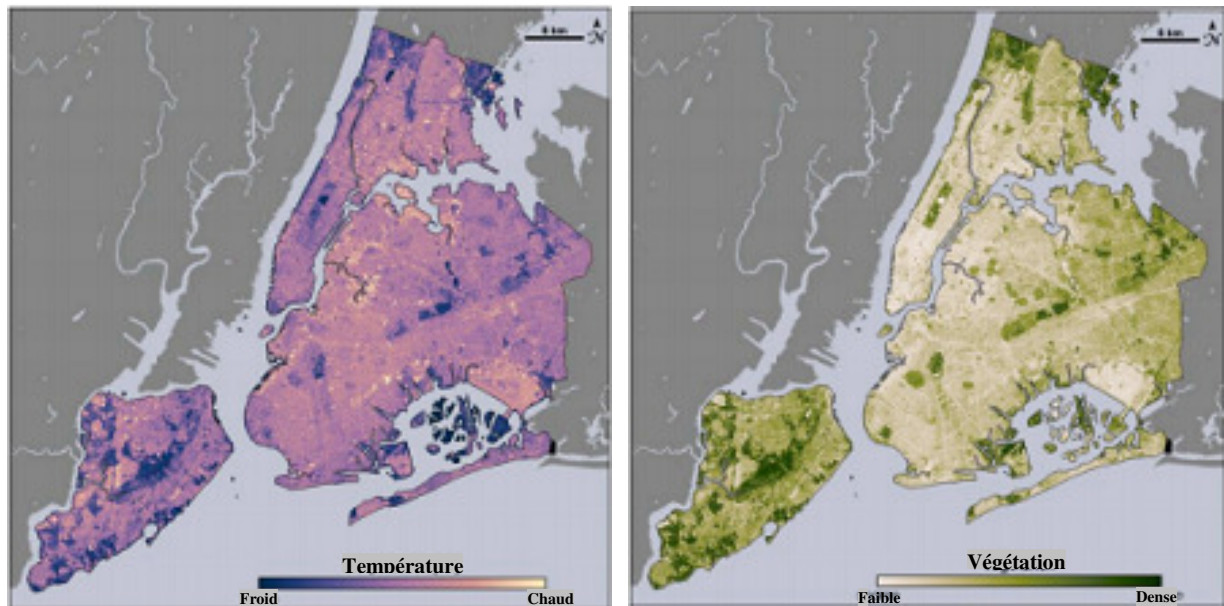


Figure 6. Influence de l'occupation de sol sur la température en ville ((a) image infrarouge d'une journée à New_York (NASA, Landsat 7), (b) image de localisation de végétation sur la même zone)

3.1.2 Le facteur de vue de ciel ou Sky View Factor (SVF)

Le SVF est un paramètre adimensionnel compris entre 0 et 1 qui définit le degré d'ouverture de la voûte céleste (Svensson, 2004). Il donne une estimation de la part du rayonnement qui entre dans la rue. Le facteur de vue de ciel est particulièrement important dans le bilan radiatif nocturne. En effet, la surface géométrique des bâtiments empêche la perte des rayonnements de grandes longueurs d'onde émis par la surface de sol et remplace une partie de la lithosphère froide par les flux des surfaces chaudes (Oke et *al.*, 1991). Cela engendre une augmentation de la température de l'air dans les endroits où le facteur de vue de ciel est faible et par conséquent une augmentation de la TSR.

Postgards et Nunez (Postgards et Nunez, 2000) ont montré dans une étude dans le sud-est de la Suède que le facteur de vue de ciel agit à 61 % sur la variation de la température de surface. Ceci a été aussi validé dans d'autres études (Elliasson, 1996 ; Upmanis, 1995). Barring et *al.* (Barring et *al.*, 1985) ont mené plusieurs expériences pour identifier l'effet du facteur de vue de ciel sur la TSR et ont prouvé que cette relation est plus forte au centre-ville que dans le milieu périurbain. L'effet du facteur de ciel est aussi très remarquable dans des conditions atmosphériques stables où le potentiel de rayonnement solaire est élevé.

Il existe plusieurs manières de calculer le SVF (graphiques ou mathématiques) et à partir de multiples supports (photographies aériennes, images satellites haute résolution, base de données spatiales). Selon les méthodes et les supports (Grimmond et Oke, 1991 ; Brown et

al., 2001), il sera soit calculé à partir de l'appareil de mesure (caméra fish-eyes), soit à partir des informations issues de bases de données utilisées en prenant alors en considération la hauteur des bâtiments et la largeur de la chaussée. La Figure 7 illustre quatre typologies d'espaces d'ouvertures variées.

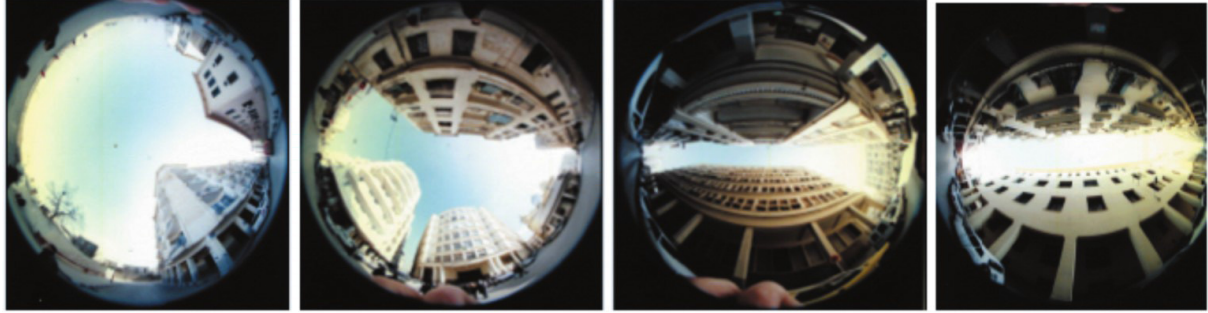


Figure 7. Fish-eye des quatre types d'espaces (respectivement de gauche à droite : espace ouvert, semi-ouvert et deux canyons urbains)

Ce facteur de vue de ciel, noté ψ_{sky} , peut être introduit dans les modèles de prévisions de la température de surface de la route par une modification de l'équation de Stefan-Boltzmann sous forme de pondération :

$$Flux = \psi_{sky} \epsilon \sigma T^4 \quad 1.3$$

Outre cet effet d'obstruction, la densité des bâtiments joue un rôle important dans le transfert radiatif de la chaleur (Figure 8).

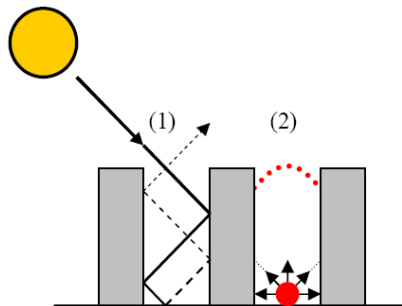


Figure 8. Effet de piégeage radiatif sur les rayonnements solaires (1) et infrarouge (2)

En effet, à l'échelle de la ville, l'énergie reçue du soleil et échangée avec l'atmosphère est absorbée et réfléchiée en partie par les matériaux de la ville. Lorsqu'elle est absorbée, elle réchauffe les différents revêtements et couverts urbains. D'autre part, la géométrie de la canopée urbaine tend à piéger le rayonnement solaire par les multiples réflexions dans le canyon, et empêche de la même manière la libération du rayonnement infrarouge vers

l'atmosphère. Ce piégeage radiatif impacte la TSR, et a été bien étudié statistiquement (Borgen *et al.*, 1992 ; Gustavsson et Borgen, 1993 ; Borgen et Gustavsson, 2000).

3.1.3 Comportement thermique de matériaux

La ville stocke plus de chaleur que la campagne. Ceci est principalement dû aux propriétés des matériaux qui composent les bâtiments, les voies de circulations et les infrastructures. Deux propriétés peuvent en particulier favoriser l'accumulation de la chaleur par le tissu urbain et ainsi mener à une augmentation aussi bien de la température d'air que la température de surface de la route. Il s'agit d'une faible réflectivité (ou albédo) et une forte émissivité (Aïda, 1982 ; Robinson et Stone, 2004 ; Giguère, 2009). L'albédo (grandeur sans dimension comprise entre 0 et 1) permet de mesurer le taux de rayonnement solaire réfléchi par un matériau, tandis que l'émissivité, variant également entre 0 et 1, évalue la quantité de flux infrarouge (IR) qui est réémis par le matériau après avoir été emmagasinée (Boisselle, 2010). La Figure 9 représente les différents albédos de surfaces urbaines. Ainsi, un matériau possédant un faible albédo et une forte émissivité réfléchit peu les rayonnements du soleil, emmagasine d'importantes quantités de chaleur pendant la journée et les restitue dans l'atmosphère la nuit, contribuant à la formation d'un îlot de chaleur (Giguère, 2009).

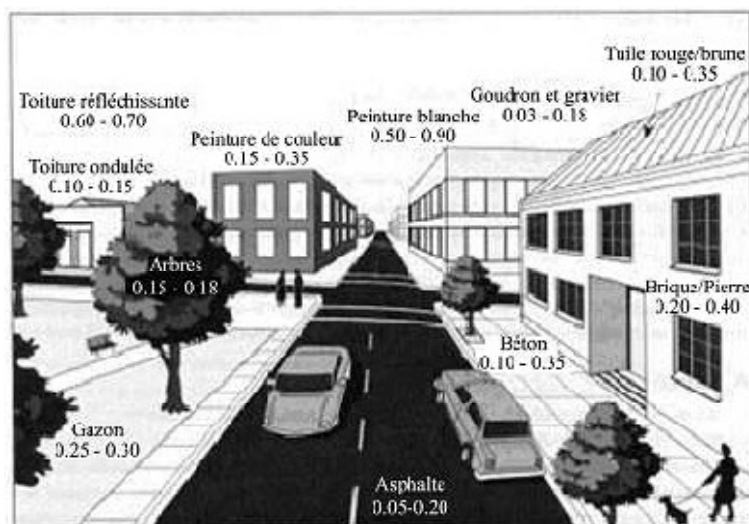


Figure 9. Variation de l'albédo dans un milieu urbain (Goodman, 1999)

3.1.4 La rugosité

Les bâtiments font obstacle aux déplacements des masses d'air qui dissipent la chaleur. Au niveau du sol, la vitesse du vent est sensiblement plus faible qu'au-dessus des bâtiments (Sacré, 1983 ; Escourou, 1982). L'aspect aérodynamique a été bien étudié par le C.S.T.B. (Centre Scientifique et Technique de Bâtiments) en soufflerie. Sacré (Sacré, 1983) explique

que l'écoulement de l'air au niveau du sol, dans un site urbain, est le résultat d'interactions complexes entre le vent et les bâtiments. La Figure 10 montre que pour une même altitude, la vitesse du vent est plus faible en milieu urbain que dans d'autres zones dites dégagées (plaines, plan d'eau, etc.). Cette diminution est causée par les bâtiments qui s'opposent à l'écoulement de l'air, modifiant par conséquent le profil vertical de la vitesse du vent. La rugosité joue aussi un rôle sur l'accumulation de la chaleur par le biais d'un piégeage du rayonnement dans « le canyon urbain ». Une importante quantité de chaleur va être stockée dans les constructions urbaines qui sont sujettes à une inertie thermique plus forte que les espaces ruraux. Ce phénomène d'inertie est accentué par l'albédo de la surface qui est plus important en ville qu'à la campagne (Aida et Gotoh, 1982).

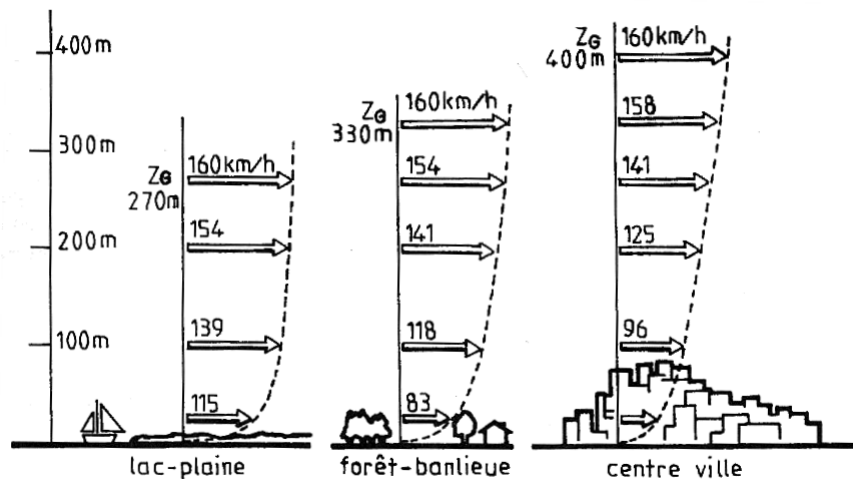


Figure 10. Profil de la vitesse de vent pour différentes surfaces (Chatelet et al., 1998)

3.1.5 Le ruissellement de surface

Le ruissellement de surface est relativement plus rapide en ville que dans les milieux ruraux (Butler et Davies, 2004 ; Rodriguez et al., 2008). Ceci engendre une diminution de la chaleur latente. Le cas contraire se trouve dans les zones près de lacs et des eaux où la différence de la température est faible. En effet, les étendues d'eau stockent également de grandes quantités de chaleur avec aisance, et agissent comme tampon thermique. À l'inverse des sols qui s'échauffent et restituent la chaleur rapidement, l'eau emmagasine et restitue la chaleur lentement.

3.2 Les flux de chaleur anthropiques

La chaleur anthropique correspond à la somme des productions de chaleur par les véhicules, l'industrie, les bâtiments, les équipements urbains et également le métabolisme humain

(Giguère, 2009). Ces sources sont beaucoup plus importantes en milieu urbain de par la concentration des activités et des habitations. La quantité de chaleur anthropique émise dépend de la saison, du mode de déplacement utilisé par les individus, de la densité de la population, du niveau d'industrialisation de la ville et de sa topographie environnante (Colombert, 2008). L'activité humaine peut modifier de manière significative la température ambiante car elle constitue une source d'énergie parfois égale aux apports radiatifs globaux (Taha, 1997). Le Tableau 8 suivant fournit des valeurs pour diverses villes américaines, européennes et asiatiques.

Tableau 8. Taux d'émission anthropique et bilan radiatif net dans plusieurs pays du monde (Oke, 1978 ; Taha, 1997)

Zone urbaine	Date	Population (*10⁶)	Densité (hab/km²)	Période	Q_F (W/m²)	Q^* (W/m²)
Manhattan (40°N)	1967	1,7	28 810	Année Eté Hiver	107 40 198	93
Montréal (45°N)	1961	1,1	14 102	Année Eté Hiver	99 57 153	52 92 13
Budapest (47°N)	1970	1,3	11 500	Année Eté Hiver	43 32 51	46 100 -8
Sheffield (53°N)	1952	0,5	10 420	Année	19	56
Berlin ouest (52°N)	1967	2,3	9 830	Année	21	57
Vancouver (49°N)	1970	0,6	5 360	Année Eté Hiver	19 15 23	57 107 6
Hong Kong (22°N)	1971	3,9	3 730	Année	4	≈ 110
Singapore (1°N)	1965	2,1	3 700	Année	3	≈ 110
Los Angeles (34°N)	1970	7,0	2 000	Année	21	108
Fairbanks (64°N)	1970	0,03	800	Année	19	18

Les flux de chaleur anthropique dégagés en ville peuvent engendrer des écarts de températures de l'ordre de 2 à 4°C entre le centre-ville et les périphériques, de nuit comme de jours (Taha, 1997). Cet impact est d'autant plus important que les températures sont basses. L'impact potentiel du flux de chaleur anthropique sur le climat a été étudié par Crutzen (Crutzen, 2004). Il a montré que l'ensemble de l'énergie rejetée au sein de l'atmosphère par l'activité humaine est de l'ordre de 0,025 W/m² (moyenne sur la surface terrestre entière). Cependant cette quantité d'énergie reste faible comparée au 235 W/m² reçus en moyenne du

soleil par la terre et son atmosphère. Néanmoins, cette chaleur anthropique est concentrée sur une faible part de la surface terrestre et plus particulièrement au sein des zones urbaines. L'impact potentiel de ces flux de chaleur anthropique sur le climat urbain peut alors être important, avec des valeurs moyennes typiques de 20 à 70 W/m² (Crutzen, 2004). Pour Paris intra-muros, Dettwiller (Dettwiller, 1978) a estimé que l'énergie thermique moyenne dissipée était de 7 à 8 W/m² en 1880 et de 60 W/m² en 1977 (40 à 45 W/m² pour un mois d'été, 80 à 85 W/m² pour un mois d'hiver). L'énergie thermique dissipée par jour était en été d'environ 1 kWh/m², soit à peu près 20% de l'énergie reçue du soleil en cette saison ($G = 5,1 \text{ kWh/m}^2$). En hiver cette densité atteint 2 kWh/m² soit le double de l'énergie reçue du soleil ($G = 1 \text{ kWh/m}^2$). Ces chiffres, malgré leur ancienneté, permettent d'avoir un premier aperçu de l'importance que peuvent avoir les rejets de chaleur d'origine anthropique.

Pour Toulouse (France), Pigeon et *al.* (Pigeon et *al.*, 2006, 2007) ont estimé que la chaleur anthropique était d'environ 70 W/m² durant l'hiver et d'environ 15 W/m² durant l'été.

Le flux de chaleur d'origine anthropique dépend du climat auquel est soumise la ville (Montréal, avec son climat nordique, possède un des plus forts rejets de chaleur anthropique) mais également des densités du bâti et de la démographie de la ville, du type d'énergie utilisée, du degré de développement économique et de l'activité industrielle de la ville (Oké, 1978 ; Ringenbach, 2004). Le Tableau 8 permet de faire ressortir une grande partie de ces facteurs et montre également que dans certaines conditions climatiques (hiver), le flux de chaleur d'origine anthropique peut être largement supérieur au flux radiatif net, notés Q_F et Q^* respectivement dans le Tableau 8.

3.3 Prise en compte des facteurs d'impacts du microclimat urbain dans la modélisation de la TSR

La spécificité liée à l'influence thermique du microclimat urbain et ses facteurs d'impact sur l'état de surface étaient très difficiles à aborder. Cette difficulté reposait, en partie, sur la multiplicité des facteurs, leurs variations à l'échelle spatiale et temporelle, et d'autre part, sur la complexité de quantifier et d'intégrer leurs influences dans la modélisation du bilan énergétique de la surface de la route. Dans la littérature, certains modèles ont évoqué cette problématique et ont utilisé une paramétrisation globale pour décrire et intégrer certains processus physiques liés au microclimat urbain. Par exemple, Shao et Lister (Shao et Lister, 1995a) proposent dans leur étude d'intégrer les ombres portées des bâtiments, ceci en

additionnant leurs flux radiatifs diffus au bilan énergétique de surface. De la même manière, Sass (Sass, 1997) n'intègre pour ces ombres portées qu'une partie du rayonnement diffus. Le rayonnement diffus est réduit d'un facteur dépendant de la hauteur moyenne des bâtiments. Thornes (Thornes, 1984) et Chapman et *al.* (Chapman et *al.*, 2002) ont également intégré ces ombres portées par l'intégration d'un coefficient correctif dans le calcul du bilan radiatif de surface. Toutes ces études, portant sur la prise en compte des impacts thermiques dus aux zones ombragées, ont été basées sur l'intégration du facteur de vue de ciel (SVF) pour décrire et évaluer ce processus, et chaque étude était basée sur une hypothèse spécifique pour calculer ce coefficient de SVF. Borgen et Gustavsson (Borgen et Gustavsson, 2002) ont pris en compte l'influence du microclimat urbain par une variation locale des paramètres géographiques. Jacobs et Raatz (Jacobs et Raatz, 1996) adoptent quant à eux une paramétrisation plus complexe des effets du microclimat urbain, ne se limitant pas uniquement aux zones d'ombres. Ils proposent également d'inclure des influences urbaines et traitent le cas particulier des ponts. Pour les zones d'ombres, la simulation est effectuée en considérant la présence d'un mur de 8 m de hauteur, situé à 10 m du point simulé. Concernant la prise en compte des zones urbaines, ils ont choisi une longueur de rugosité beaucoup plus élevée (0.52 m) que pour le cas d'une route isolée (0.0001 m) dans le calcul des flux turbulents. Pour le cas particulier des ponts, ils proposent une simulation avec comme condition limite, une température prise égale à la température de l'air à la base du pont.

De la même manière, les apports thermiques générés par le trafic, bien qu'indiqués comme significatifs et susceptibles d'influencer l'état de surface (Taha, 1997), étaient intégrés aussi d'une manière marginale ou n'ont pas été pris en compte dans la modélisation du bilan énergétique de surface de la route. Cette partie concernant les apports thermiques du trafic et leurs intégrations dans la modélisation de l'état de surface de la route sera détaillée dans le chapitre 3.

Bien que le microclimat urbain présente un impact thermique important sur le bilan énergétique de surface sous différentes formes (impact de la morphologie urbaine, apport thermique généré par le trafic, etc.), il a été intégré dans la modélisation de l'état de surface de la route d'une manière très réduite et globale. Ceci peut justifier, dans une certaine limite, la prévision imparfaite de l'état de surface de la route dans une configuration urbaine. Ainsi, afin de l'améliorer, notre étude a porté sur la prise en compte de l'intégralité, ou la majorité des processus physiques influençant l'état de surface de la route.

3.4 Synthèse et présentation de la démarche choisie

Notre étude consiste donc à contribuer à la modélisation micro-climatologique des situations hivernales en milieu urbain. Plus précisément, elle porte sur la problématique de la viabilité hivernale des routes. L'objectif est d'améliorer la prévision de l'état de surface de la route, ce qui permettrait d'agir beaucoup plus en amont sur les problématiques liées à l'activité de la viabilité hivernale. En effet, disposer d'une prévision correcte de l'état de surface permet aux gestionnaires et aux responsables en charge de la viabilité hivernale de prendre les décisions adaptées, aux bons moments et aux bons endroits. Elle permet aussi d'en tirer des profits économiques (assurer les déplacements, optimiser les opérations d'entretiens des routes, etc.) et environnementaux (optimiser l'utilisation de fondants routiers) importants.

Néanmoins, l'état de surface est le résultat de nombreuses influences, il est par conséquent difficile de le prévoir avec précision sur la totalité de l'étendue spatiale des réseaux d'infrastructures. C'est la raison pour laquelle on trouve un nombre assez important de modèles de prévision de l'état de surface dans la littérature. Chaque modèle possède ses caractéristiques, ses spécificités de calculs et ses hypothèses. Cependant, les flux thermiques générés par les différents processus relatifs au microclimat urbain ont été jusqu'à présent plus difficiles à aborder, en raison de leur multiplicité, de leur complexité et/ou de modèle pour aborder ce genre de problématique.

Comme nous l'avons déjà montré, le microclimat urbain a une influence significative sur l'état de surface de la route. Prendre en compte ces différents facteurs d'impact contribue à l'amélioration de sa prévision. Ceci rejoint l'idée, évoquée précédemment, que le choix du modèle est primordial pour aborder cette problématique. Pour cela, notre choix s'est porté sur le modèle Town Energy Balance (TEB). Les processus physiques de la ville évoqués par ce modèle sont complets. Il a été développé par Masson (Masson, 2000) au CNRM (Centre National de Recherche Météorologique) afin de paramétrer les processus radiatifs, énergétiques, hydriques, et turbulents aux interfaces entre surfaces bâties et atmosphère. Ce modèle ne cesse d'être amélioré afin d'obtenir de plus hautes résolutions avec prise en compte de façon plus réaliste des différents aspects relatifs au climat urbain.

Les processus des impacts du microclimat urbain peuvent être divisés en deux catégories : ceux liés à la morphologie urbaine (occupation du sol, hauteur de bâtiments, rugosité,

comportement thermiques des matériaux, etc.) et ceux liés aux apports thermiques d'origine anthropique (chauffage, trafic, activité industrielle).

Les aspects spécifiques liés à la morphologie urbaine et leurs influences sur le climat urbain et le bilan énergétique en ville ont été intégrés d'une manière détaillée et complète dans le modèle TEB. Ce modèle a été validé par plusieurs équipes de recherche et dans différentes configurations et conditions climatiques (Masson et *al.*, 2002 ; Lemonsu, 2003 ; Offerle et *al.*, 2005 ; Pigeon et *al.*, 2008 ; Bueno et *al.*, 2012). Cependant, le trafic était intégré dans le cadre de l'étude du confort urbain. Son apport énergétique était considéré comme étant une constante additionné aux flux turbulents de chaleur sensible et latente du canyon urbain. L'intérêt était d'évaluer les impacts des apports énergétiques d'origine anthropique sur le confort urbain et de les intégrer dans la modélisation du bilan thermique en ville. Les résultats de cette étude ont été validés dans des conditions estivales et sur des paramètres reflétant le confort urbain tels que la température d'air, le flux de chaleur du canyon urbain, le bilan thermique des bâtiments, etc. (Pigeon et *al.*, 2008 ; Colombert 2008).

Dans le cadre de l'amélioration de la prévision de l'état de surface en milieu urbain, on cherche à apprécier les apports thermiques générés par le trafic automobile. Pour cela, nous décrirons dans le chapitre suivant les différents processus physiques d'impacts du trafic et évaluerons expérimentalement certains apports énergétiques influençant la température de surface de la route. Dans le troisième chapitre, nous définirons une approche physique pour intégrer ces apports thermiques dans le modèle TEB, puis étudierons sa sensibilité aux différents processus physiques associés au trafic, puis déterminerons quels sont les processus les plus significatifs contribuant à l'amélioration de la modélisation de l'état de surface de la route.

De plus, l'état de surface de la route est sensible aux quantités d'eau présente. Cependant, cette lame d'eau est influencée par plusieurs processus physiques : ruissellement, infiltration, évacuation par les conduites d'assainissement, et aussi par d'autres facteurs d'origine anthropique tels que le trafic automobile. Le quatrième chapitre abordera la problématique des impacts thermiques de la lame d'eau sur la modélisation de l'état de surface. Dans un premier temps, nous allons présenter une étude de sensibilité de l'état de surface à la hauteur de la lame d'eau. Par la suite nous étudierons les impacts du trafic sur le bilan hydrique de surface de la route, et particulièrement le processus de nébulisation. Nous identifierons ce phénomène, le décrirons et déterminerons une approche physique pour l'évaluer et l'intégrer

dans la modélisation du bilan hydrique de surface de la route. Et enfin, nous terminerons par la sensibilité du bilan hydrique à ce processus d'impact du trafic et analyserons son impact sur la modélisation de l'état de surface de la route.

CHAPITRE 2

Les impacts thermiques du flux anthropique lié au trafic automobile en milieu urbain

Chapitre 2 : Les impacts thermiques du flux anthropique lié au trafic automobile en milieu urbain

Depuis plusieurs années, des travaux ont été menés concernant la problématique de l'apport énergétique du trafic automobile dans le bilan thermique de la ville. Celui-ci a notamment fait l'objet d'études sur des îlots de chaleur urbains pendant les périodes estivales. Cependant, dans le cas de dégradations des conditions de circulations en période hivernale, ces apports énergétiques ont été intégrés de façon marginale dans la modélisation numérique des paramètres de surface de la route. L'étude faite par Taha en 1997 (Taha, 1997) a montré que les rejets d'origine anthropique et spécifiques au trafic peuvent modifier de manière significative les températures d'air T_{air} et de la surface de la route TSR . En effet, ces rejets peuvent, dans certains cas et surtout pendant des conditions climatiques hivernales, être égaux ou supérieurs aux apports radiatifs globaux. Plusieurs études ont alors été conduites afin d'identifier et de quantifier les impacts du trafic sur le bilan énergétique de surface de la route.

La première partie de ce chapitre consiste à identifier et à évaluer les différents processus physiques associés au trafic et leur contribution au bilan énergétique. Un récapitulatif des études antérieures est présenté dans un premier temps. Par la suite, une étude détaillée de ces différents processus physiques liés au trafic ainsi que leurs équations de modélisation a été abordée. Enfin, une analyse comparée des différentes approches de leur prise en compte dans une modélisation de bilan énergétique de surface de la route est effectuée.

La deuxième partie de ce chapitre porte sur les études expérimentales qui ont été réalisées au cours de cette thèse afin d'identifier, d'évaluer et de quantifier les apports thermiques du trafic au bilan énergétique de surface de la route. Une première campagne expérimentale, dite mesures embarquées, a consisté à évaluer la différence de la TSR entre un milieu urbain et un autre périurbain. L'objectif est d'apprécier l'impact du microclimat urbain (morphologie urbaine, trafic) sur la TSR en période hivernale. Une deuxième étude, dite mesures in-situ, a consisté à évaluer les apports énergétiques générés par le trafic dans une configuration urbaine. Et la troisième étude expérimentale a eu pour objectif d'identifier et de quantifier les processus physiques du trafic. Pour cela, un ensemble de campagnes de mesures, embarquées et in-situ, a été mis en œuvre. Les données des mesures issues de cette dernière seront par la suite utilisées pour la validation des résultats de la modélisation de la TSR avec le modèle TEB.

1 Étude bibliographique de la modification du bilan énergétique par le flux anthropique du trafic automobile en milieu urbain en hiver

1.1 État de l'art

Les modèles de bilan énergétique de surface ont été étudiés par plusieurs équipes (Sass, 1992; Shao, 1996; Rayer, 1987; Chapman, 2000 ; Chapman et *al.*, 2001a ; Crevier et Delage, 2001). Cependant, ces modèles n'ont pas ou peu traité la problématique des apports énergétiques causés par le passage des véhicules sur les chaussées. Récemment plusieurs recherches ont été menées pour étudier les effets de trafic sur la température de surface de chaussée. Surgue et *al.* (Surgue et *al.*, 1983) ont montré que la température de surface est plus élevée de quelques degrés sur les chaussées en présence de véhicules par rapport à d'autres endroits non circulés. Parmenter et Thrones (Parmenter et Thornes, 1986) et Shao (Shao, 1990) indiquent dans leur étude que la différence de la **TSR** entre l'intérieur et l'extérieur des voies de circulation des véhicules est de 1 à 2°C. Gustavsson et Borgen. (Gustavsson et Borgen, 1991) ont évalué la différence de la TSR entre un milieu urbain et périurbain qui est de l'ordre de 1,5°C. Chapman et *al.* (Chapman et *al.*, 2001b) ont identifié les différents types d'effets du trafic sur la température de surface de chaussée qui est de l'ordre de 2°C entre l'intérieur et l'extérieur des voies autoroutières. De plus, ils ont montré que l'effet de trafic dépend de son volume, de la vitesse de circulation, du profil topographique de la route et de la stabilité atmosphérique. Fujimoto et *al.* (Fujimoto et *al.*, 2008) ont suggéré que la **TSR** sur les voies rapides est inférieure de presque 3°C par rapport à celle d'une zone avec un flux de circulation bloqué. Fujimoto et *al.* (Fujimoto et *al.*, 2010) ont montré que la **TSR** est plus élevée de 3 à 4°C dans les endroits comportant des feux de circulation que d'autres à proximité.

Toutes ces observations indiquent que le trafic automobile a un effet significatif sur la **TSR**. Ainsi, afin d'avoir une meilleure modélisation de cette dernière, le trafic devrait dès lors être pris en compte dans la description des processus physiques intervenant dans la modélisation du bilan énergétique de la surface de la route. Cependant, les conséquences thermiques dues au trafic varient fortement selon le lieu et l'heure. En effet, elles sont beaucoup plus importantes dans un milieu urbain qu'en périurbain ou en rural (Gustavsson et Borgen, 1991 ; Chapman et *al.*, 2001b). De même, les apports sont plus importants dans la journée, surtout pendant les heures de pointe, et beaucoup plus faibles la nuit. Ainsi, l'intensité thermique du

trafic est intimement liée à la fonction de répartition des déplacements dans la journée, nommée ici densité du trafic. Cette dernière dépend du volume du trafic ainsi que de la vitesse de circulation des véhicules. D'autre part, plus le volume et la densité de trafic sont importants, plus la vitesse de circulation est faible. Dès lors, les impacts thermiques du trafic sont plus prononcés. En outre, la modification du bilan énergétique en raison du trafic dépend aussi du type des véhicules. Les poids-lourds ont des impacts plus marqués que les véhicules légers. Denby et Sundvor. (Denby et Sundvor, 2012) ont ainsi suggéré que l'effet turbulent engendré par le passage des poids-lourds est dix fois plus important que celui des véhicules légers.

Le trafic est également très variable spatialement, à l'échelle du réseau routier, mais également à l'échelle d'une section d'itinéraire. Le trafic diffère selon les voies de circulation. Il est souvent plus dense, plus lent, avec davantage de poids-lourds sur les voies de droite, et au contraire plus fluide, avec des vitesses plus élevées sur les voies de gauche. Ainsi les conséquences thermiques dues au trafic varient fortement d'une voie à l'autre. Des écarts significatifs sont alors observables sur la température de surface. Chapman et *al.* (Chapman et *al.*, 2001b) ont montré que la différence sur la **TSR** pouvait atteindre 2°C entre une voie lente et une voie rapide, et que la quantification avec précision des apports thermiques du trafic sur la température de surface est relativement difficile.

Cette étude bibliographique montre les effets significatifs du trafic automobile sur la **TSR**, notamment en hiver. Cependant, ces effets dépendent de plusieurs paramètres à savoir, la densité du trafic, la vitesse de circulation, le type de véhicules, les conditions de circulation et la configuration (urbaine, rurale, voie de circulation rapide ou lente, fluidité du trafic, etc.). Ainsi, afin d'évaluer avec précision ces apports thermiques, tous ces paramètres devraient être pris en compte. De plus, les différents processus physiques associés à ces impacts devraient être identifiés et évalués en prenant en considération l'influence de ces paramètres.

1.2 Processus physiques associés au trafic automobile

Le trafic automobile modifie le bilan énergétique de surface d'un itinéraire selon différents processus (Prusa et *al.*, 2002) (Figure 11). La turbulence de l'air augmente en raison du déplacement des véhicules avec une convection forcée entre la surface de la route et l'atmosphère environnante. Il y a un blocage intermittent des rayonnements solaires incidents à la surface de la route et on observe la création d'une zone d'ombre lors du passage des

véhicules ainsi que l'émission de rayonnement de grandes longueurs d'onde par la partie inférieure des véhicules. Les flux de chaleur sensible et d'humidité dégagés par le moteur et par le système d'échappement sont également à considérer. Enfin, le flux de chaleur dû aux frottements des pneumatiques sur la surface est aussi à prendre en compte.

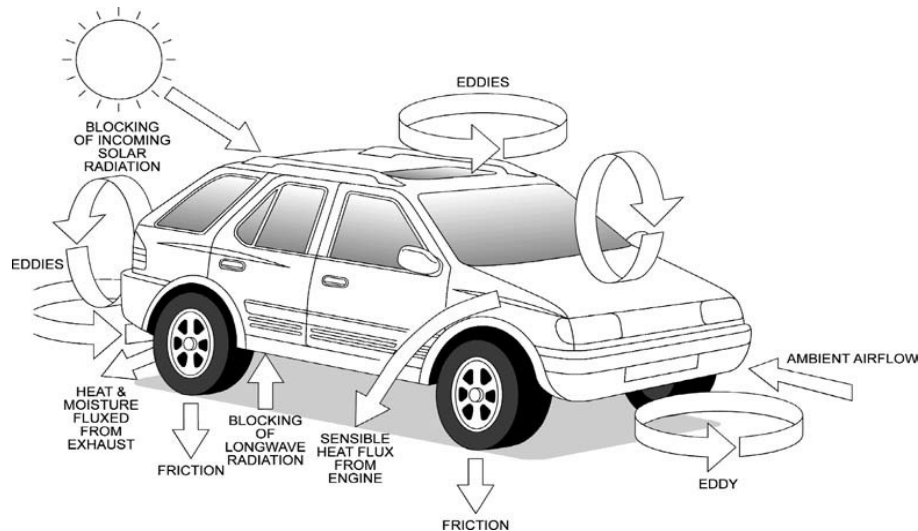


Figure 11. Illustration schématique des différents processus physiques associés au trafic avec des impacts sur la TSR (adaptée de Prusa et al., 2002)

Au cours des différentes études citées dans la littérature, un ou plusieurs de ces processus liés au trafic automobile a été considéré. Dans ce qui suit, nous allons résumer les différentes approches afin de les décrire et de les évaluer.

1.2.1 Énergie générée par les frottements des pneumatiques S_t

Les avancées technologiques de ces dernières années, en termes de conception de revêtements de chaussées dits "silencieux" ou "acoustiques" et d'amélioration de l'adhérence pneumatique-chaussée permettent aujourd'hui d'offrir une meilleure connaissance sur leurs interactions. De nombreuses précisions techniques et physiques ont été apportées. Ces différentes avancées technologiques ont favorisé les opportunités d'études sur les processus d'interactions pneumatique-chaussée par différentes équipes de recherche. Chacune de ces études à ses propres objectifs et ses propres intérêts. Les échanges thermiques entre les pneumatiques d'un véhicule et la surface de la chaussée ont été modélisés par Browne (Browne et al., 1980), Ebott et al. (Ebott et al., 1999), Wong (Wong, 2001), Lin et Hwang (Lin et Hwang, 2004), Watanabe et al. (Watanabe et al., 2005), et reportés aussi par Fujimoto et al. (Fujimoto et al., 2006a). Selon sa description, la densité de flux de chaleur due aux frottements pneumatiques des roues peut être évaluée en se basant sur l'équation de fermeture

en refroidissement suivante :

$$S_t = \alpha_{tp}(T_t - TSR) \quad 2.1$$

α_{tp} est le coefficient de transfert thermique entre le pneumatique et la surface de la route ($\text{W/m}^2/\text{K}$), et T_t sa température (K).

L'évolution de T_t a été étudiée expérimentalement par Fujimoto et *al.* (Fujimoto et *al.*, 2006a). Le protocole de cette étude expérimentale est décrit par la Figure 12. En se basant sur cette expérience, Fujimoto et *al.* (Fujimoto et *al.*, 2006a), ont montré que cette température dépend de la température d'air ambiant T_{air} ($^{\circ}\text{C}$) et de la vitesse V_{veh} (km/h) de circulation du véhicule. Elle est exprimée par l'équation suivante :

$$T_t = 0.9T_{air} + 0.33V_{veh} \quad 2.2$$

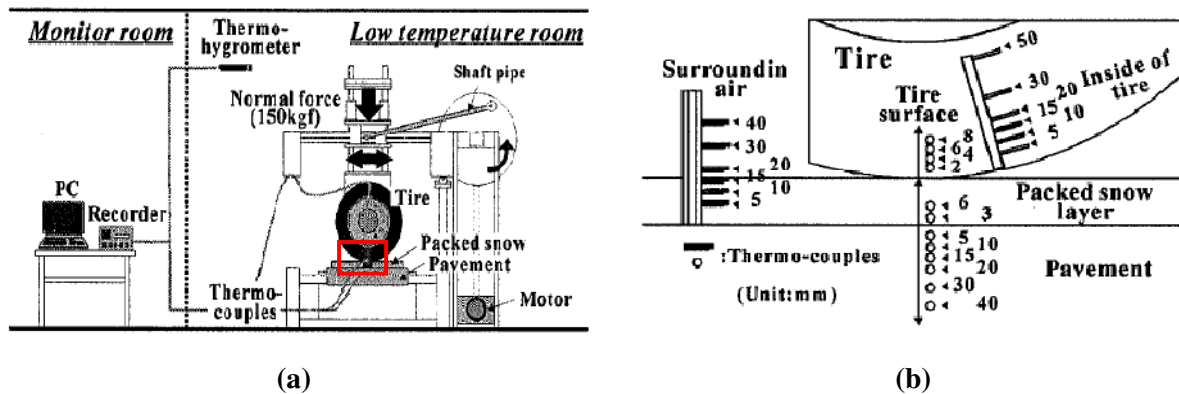


Figure 12. Illustration de l'expérience menée pour déduire la densité de flux de chaleur liée au frottement pneumatique (Fujimoto et *al.*, 2006a) avec (a) le prototype de cette expérience, et (b) zoom sur la zone encadrée en rouge et positions des sondes de mesure

En se basant sur cette même étude expérimentale, les auteurs ont déterminé aussi le coefficient de transfert thermique α_{tp} ($\text{W/m}^2/\text{K}$) entre l'interface chaussée et pneumatiques des véhicules. Ce coefficient dépend de l'état de surface de la chaussée et est égal à $60 \text{ W/m}^2/\text{K}$ en cas d'une chaussée sèche, et à $70 \text{ W/m}^2/\text{K}$ en présence de neige sur la chaussée. Cependant, ces valeurs utilisées par Fujimoto et *al.* (Fujimoto et *al.*, 2006b) n'ont pas été validées par d'autres recherches ou par d'autres études expérimentales. D'où l'intérêt de trouver d'autres approches pour l'évaluation de ce coefficient de transfert thermique à l'interface pneu-chaussée, d'autant plus que l'équation 2.2 demeure très empirique.

Les pneumatiques ont connu d'importantes avancées aussi bien dans la composition du matériau, la forme et le dessin de la bande de roulement que dans la taille et la nature de la gomme. Ces progrès ont amélioré la sécurité (distance de freinage et adhérence). À l'aide de nombreux tests et simulations, les manufacturiers ont réussi à modifier les caractéristiques aussi bien mécaniques que thermiques du pneumatique.

La bande de roulement est en contact direct avec la surface de la route, et donc c'est avec elle que s'effectue la plupart des échanges thermiques. Le caoutchouc utilisé dans la bande de roulement est mélangé à d'autres composants comme de l'huile ou du noir de carbone. La conductivité thermique du caoutchouc est faible, et c'est en partie pour l'améliorer que l'on utilise du noir de carbone. Cette conductivité K_{20} à 20°C est de 0.23 W/m/K. La sensibilité de la conductivité du pneumatique à la température K_t (W/m/K) sur une plage allant de 0 à 150°C peut être approchée par la relation, décrite par Blundell et Harty (Blundell et Harty, 2004), suivante :

$$K_t = K_{20} \frac{293}{T_t} \quad 2.3$$

Fujimoto et *al.* (Fujimoto et *al.*, 2006a) ont déjà prouvé que la température du pneumatique varie en fonction de la vitesse de circulation des véhicules. On peut donc déduire que son coefficient de transfert avec la chaussée dépend aussi de cette vitesse de circulation. Ceci rejoint les résultats de l'étude faite par Browne et *al.* (Browne et *al.*, 1980) qui ont montré que le coefficient de transfert thermique à l'interface pneumatique-chaussée varie en fonction de la vitesse de circulation du véhicule V_{veh} (m/s) et peut être exprimé par :

$$\alpha_{tp} = 5.9 + 3.7V_{veh} \quad 2.4$$

Bien que cette relation soit aussi très empirique, son application a été validée récemment par l'étude de Srirangan et *al.* (Srirangan et *al.*, 2013). Elle sera donc utilisée pour l'évaluation de la densité de flux de chaleur liée aux frottements des pneumatiques S_t (W/m²).

1.2.2 Flux de chaleur sensible induit par le passage des véhicules S_{va}

La densité de flux turbulent de chaleur sensible induit par le trafic a été étudiée par plusieurs auteurs (Prusa et *al.*, 2002 ; Sato et *al.*, 2004 ; Fujimoto et *al.*, 2007). Cette densité de flux

peut être évaluée en s'appuyant sur l'approche décrite par Fujimoto et *al.* (Fujimoto et *al.*, 2007) consistant à définir un coefficient de transfert thermique entre la surface de la route et l'atmosphère environnante variable en fonction d'une vitesse de circulation des véhicules. Cette densité peut être exprimée en se basant sur la relation suivante :

$$S_{va} = \alpha_{va}(T_{air} - TSR) \quad 2.5$$

α_{va} (W/m²/K) est le coefficient de transfert thermique entre la surface de la route et l'atmosphère. Ce coefficient est déterminé expérimentalement par Fujimoto et *al.* (Fujimoto et *al.*, 2007). Il dépend de l'état de surface de la route et est décrit par les relations suivantes :

$$\alpha_{va} = 10.4 V_w^{0.7} + 2.2 \quad \text{pour une chaussée sèche} \quad 2.6$$

$$\alpha_{va} = 6.4 V_w^{0.7} + 2.2 \quad \text{pour une chaussée enneigée} \quad 2.7$$

V_w est la vitesse du vent induit par le passage de véhicule (m/s). Cette dernière dépend de la vitesse de circulation des véhicules ainsi que de leur type (poids-lourds ou véhicules légers). Ceci est illustré par la Figure 13 issue de l'étude faite par Fujimoto et *al.* (Fujimoto et *al.*, 2007) où Normal-size et Middle-size désignent respectivement les véhicules légers et les poids-lourds. Cette expérience a été validée pour des vitesses de circulation de 20 jusqu'à 70 km/h.

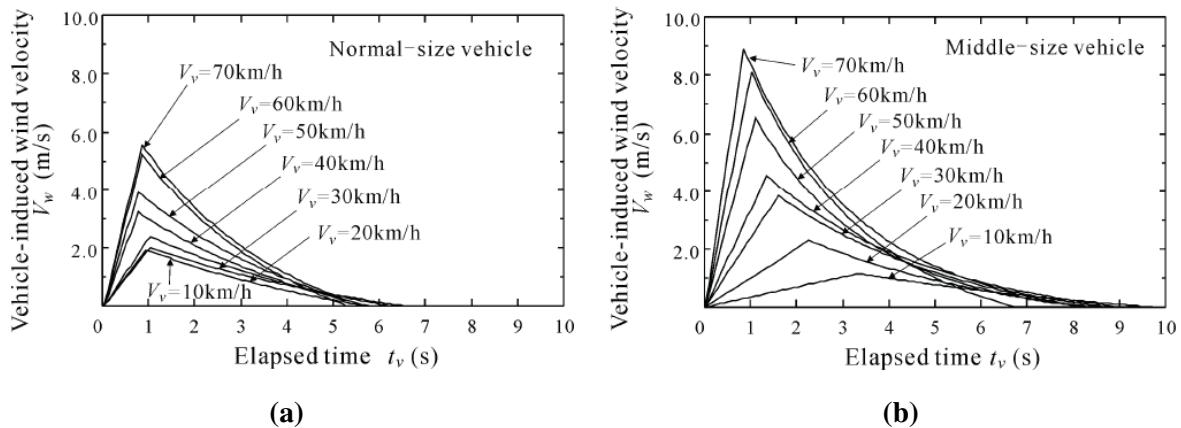


Figure 13. Variation de la vitesse du vent induit par le passage des véhicules V_w pour différentes vitesses de circulation, dans le cas des véhicules légers (a), et véhicules poids-lourds (b) (Fujimoto et *al.*, 2007)

Sur cette figure V_v désigne la vitesse de circulation du véhicule notée, dans la présente étude, par V_{veh} . Les impacts des véhicules poids lourds sont beaucoup plus importants que ceux des véhicules légers. Un complément a été apporté par Fujimoto et *al.* (Fujimoto et *al.*, 2007) pour étudier la variation des impacts du trafic sur la vitesse du vent en fonction de l'état de circulation, accélération, ou décélération. Ce phénomène est représentatif des caractéristiques de circulations surtout dans un milieu urbain. Les résultats de la Figure 13 montrent que les impacts du trafic sur la vitesse de vent sont variables en fonction de cet état de circulation. En effet, ils sont davantage marqués en cas d'une circulation accélérée et diminuent dans le cas de décélération. En se basant sur cette étude expérimentale, Fujimoto et *al.* (Fujimoto et *al.*, 2007) ont défini deux équations permettant d'évaluer la variation de la vitesse de vent induite par le passage des véhicules en fonction de la vitesse de circulation des véhicules, de leurs types ainsi que de leurs état de circulation. Ceci est illustré par la Figure 14.

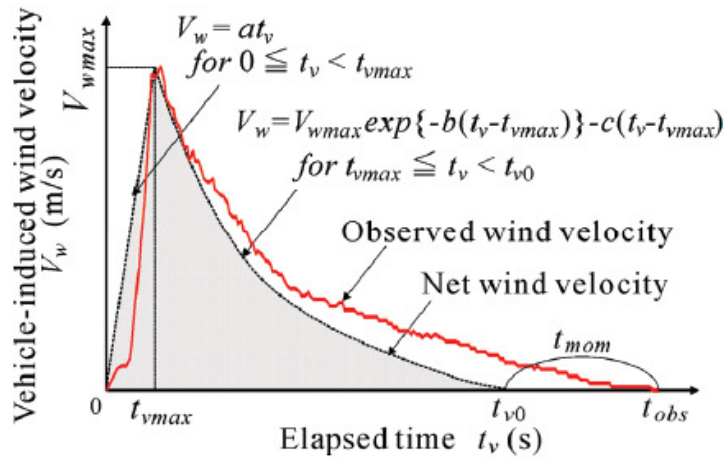


Figure 14. Simulation de la vitesse de vent induite par le passage de véhicules

Dans le cas d'une circulation accélérée (pour $0 \leq t \leq t_{vmax}$), la vitesse du vent induit par passage des véhicules peut être exprimée par :

$$V_w = a t \quad 2.8$$

Dans le cas d'une décélération, la vitesse du vent induit par le passage de véhicule peut être exprimée par la formule suivante :

$$V_w = V_{wmax} \exp[-b(t - t_{vmax})] - c(t - t_{vmax}) \quad 2.9$$

t_{vmax} est le temps nécessaire pour que le véhicule atteigne V_{vmax} , la vitesse de circulation maximale autorisée pour les véhicules (selon les réglementations de circulation en ville). t_{v0} est le temps nécessaire pour que le véhicule décélère et s'arrête (au feu de circulation, par exemple). V_{wmax} est la vitesse maximale du vent induit par le passage de véhicules à une vitesse V_{vmax} , et a , b et c sont des variables déterminées par des expressions spécifiques, données dans le Tableau 9 (Fujimoto et al., 2007).

Tableau 9. Variables définies par Fujimoto et al. (Fujimoto et al., 2007) pour la détermination de la vitesse de vent induit par les véhicules légers et poids-lourds

Variable	Véhicules légers	Véhicules poids-lourds
V_{vmax}	$V_{wmax} = 0.08 V_{veh}$	$V_{wmax} = 0.13 V_{veh}$
t_{vmax}	$t_{vmax} = 1.2 \exp(-0.3 \cdot 10^{-2} V_{veh})$	$t_{vmax} = 4.2 \exp(-2.2 \cdot 10^{-2} V_{veh})$
t_{v0}	$t_{v0} = -1.4 \cdot 10^{-2} V_{veh} + 7.6$	$t_{v0} = -2.4 \cdot 10^{-2} V_{veh} + 11$
a	$a = 0.08 V_{veh}$	$a = 0.11 V_{veh}$
b	$b = 0.28 \cdot 10^{-2} V_{veh} + 0.13$	$b = 0.36 \cdot 10^{-2} V_{veh} + 0.13$
c	$c = V_{wmax} \exp[-b(t_{v0} - t_{vmax})](t_{v0} - t_{vmax})$	

Dans notre cas d'étude, pour simplifier le calcul, on suppose que tous les véhicules circulent sans accélération ni décélération, et leurs vitesses de circulation dépendent de la densité du trafic. Ainsi, la vitesse du vent induit par les différents types de véhicules peut être exprimée par les équations suivantes :

$$V_w^{VL} = 0.08 V_{veh}^{VL} \quad \text{pour des véhicules légers} \quad 2.10$$

$$V_w^{VPL} = 0.11 V_{veh}^{VPL} \quad \text{pour des véhicules poids-lourds} \quad 2.11$$

V_w^{VL} (m/s) et V_w^{VPL} (m/s) représentent la vitesse de vent induit respectivement par les véhicules légers et poids-lourds. V_{veh}^{VL} (km/h) et V_{veh}^{VPL} (km/h) représentent la vitesse de circulation respectivement pour les véhicules légers et poids-lourds.

1.2.3 Flux radiatif émis par les parties supérieure et inférieure des véhicules

Un véhicule est une source de rayonnement à différentes longueurs d'onde. Le flux de chaleur radiatif émis par le véhicule a été étudié par plusieurs auteurs (Ishikawa et al., 1999 ; Prusa et al., 2002; Takahashi et al., 2005 ; Fujimoto et al., 2012). Il peut être évalué en se basant sur la

loi de Stefan-Boltzmann suivante :

$$R_{veh} = \varepsilon_{veh} \sigma T_{veh}^4 \quad 2.12$$

avec R_{veh} la densité de flux radiatif émis par le véhicule (W/m²), ε_{veh} l'émissivité du véhicule (sans unité), σ la constante de Stefan-Boltzmann (5.67×10^{-8} W/m²/K⁴) et T_{veh} la température du véhicule (K).

Dans notre cas d'étude, le véhicule est considéré comme étant un corps à plusieurs températures. Une température représentative de sa partie supérieure ($T_{veh-sup}$) et une température représentative de sa partie inférieure ($T_{veh-inf}$). Cette dernière a été étudiée par Fujimoto et al. (Fujimoto et al., 2008). Ils ont montré qu'elle varie en fonction de la position par rapport au moteur du véhicule, illustré par la Figure 15.

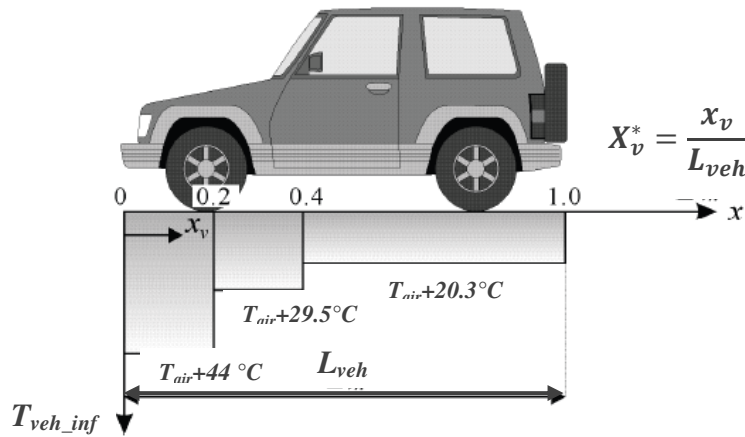


Figure 15. Variation spatiale de la température de la partie inférieure du véhicule T_{veh_inf}

x_v est la distance par rapport à l'avant du véhicule (m), X_v^* la distance réduite par rapport à la longueur du véhicule L_{veh} (m) et s'exprimée comme suit :

$$X_v^* = \frac{x_v}{L_{veh}} \quad 2.13$$

Suivant la position par rapport à l'avant du véhicule, la température de la partie inférieure du véhicule T_{veh_inf} (K) est définie en fonction de T_{air} (K) par les relations suivantes :

$$T_{veh_inf} = T_{air} + 44.0 \quad \text{si } 0 \leq X_v^* \leq 0.2 \quad 2.14$$

$$T_{veh_inf} = T_{air} + 25.9 \quad \text{si } 0.2 \leq X_v^* \leq 0.4 \quad 2.15$$

$$T_{veh_inf} = T_{air} + 20.3 \quad \text{si } 0.4 \leq X_v^* \leq 1 \quad 2.16$$

En se basant sur ces différentes relations la densité de flux radiatif émis par la partie inférieure du véhicule R_{veh_inf} peut être estimée en se basant sur :

$$R_{veh_inf} = \varepsilon_{veh} \sigma [0.2(T_{air} + 44.0)^4 + 0.2(T_{air} + 25.9)^4 + 0.6(T_{air} + 20.3)^4] \quad 2.17$$

Cette relation exprime que les différentes densités de flux relatifs à chaque température sont additionnées. Afin de simplifier le calcul, l'hétérogénéité des matériaux constituant la partie inférieure du véhicule a été négligée, et une seule valeur moyenne d'émissivité a été prise en compte $\varepsilon_{veh} = 0.95$.

Concernant la température de la partie supérieure du véhicule T_{veh_sup} , la recherche bibliographique que nous avons réalisée dans ce contexte montre qu'il n'y a pas d'études spécifiques qui ont été élaborées afin d'étudier l'évolution de la température de la paroi des véhicules. Dans la littérature, on a identifié un nombre très limité d'études qui ont été réalisées afin d'étudier le phénomène de transfert de chaleur à travers la paroi des véhicules frigorifiques. Cependant la conception de la paroi de ce genre de véhicules demeure très spécifique. Deux hypothèses peuvent être alors formulées. On s'inspire en première hypothèse de l'étude expérimentale faite par Fujimoto et *al.* (Fujimoto et *al.*, 2008, 2009) et on suppose que T_{veh_sup} est égale à la température de la dernière zone de la partie inférieure du véhicule (cf. Figure 15).

$$T_{veh_sup} = T_{air} + 20.3 \quad 2.18$$

Dans une seconde hypothèse, on néglige tous les processus physiques intervenant à l'interface carrosserie-atmosphère environnement (frottement, conduction, convection, etc.) et on considère que T_{veh_sup} est égale à la température d'air T_{air} .

$$T_{veh_sup} = T_{air}$$

2.19

L'âge moyen du parc automobile en circulation en France est estimé par la Comité des Constructeurs Français d'Automobiles « CCFA » à 8.5 ans (CCFA, 2014). La deuxième hypothèse a été élaborée en se basant sur les avancées technologiques de ces dernières années en termes de conception des parois des véhicules et en termes d'isolation thermique afin d'améliorer au mieux la consommation en énergie des véhicules et de réduire au maximum le coefficient de traînée. L'amélioration de l'isolation thermique du véhicule réduit au maximum les transferts thermiques entre l'intérieur et l'extérieur du véhicule ce qui nous permet de déduire que la température de la paroi du véhicule est presque indépendante de la température interne du véhicule. De plus, la réduction du coefficient de traînée du véhicule minimise au maximum le phénomène de frottements et donc la résistance entre la paroi et l'air environnant. Ces différentes analyses peuvent justifier, dans une certaine limite, notre choix de la seconde hypothèse. En outre, la première hypothèse a été rejetée car la température de la dernière zone du véhicule est influencée par le flux de chaleur dégagé par le système d'échappement, donc on risque de surestimer la température de la partie supérieure du véhicule. Ainsi, la densité de flux radiatif de la partie supérieure du véhicule R_{veh_sup} devient alors :

$$R_{veh-sup} = \varepsilon_{veh} \sigma T_{veh-sup}^4 = \varepsilon_{veh} \sigma T_{air}^4$$

2.20

1.2.4 Effet de masque

Le passage des véhicules sur la route engendre un blocage intermittent du flux radiatif reçu par celle-ci. Ce phénomène est appelé effet de masque, et affecte le bilan énergétique de la surface de la route selon deux processus. D'une part, il empêche les rayonnements solaires incidents d'atteindre la surface de la route, avec une perte d'énergie dans le bilan de la surface. D'autre part, il bloque les rayonnements telluriques émis par la surface de la chaussée qui seront réfléchis par la partie inférieure du véhicule. Dès lors, un flux radiatif se rajoute au bilan énergétique de la surface. Dans la littérature, peu d'études ont pris en compte ces effets. De plus, la façon avec laquelle ces effets ont été intégrés est très simpliste. Par exemple, Shao et Lister (Shao et Lister, 1996) proposent une paramétrisation simple basée sur la modification du flux radiatif reçu par la surface de la route en fonction de la densité du trafic. Chapman et al. (Chapman et al., 2001c) proposent de tenir compte du flux infrarouge émis par les

véhicules par l'introduction d'un coefficient correctif au flux radiatif de la surface de la route.

Afin de prendre en considération cet effet de masque dans le bilan énergétique de surface de la route, on souhaite trouver un indicateur permettant d'évaluer ces pertes en rayonnement solaire et ces gains en rayonnement tellurique causés par ce phénomène. Un coefficient a été identifié et est appelé coefficient d'effet de masque C_{masque} . Il représente le pourcentage de temps pendant lequel la surface de la route est couverte par les véhicules et ce pendant chaque pas de temps t_{temps} (s) dans le calcul numérique. Dans la modélisation, le pas de temps désigne l'intervalle de temps fixé pour analyser l'évolution du paramètre modélisé. C_{masque} est exprimé par l'équation suivante :

$$C_{masque} = \frac{t_{masque}}{t_{temps}} \quad 2.21$$

t_{masque} (s) représente le temps de masquage causé par le passage d'un certain nombre de véhicules N_{veh} (véhicules). Le nombre de véhicules qui passent par un point donné de la surface de la route dépend des conditions de circulation (fluide, embouteillage, etc.), du volume du trafic et de leur vitesse de circulation. Tous ces paramètres peuvent être représentés par la densité du trafic D_{trafic} (véhicules/s). Elle représente le nombre de véhicules qui passent par ce même point pendant le pas de temps t_{temps} , exprimée comme suit :

$$D_{trafic} = \frac{N_{veh}}{t_{temps}} \quad 2.22$$

t_{masque} devient alors :

$$t_{masque} = t_{veh} D_{trafic} \quad 2.23$$

t_{veh} représente le temps mis par un véhicule de longueur L_{veh} (m) et circulant à une vitesse V_{veh} (m/s) pour passer par un point de la surface de la route. Il est exprimé par :

$$t_{veh} = \frac{L_{veh}}{V_{veh}} \quad 2.25$$

Les impacts du trafic sur le bilan radiatif de la surface de la route que ce soit par l'émission de flux infrarouge ou par l'effet de masque pourraient alors être pris en compte dans la modélisation du bilan énergétique de surface de la route.

1.2.5 Flux de chaleur sensible dégagé par le moteur E_{comb} et le système d'échappement E_{ex}

Les flux de chaleur dégagés par le moteur et le système d'échappement ont fait l'objet de plusieurs études, spécifiquement par les constructeurs automobiles. En effet, ces rejets générés par les véhicules répondent aux normes européennes d'émissions qui fixent les limites maximales pour les véhicules roulants. L'objectif est de réduire la pollution atmosphérique due au transport routier. Les trois générations de normes européennes pour les véhicules légers Euro1 (1992), Euro2 (1996) et Euro3 (2000) ont eu un impact sensible sur les émissions des véhicules (Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, 2011).

Dans notre cas d'étude on s'intéresse aux flux de chaleur échangés entre le véhicule et la surface de la route. Ce phénomène a été étudié en détails par Prusa et *al.* (Prusa et *al.*, 2002), avec deux approches. La première se base sur une estimation approximative des flux de chaleur dégagés par chaque mécanisme au cours du cycle de combustion du carburant. Les estimations sont basées sur des références bibliographiques citées par Prusa et *al.* (Prusa et *al.*, 2002) dans leur article. La seconde se base sur des lois physiques et thermodynamiques.

Dans la première approche, Prusa et *al.* (Prusa et *al.*, 2002) se sont basés sur plusieurs hypothèses. Ils ont considéré différents scénarios de circulations (Tableau 10). Ils ont supposé que tous les véhicules ont une même longueur $L_{veh} = 5$ m et une même largeur $W_{veh}=1.7$ m. De plus, tous les véhicules circulent à la même vitesse V_{veh} (m/s). L'écart entre deux véhicules successifs S_{veh} est considéré constant et varie selon les conditions de circulation. La réaction de la combustion du carburant est supposée parfaite et le flux de chaleur totale E_{tot} (W) dégagé par cette réaction est estimé par le biais de l'équation suivante :

$$E_{tot} = \lambda_{fuel} m_{fuel} \quad 2.25$$

$$m_{fuel} = \frac{\rho_{fuel} V_{veh}}{C_{fuel}} \quad 2.26$$

E_{tot} est le flux de chaleur totale dégagé par la réaction de combustion du carburant (W), λ_{fuel} la chaleur latente de combustion du carburant (J/kg), m_{fuel} le taux de consommation en carburant (kg/s), ρ_{fuel} la masse volumique du carburant (kg/m³), V_{veh} la vitesse de circulation du véhicule (m/s) et C_{fuel} est la consommation en carburant du véhicule (m³/m). La densité de flux de chaleur totale par unité de surface Q_{veh} dégagée par le véhicule est exprimé par l'équation suivante :

$$Q_{veh} = \frac{E_{tot}}{W_{veh}(L_{veh} + S_{veh})} \quad 2.27$$

Les paramètres nécessaires pour son calcul pour les différents scénarios définis par Prusa et al. (Prusa et al., 2002) sont illustrés dans le Tableau 10.

Tableau 10. Paramètres du véhicule pour les différents scénarios de conditions de circulation (Prusa et al., 2002)

Paramètres	Conditions de circulation			
	Milieu urbain			Autoroute
	Trafic en arrêt	Forte chute de neige	Faible chute de neige	Faible chute de neige
S_{veh} (m)	3	25	15	50
V_{veh} (m/s)	0	10	15	30
C_{fuel} (l/m)	0	0.0064	0.0094	0.0102
m_{fuel} (kg/s)	0.0005	0.0011	0.0011	0.0020
Q_{veh} (W/m ²)	1600	1000	1400	1000

En pratique, le flux de chaleur totale dégagé par le véhicule E_{tot} est réparti entre différents mécanismes. Prusa et al. (Prusa et al., 2002) en ont défini cinq, qui sont la chaleur due à la dissipation de l'énergie mécanique E_m (W), les énergies dégagées sous forme de flux radiatif, de flux convectif et par le système d'échappement nommées respectivement E_R , E_c et E_{ex} , exprimées en (W) et un flux chaleur dégagé directement par le moteur suite à la réaction de la combustion du carburant nommé E_{comb} (W). Ainsi E_{tot} s'écrit sous la forme suivante :

$$E_{tot} = E_m + E_R + E_c + E_{ex} + E_{comb} \quad 2.28$$

La contribution en énergie dégagée par le véhicule par chacun de ces mécanismes et selon les conditions de circulation est proposée par Prusa et *al.* (Prusa et *al.*, 2002) dans le Tableau 11.

Tableau 11. Contribution des différents mécanismes en chaleur dégagée par le véhicule

Mécanismes	Conditions de circulation			
	Milieu urbain			Autoroute
	Trafic en arrêt	Forte chute de neige	Faible chute de neige	Faible chute de neige
E_{tot} (W)	22000	49000	49000	90000
E_m (W)	2700	8600	8600	31000
E_R (W)	600	2100	2600	4600
E_c (W)	10900	21200	20500	23200
E_{ex} (W)	6700	14600	14600	26700
E_{comb} (W)	1100	2500	2500	4500

Les résultats de ce tableau montrent que la contribution en énergie des différents mécanismes du véhicule varie en fonction des conditions de circulation. Les flux de chaleur les plus importants sont dégagés sous forme d'une convection forcée E_c ou par le système d'échappement E_{ex} . La contribution du carburant est plus réduite par rapport aux autres mécanismes.

La seconde approche utilisée par Prusa et *al.* (Prusa et *al.*, 2002) pour l'évaluation du flux de chaleur dégagé par le moteur et le système d'échappement se base sur des équations physiques et des lois thermodynamiques. Ces flux peuvent être évalués par le biais des deux équations suivantes :

$$E_{ex} = m_{ex}c_{ex}(T_{ex} - T_{air}) \quad 2.29$$

$$E_{comb} = \alpha_{comb}m_{H_2O}m_{ex}\lambda_{fg} \quad 2.30$$

Les paramètres de ces équations dépendent des conditions de circulations, avec m_{ex} le débit massique de produit de combustion (m_{ex} est égal à 0,0177 kg/s dans le cas d'une voie avec feux de circulation et à 0,0323 kg/s dans le cas d'une voie à sens unique), c_{ex} la chaleur spécifique de produit de combustion (1160 J/kg/K), T_{ex} la température de sortie de système d'échappement (77°C pour une voie avec feux de circulation et entre 94 à 100°C dans le cas d'une voie à sens unique), α_{comb} la fraction de vapeur d'eau qui se condense (pour un

rendement maximal $\alpha_{comb}=1$), m_{H_2O} la fraction massique de vapeur d'eau (0.089), et λ_{fg} la chaleur latente de condensation ($2.50 \cdot 10^6$ J/kg).

Dans notre cas d'étude, on va se baser sur ces deux équations pour évaluer le flux de chaleur dégagé par le moteur et le système d'échappement. Les conditions de circulation définies par Prusa et *al.* (Prusa et *al.*, 2002) dans leur étude peuvent différer de celles rencontrées dans nos travaux. De plus, avec cette seconde approche, on peut évaluer les flux de chaleur dégagés par le moteur et le système d'échappement sans tenir compte des autres mécanismes.

1.2.6 Modification de la résistance aérodynamique de la couche d'air proche de la route par l'effet turbulent du trafic

Dans un milieu urbain, l'écoulement d'air est impacté non seulement par les bâtiments et les différentes structures spécifiques au milieu urbain mais aussi par le trafic. Lors d'embouteillages, le trafic constitue un obstacle intermittent aux écoulements d'air. Par ailleurs, pendant les heures creuses où le trafic est fluide et la vitesse de circulation est importante, le trafic crée un effet de turbulence supplémentaire. La modification des écoulements d'air dans un milieu urbain sous l'impact du trafic a été étudiée par plusieurs équipes de recherche. L'effet turbulent généré par le trafic a été décrit par deux approches distinctes.

La première approche se base sur la modification de la vitesse du vent. Thornes (Thornes, 1984) et Chapman et Thornes (Chapman et Thornes., 2004) proposent dans leur modèle de tenir compte de l'effet turbulent causé par le passage des véhicules par une augmentation de la vitesse du vent de 2 m/s. Jacobs et Raatz (Jacobs et Raatz, 1996) proposent quant à eux d'imposer une vitesse minimale du vent de 5.14 m/s (10 nœuds) au cours de la journée, où la densité du trafic est importante, et une vitesse minimale de 2.57 m/s (5 nœuds) pendant la nuit et les jours de vacances.

La seconde approche se base sur la modification de la résistance aérodynamique de l'air, proche de la surface de la route notée R_{route} . Prusa et *al.* (Prusa et *al.*, 2002) proposent dans leur étude d'ajouter à la résistance aérodynamique de l'air une constante représentative de l'effet turbulent engendré par le trafic $C_{turb_traffic}$ égal à 0.5. Ainsi, la résistance aérodynamique de l'air sous impact du trafic $R_{route-traffic}$ s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{1}{R_{route-traffic}} = \frac{1}{R_{route}} + C_{turb_traffic} \quad 2.31$$

Dans le cadre de l'étude sur les rejets polluants dans l'atmosphère liés au trafic routier, plusieurs études ont été développées (Wong, 2001 ; DiSabatino et *al.*, 2003 ; Kalthoff et *al.*, 2005 ; Solazzo et *al.*, 2008 ; Denby et Sundvor, 2012). Ces études ont détaillé la variation de l'effet turbulent dû au trafic selon les conditions de circulation (milieu urbain, rural ou autoroute), selon la variation de la vitesse de circulation des véhicules et selon le type de véhicules (poids-lourds ou véhicules légers). Différentes approches ont été mises en œuvre. La plus récente est celle de Denby et Sundvor (Denby et Sundvor, 2012), et ils ont défini une résistance spécifique aux impacts du trafic $R_{traffic}$. Elle a été validée dans le modèle NORTrip. Ces coefficients ont été déterminés expérimentalement et ils sont exprimés par :

$$\frac{1}{R_{traffic}} = a_{veh}^{type} D_{traffic} V_{veh} \quad 2.32$$

a_{veh}^{type} est le coefficient de turbulence causé par le passage du véhicule (s/véhicule). Denby et Sundvor (Denby et Sundvor, 2012) ont déterminé expérimentalement deux coefficients selon le type du véhicule. a_{veh}^{VL} pour les véhicules légers est égal à 10^{-3} (s/véhicule) et a_{veh}^{VPL} , pour les véhicules poids-lourds est égal à 10^{-2} (s/véhicule). Ainsi, la résistance aérodynamique de l'air est exprimée par :

$$\frac{1}{R_{route-traffic}} = \frac{1}{R_{route}} + \frac{1}{R_{traffic}} \quad 2.33$$

Dans notre étude, on se basera sur cette approche pour prendre en compte l'impact du trafic sur la résistance aérodynamique de l'air.

1.2.7 Étendue spatiale de l'impact du trafic

La délimitation de l'étendue spatiale de l'impact du trafic varie selon les objectifs de l'étude. En effet, elle peut être définie comme étant la largeur du véhicule si on s'intéresse uniquement aux impacts radiatifs des véhicules, sinon elle peut s'étendre sur toute la zone de turbulence créée lors du passage des véhicules. Dans notre cas d'étude, on s'intéresse à tous les processus

physiques du trafic entrant dans le bilan énergétique de surface de la route. Ainsi, la zone d'impact du trafic $W_{traffic}$ correspond à toute la zone de turbulence.

En 2012, Fujimoto et *al.* (Fujimoto et *al.*, 2012) ont étudié la variation transversale de la vitesse du vent suite au passage des véhicules. Le protocole de cette expérience est illustré par la Figure 16a :

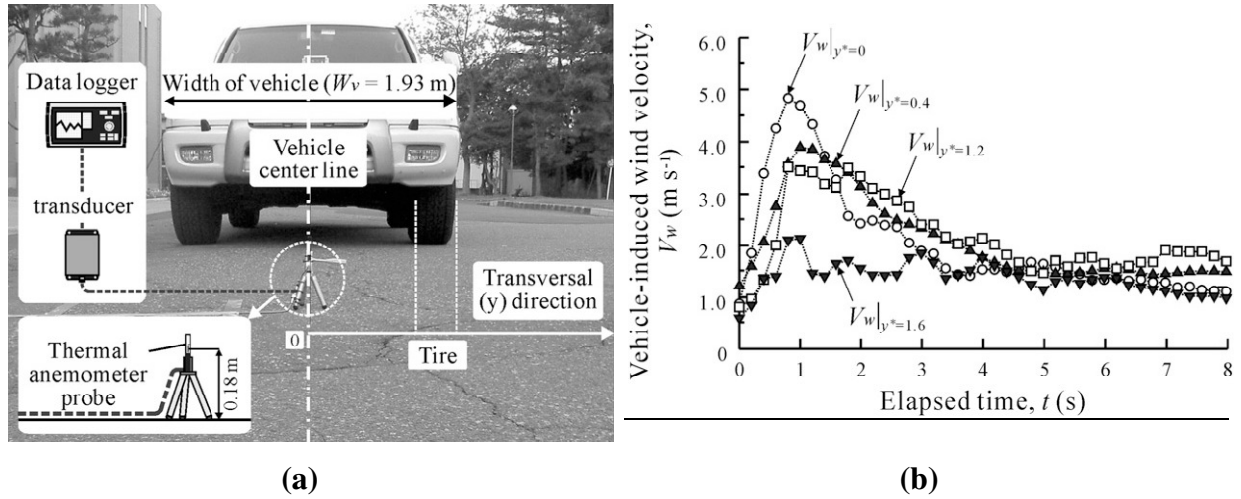


Figure 16. Variation transversale de la vitesse de vent induit par le passage du véhicule, avec (a) protocole de l'expérience (Fujimoto et *al.*, 2012) et (b) les résultats pour une vitesse de circulation $V_{veh} = 30 \text{ km/h}$

Les résultats de cette étude (Figure 16b) montrent que l'impact du trafic sur la vitesse de vent décroît progressivement en s'éloignant du centre du véhicule. En effet, au-delà d'une certaine distance réduite, notée Y^+ , le trafic n'a plus d'effet sur la vitesse du vent induit. Cette distance représente, dans notre cas d'étude, la limite de la zone d'impact du trafic, répartie équitablement de part et d'autre du véhicule, et est exprimée par l'équation suivante :

$$Y^+ = \frac{W_{traffic}}{W_{veh}} \quad 2.34$$

W_{veh} (m) est la largeur du véhicule (désignée par W_v sur la Figure 16a). Y^+ (sans unité) a été déterminée expérimentalement par Fujimoto et *al.* (Fujimoto et *al.*, 2012) et est égale à 1.6.

Les résultats de cette étude ont été validés pour différentes vitesses de circulation allant de 20 à 70 km/h. En s'inspirant de ces résultats et en se basant sur le schéma explicatif de la Figure 17, la zone d'impact du trafic peut être estimée par le biais de l'équation suivante :

$$W_{traffic} = 1.6 W_{veh} \quad 2.35$$

Ainsi, le pourcentage de la route impacté par le trafic, noté $Z_{traffic}$, s'écrit donc sous la forme suivante :

$$Z_{traffic} = \frac{W_{traffic}}{W_{route}} = \frac{1.6W_{veh}}{W_{route}} \quad 2.36$$

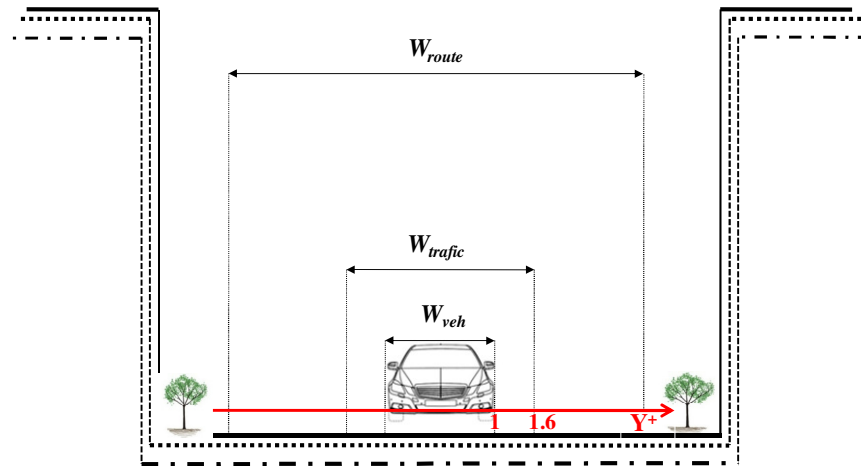


Figure 17. Illustration schématique de la zone d'impact du trafic $Z_{traffic}$

1.3 Prise en compte du trafic automobile dans la modélisation de la *TSR*

L'étude bibliographique que nous avons conduite dans la partie 1.1 montre que les apports thermiques du trafic sont influencés par différents paramètres tels que la densité et la vitesse de circulation, le type de véhicules et les conditions de circulation. En raison de leur multiplicité, accentuée par l'incertitude liée à la densité du trafic ainsi que la variété des processus physiques, le trafic a été pris en compte dans la modélisation du bilan énergétique de surface de la route en se basant sur des approches simples. Dans la littérature, on en distingue deux types, décrits ci-après.

1.3.1 Paramétrisation partielle du trafic

Shao et Lister (Shao et Lister, 1996) incorporent l'effet turbulent du trafic par la modification des coefficients d'échange turbulent entre la surface de la route et l'atmosphère environnante, et la correction du rayonnement infrarouge net reçu par la surface de la route, en fonction de la densité du trafic. Chapman et *al.* (Chapman et *al.*, 2001a) proposent de tenir compte de trois effets du trafic : l'échauffement de la température avec l'introduction d'un facteur correctif sur la *TSR*, la modification du bilan infrarouge net due à la circulation des véhicules

avec un facteur correctif sur le flux infrarouge émis, et l'augmentation des échanges turbulents avec l'augmentation de la vitesse du vent de 2 m/s. Jacobs et Raatz (Jacobs et Raatz, 1996) intègrent le trafic par une augmentation des échanges turbulents, en imposant une vitesse de vent minimale de 5.14 m/s (10 nœuds) au cours de la journée et une vitesse minimale de 2.57 m/s (5 nœuds) au cours de la nuit et lors des périodes de vacances.

Ce type de paramétrisation prend en compte le trafic d'une manière partielle. En effet, les auteurs supposent uniquement certains processus physiques du trafic comme significatifs et négligent les autres. Aucune des études antérieures n'explique l'importance ni la contribution thermique de chacun de ces processus physiques associés au trafic. De plus, les méthodes adoptées pour l'évaluation de ces processus restent approximative. D'ailleurs, on trouve peu d'études expérimentales ayant évalué avec précision ces processus. En outre, les paramètres influençant les apports thermiques du trafic (densité, vitesse, type du véhicule, etc.) n'ont pas tous été pris en compte.

1.3.2 Évaluation globale des apports thermiques du trafic

Cette évaluation globale des apports thermiques du trafic se base sur le calcul d'un flux de chaleur global dégagé par le trafic. À ce propos, on fait référence à l'étude faite par Crevier et Delage (Crevier et Delage, 2001) qui ont ajouté au bilan énergétique de surface de la route un flux constant représentatif des apports thermiques générés par le trafic. Ce flux est estimé à 15 W/m². D'une manière similaire, Sass (Sass, 1997) propose l'introduction dans le bilan de surface d'un flux de sources externes représentatif des impacts de la topographie locale et du trafic. Masson (Masson *et al.*, 2002), dans son modèle Town Energy Balance (TEB), a aussi pris en compte les apports thermiques du trafic comme une source d'énergie constante (20 W/m²) additionnée à la densité de flux turbulent du canyon urbain.

D'autres études ont évalué avec davantage de détails les apports thermiques globaux dégagés par le trafic (Prusa *et al.*, 2002 ; Sailor et Lu, 2004 ; Pigeon *et al.*, 2007 ; Colombert, 2008). Ces études se sont basées sur la consommation en énergie du véhicule. Ceci a été utilisé par Pigeon *et al.* (Pigeon *et al.*, 2007) dans leur étude sur les rejets de chaleur anthropique à Toulouse, par Ichinose *et al.* (Ichinose *et al.*, 1999) dans celle sur l'impact de la chaleur anthropique sur le climat urbain de Tokyo (Japon) et par Klysik (Klysik, 1996) pour son étude sur la distribution spatiale et saisonnière des émissions de chaleur anthropique à Lodz (Pologne). En 2004, Sailor et Lu (Sailor et Lu, 2004) ont développé une méthode pour évaluer

la variation des profils journaliers et saisonniers de la chaleur anthropique en zone urbaine. Colombert (Colombert, 2008) s'est basé sur cette approche pour évaluer l'ensemble de la densité de flux de chaleur global dégagé par le trafic sur Paris (hors Bois de Boulogne et de Vincennes) qui de l'ordre de 16 W/m^2 sur toute la surface bâtie.

Ainsi, l'étude bibliographique a montré que le trafic a un effet significatif sur la **TSR**. Il impacte le bilan énergétique de surface de la route selon différents processus physiques (Prusa et *al.*, 2002). Différentes approches ont été élaborées, soit pour l'appréciation des apports énergétiques globaux générés par le trafic, soit pour l'identification, la description et/ou l'évaluation de chacun des processus physiques d'impact associés au trafic. Chaque approche possède ses propres objectifs ainsi que ses propres hypothèses. De plus, ces apports thermiques du trafic sont plus importants en milieu urbain que dans d'autres zones périurbaines et/ou rurales en raison de la variation de ses paramètres propres (densité, volume, vitesse, etc.) entre ces milieux. Afin de rapprocher ces résultats issus de l'étude bibliographique à la réalité de terrain, une étude expérimentale a été proposée.

2 Études expérimentales de l'appréciation de l'impact du trafic automobile

L'objectif de ces études expérimentales est d'identifier, d'évaluer et de quantifier les impacts thermiques du trafic sur la **TSR**. Elles contribueront aussi à construire une paramétrisation adaptée des processus physiques du trafic pour mieux les prendre en compte dans la partie modélisation numérique. Trois études expérimentales ont été conduites. La première expérience a consisté en des mesures embarquées pour évaluer la différence de la **TSR** entre un milieu urbain et périurbain. L'objectif a été d'apprécier l'impact du microclimat urbain (morphologie urbaine, trafic) sur la **TSR**. La deuxième étude expérimentale a reposé sur des mesures in-situ pour évaluer les apports énergétiques générés par le trafic dans une configuration urbaine. La troisième étude expérimentale a consisté à identifier et quantifier certains processus d'impacts du trafic.

L'ensemble des expériences a été réalisé pendant des périodes hivernales et dans différentes conditions climatiques afin de prendre en compte l'influence de la stabilité atmosphérique sur les apports thermiques du trafic.

2.1.1 Description des outils de mesure

L'ensemble des mesures effectuées au cours de cette étude expérimentale a été réalisé avec le véhicule Thermoroute[®]. Il a été élaboré par le CECF (Centre d'Études et de Construction de Prototypes) Rouen, sous la direction du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), sur des spécifications du Laboratoire Régional de Nancy. Il est destiné à la mesure de la signature thermo-hydrométrique d'itinéraires. Thermoroute[®] constitue un outil efficace d'aide à la décision pour le gestionnaire routier qui désire obtenir une information microclimatique de son réseau. Il permet de localiser les zones froides et humides d'un itinéraire, propices à l'occurrence de verglas. Cette information peut être utilisée en vue d'optimiser les opérations d'entretiens hivernaux et de choisir l'implantation d'une station météo-routière. Il permet également d'identifier sur l'itinéraire des sections homogènes représentatives des grandes tendances microclimatiques.

Il s'agit d'un véhicule de type Renault Scenic (Figure 18) qui permet, à une vitesse de passage maximale de 90 km/h, la mesure et l'enregistrement des paramètres météorologiques et routiers.

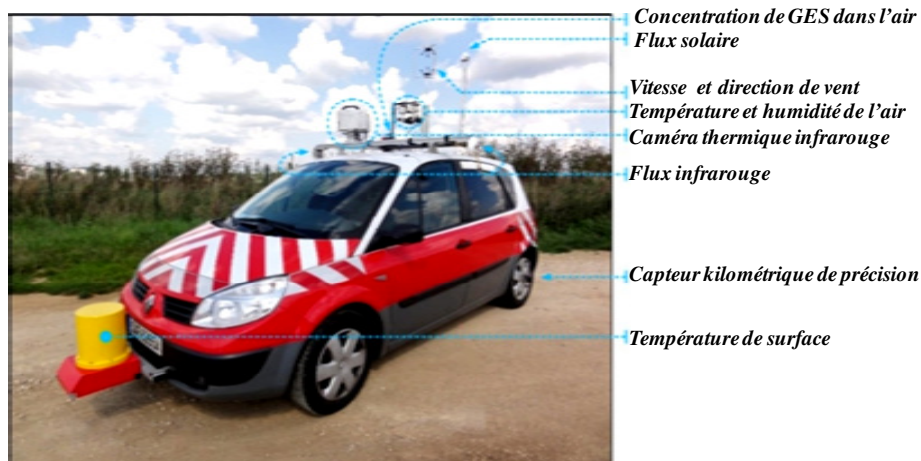


Figure 18. Thermoroute[®], avec différents instruments de mesures

Les différents instruments de mesures présents sur Thermoroute[®] ainsi que leurs descriptifs sont détaillés dans le Tableau 12 suivant.

Tableau 12. Caractéristiques des instruments de mesures embarqués sur Thermoroute®

Paramètre mesurée	Instruments de mesures	Descriptif du capteur		
		étendue de mesure	précision	temps de réponse
Température de surface en zone non circulée	radiomètre infrarouge (Keller PS12-AF1)	-30°C à +70 °C	0.6°C	>0.15 s
Température d'air	capteur intégré (Sensirion SHT15)	-40°C à +250 °C	± 0.3°C	5 s
Humidité relative		0 à 100%	± 5%	5 s
Vitesse du vent	anémomètre 3D (Gill WindMaster Pro)	0 à 65 m/s	0.01 m/s	0.03s
Direction du vent		0 à 359°	0.1°	0.03s
Rayonnement solaire globale incident	pyranomètre (KRIWAN)	0 à 2000 W/m²	± 7% de la mesure	<50 ms
Rayonnement infrarouge descendant	pyrgéomètre (Kipp & Zonen)	-250 à 250 W/m²	< 1% de la mesure	< 18 s
Température de surface en zone circulée	caméra infrarouge (FLIR® S65)	-40°C à 120°C	± 2% de la mesure	fréquence d'acquisition de 1 image/s

Le véhicule est équipé aussi par un codeur incrémental de distance installé sur la roue arrière gauche du véhicule. Cet appareil enregistre la distance parcourue et déclenche l'acquisition des données tous les trois mètres. De plus, chaque point de mesure est géolocalisé à l'aide d'un système GPS embarqué. Un système de prise de vues par caméra visible est également présent pour aider l'exploitation des mesures.

2.2 Influence du microclimat urbain sur la *TSR*

2.2.1 Dispositif de mesures

L'étude bibliographique a montré que la morphologie urbaine a un impact thermique significatif sur la ***TSR*** ainsi que sur les autres paramètres météorologiques. La majorité de ces études ont été faites dans des conditions climatiques estivales, dans le cadre des études sur les îlots de chaleur urbains ou sur l'évaluation du confort urbain. Afin d'analyser ce phénomène sur la période hivernale, des mesures de la ***TSR*** et de certains autres paramètres météorologiques ont été réalisées sur un itinéraire comprenant des configurations urbaines et périurbaines (Figure 19). L'objectif est d'analyser l'influence de la configuration urbaine sur les variations des paramètres météorologiques et routiers entre le jour et la nuit et à différents moments de la journée pour la saison hivernale.

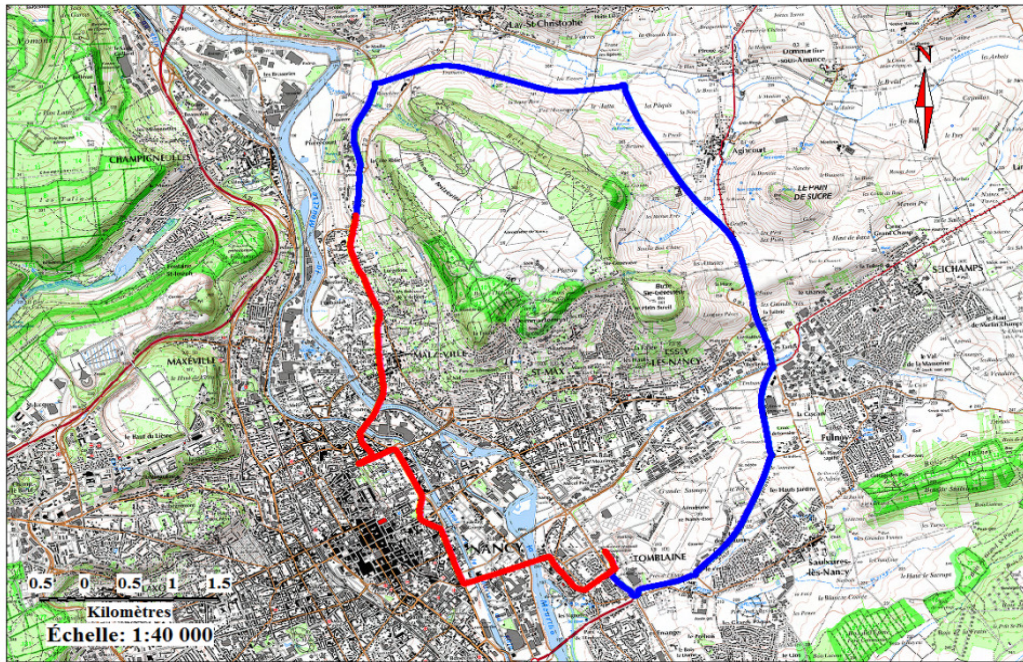


Figure 19. Itinéraire utilisé pour analyser la variation des paramètres météorologiques et routiers entre un milieu urbain (rouge) et périurbain (bleu) en période hivernale

La longueur totale du circuit de l'expérience est égale à 20 km. Le circuit périurbain représente environ 12 km, et est représenté sur la Figure 19 par le trait en bleu, alors que la partie urbaine est égale à 8 km environ et est représenté par le trait en rouge. Le point de départ et d'arrivée pour cette campagne de mesure est le Cerema – DTer Est – Laboratoire Régionale de Nancy. La partie urbaine commence à partir du 12^{ème} kilomètre.

Les enregistrements de la **TSR** ont été effectués à l'aide du radiomètre infrarouge installé à l'avant de ce véhicule (cf. Figure 18). Il est installé à environ 0.30 m au dessus de la surface de la route. Le détecteur est un bolomètre effectuant la mesure dans la bande de 7–14 μm . Cette campagne de mesures a été répétée six fois, dans des conditions météorologiques différentes et sur plusieurs périodes de la journée (Tableau 13).

Tableau 13. Conditions météorologiques des expériences pour l'appréciation de l'influence du microclimat urbain sur la TSR en hiver

Expérience n°	date heure	Paramètres météorologiques et routiers					
		Valeur	TSR (°C)	T _{air} (°C)	HR (%)	U (m/s)	R _{glob} (W/m²)
1	14/02/2013 13h00	Min	-5.8	-5.8	72	1.0	90
		Max	-3.7	-2.8	82	4.7	237
		Moyenne	-6.0	-4.1	77	2.7	183
2	15/03/2013 02h15	Min	-11.1	-4.6	80	0.9	15
		Max	-6.4	-2.7	87	5.0	21
		Moyenne	-9.2	-3.1	83	3.7	19
3	20/02/2014 07h45	Min	-4.2	1.5	83	1.0	14
		Max	0.2	2.7	87	4.8	22
		Moyenne	-2.6	2.0	85	3.1	20
4	20/02/2014 18h25	Min	0.1	2.0	51	1.0	30
		Max	3.4	3.5	61	5.0	116
		Moyenne	1.3	2.6	55	2.7	62
5	22/02/2014 12h00	Min	-10.0	-3.0	57	1.5	50
		Max	-1.2	-1.2	67	5.1	490
		Moyenne	-5.2	-2.0	61	3.0	276
6	22/03/2014 11h00	Min	1.7	3.4	72	1.0	70
		Max	6.8	5.5	82	4.8	456
		Moyenne	2.7	4.4	76	2.8	307

2.2.2 Résultats et discussion

Les variations de la **TSR** ainsi que des autres paramètres météorologiques entre le circuit urbain et périurbain sont illustrées dans les Figure 20 à Figure 25 pour les différentes expériences. Afin de visualiser les limites de ces deux itinéraires sur les figures, la zone urbaine a été encadrée en violet.

Les résultats de ces différentes campagnes de mesures montrent que les profils de **T_{air}**, de la vitesse du vent (**U**) et du rayonnement global (**R_{glob}**) du circuit urbain présentent une légère variation par rapport au circuit périurbain. Cette variation est expliquée par l'influence du microclimat urbain. Les légères réductions locales de la vitesse de vent sont dues généralement à l'augmentation de la rugosité de surface causée par les constructions. De même, pour le rayonnement global reçu par le circuit urbain, on constate une légère diminution par rapport au circuit périurbain, due aux ombres portées par les bâtiments. La température d'air est le résultat de l'influence de tous les paramètres météorologiques. Ces résultats ont été confirmés sur toutes les campagnes de mesures, quelles que soient les conditions météorologiques.

Concernant la **TSR**, les résultats des expériences ont permis de faire la distinction entre deux situations. Pendant la nuit (Figure 21), on constate que le profil de la **TSR** ne présente pas de modification remarquable entre les deux circuits urbain et périurbain. Les impacts thermiques du trafic sur le bilan d'énergie sont alors négligeables et n'ont pas d'influence sur la **TSR**. Cependant, dans la journée, on constate que la **TSR** du circuit urbain est plus élevée de 2 à 4°C par rapport au circuit périurbain. Cette augmentation est associée aux apports énergétiques d'origine anthropique et notamment le trafic automobile. En effet, pendant la nuit les déplacements sont faibles voire quasi-nuls, mais ils sont beaucoup plus importants en journée avec des apports énergétiques significatifs.

En outre, l'augmentation de la **TSR** en milieu urbain varie aussi selon le moment de la journée. Par exemple, pour la journée du 20/02/2014, deux campagnes de mesures ont été effectuées à 7h45 (Figure 22) et à 18h25 (Figure 23), dans des conditions météorologiques similaires. On constate que pour la première campagne de mesure, la **TSR** en circuit urbain est plus élevée de 4°C par rapport à celui périurbain. Par contre pour la seconde campagne, la différence de la **TSR** entre les deux circuits ne dépasse pas 2°C. Ceci peut être expliqué par la variation des apports énergétiques générés par le trafic dans la journée. Les horaires de ces deux campagnes de mesures ont été choisis volontairement afin de couvrir les deux pics de déplacements celui du matin et celui du soir. Le premier pic correspond aux déplacements quotidiens des habitants de leur domicile vers le lieu du travail, il s'agit d'un « déplacement centripète » où la majorité de ses déplacements se dirigent et se concentrent vers le milieu urbain. Alors que le deuxième pic correspond à des « déplacements centrifuges » représentant les trajets de retours vers les habitats, souvent à l'extérieur du milieu urbain. Cette différence de concentration au niveau de déplacements contribue à la différence de la **TSR** entre les milieux urbains et périurbains d'un côté et entre les différents moments de la journée de l'autre.

Les Figure 23 à Figure 25 montrent des variations locales du profil de la **TSR** au sein du circuit urbain. Elles peuvent être attribuées aux variations de certaines variables météorologiques telles que la température de l'air, la vitesse de vent et le rayonnement global reçu par la surface de la route, en raison de la configuration urbaine. Ces variations affectent le bilan énergétique de surface de la route et par conséquent la **TSR**. En outre, dans un milieu urbain, certaines routes sont beaucoup plus circulées que d'autres, modifiant les apports énergétiques du trafic ce qui explique également la variation locale du profil de la **TSR**.

Cette étude expérimentale a permis de se forger une idée globale de la variation de la **TSR** entre un milieu urbain et périurbain, qui conduit à une variation plus élevée en milieu urbain. Cette étude confirme également les résultats de la littérature indiquant d'une part que la morphologie urbaine est responsable d'un microclimat susceptible d'influencer les paramètres météorologiques et routiers, et d'autre part que les apports énergétiques assurés par le trafic urbain influencent la **TSR**.

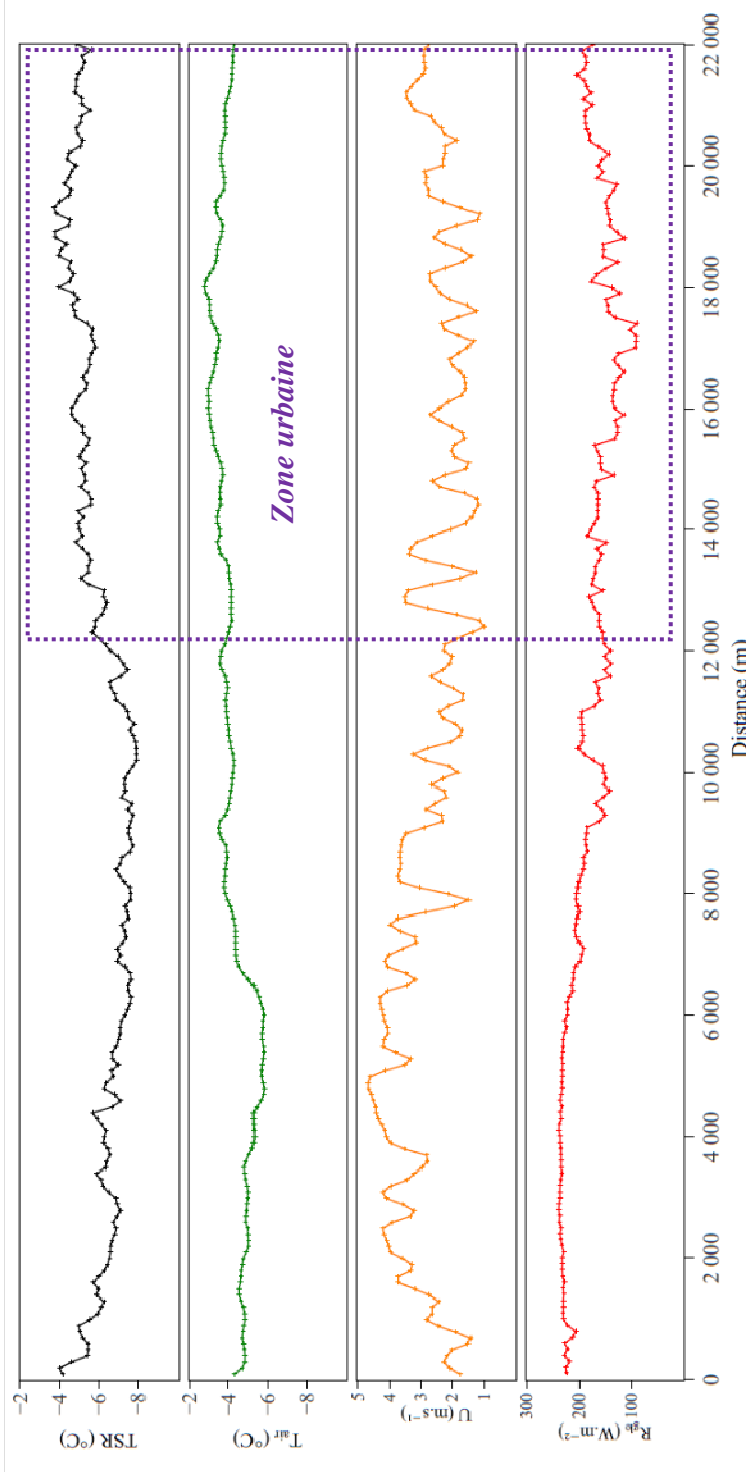


Figure 20. Variation des paramètres météorologiques et routiers pour la journée 14/02/2013 à 13h00

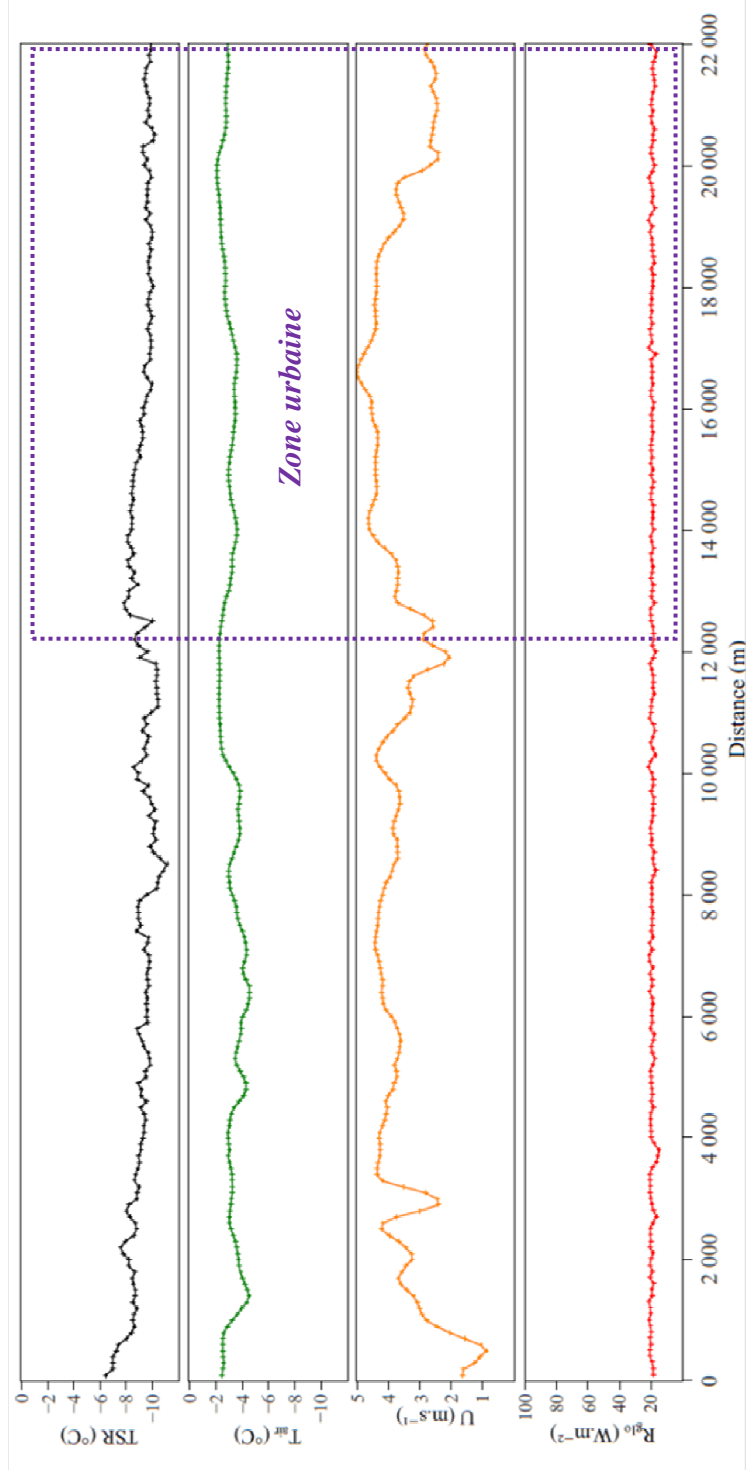


Figure 21. Variation des paramètres météorologiques et routiers pour la journée 15/03/2013 à 2h15

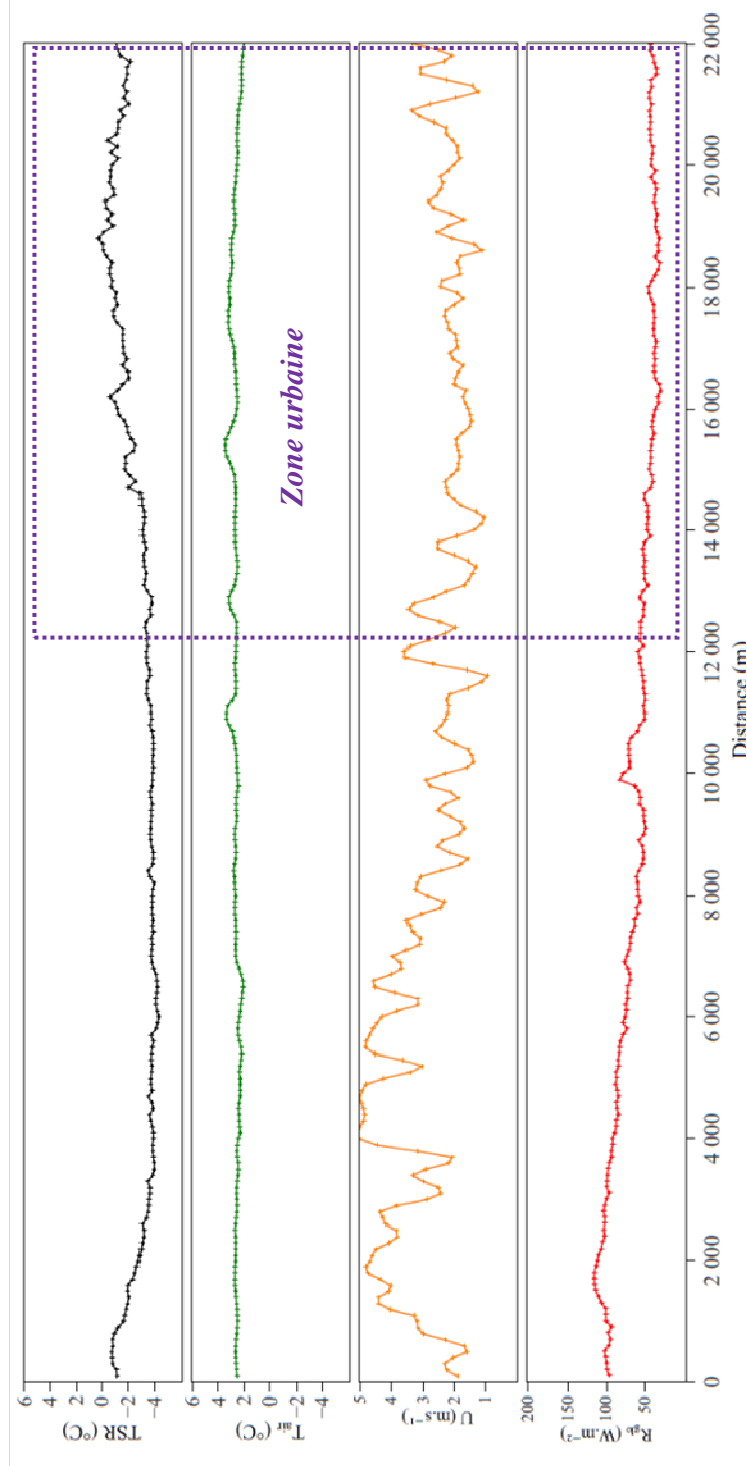


Figure 22. Variation des paramètres météorologiques et routiers pour la journée 20/02/2014 à 7h45

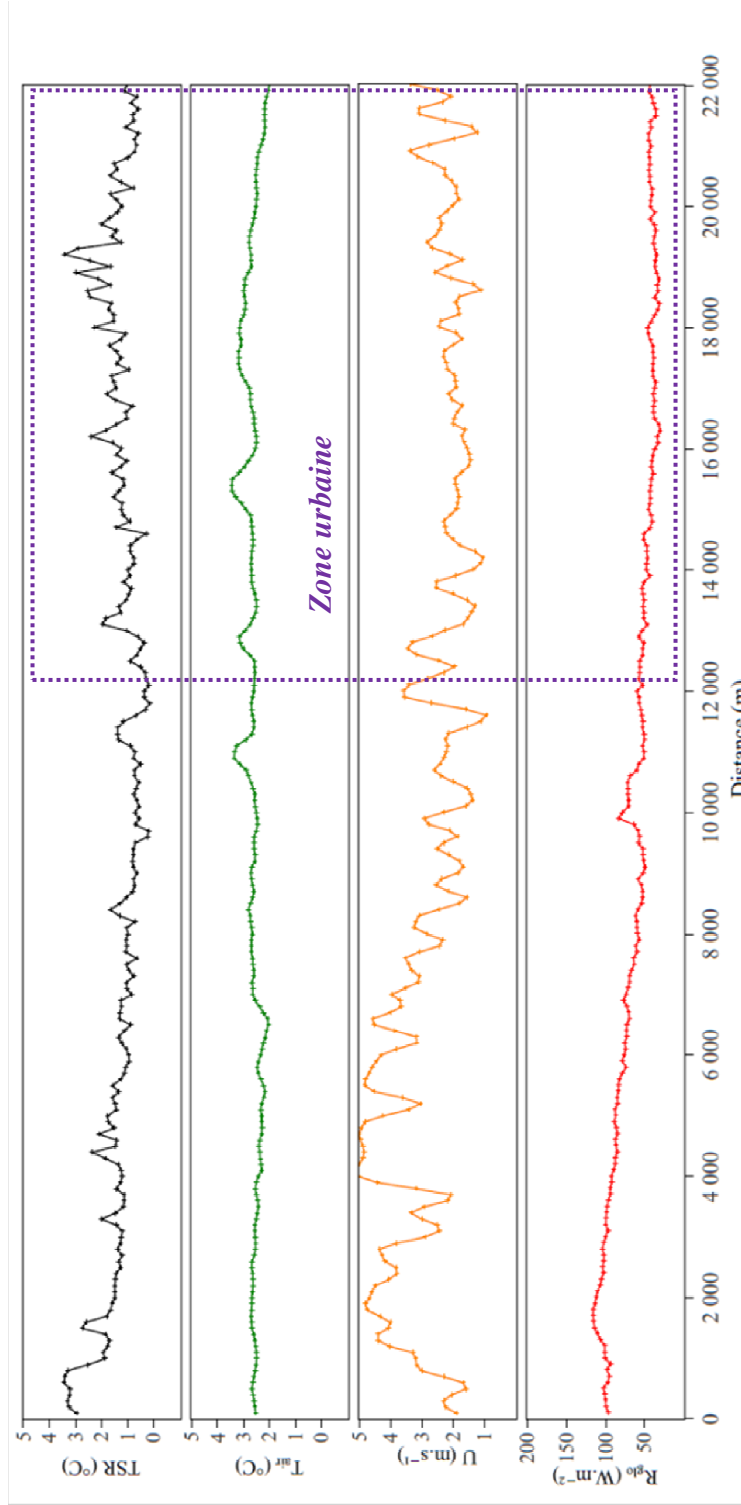


Figure 23. Variation des paramètres météorologiques et routiers pour la journée 20/02/2014 à 18h25

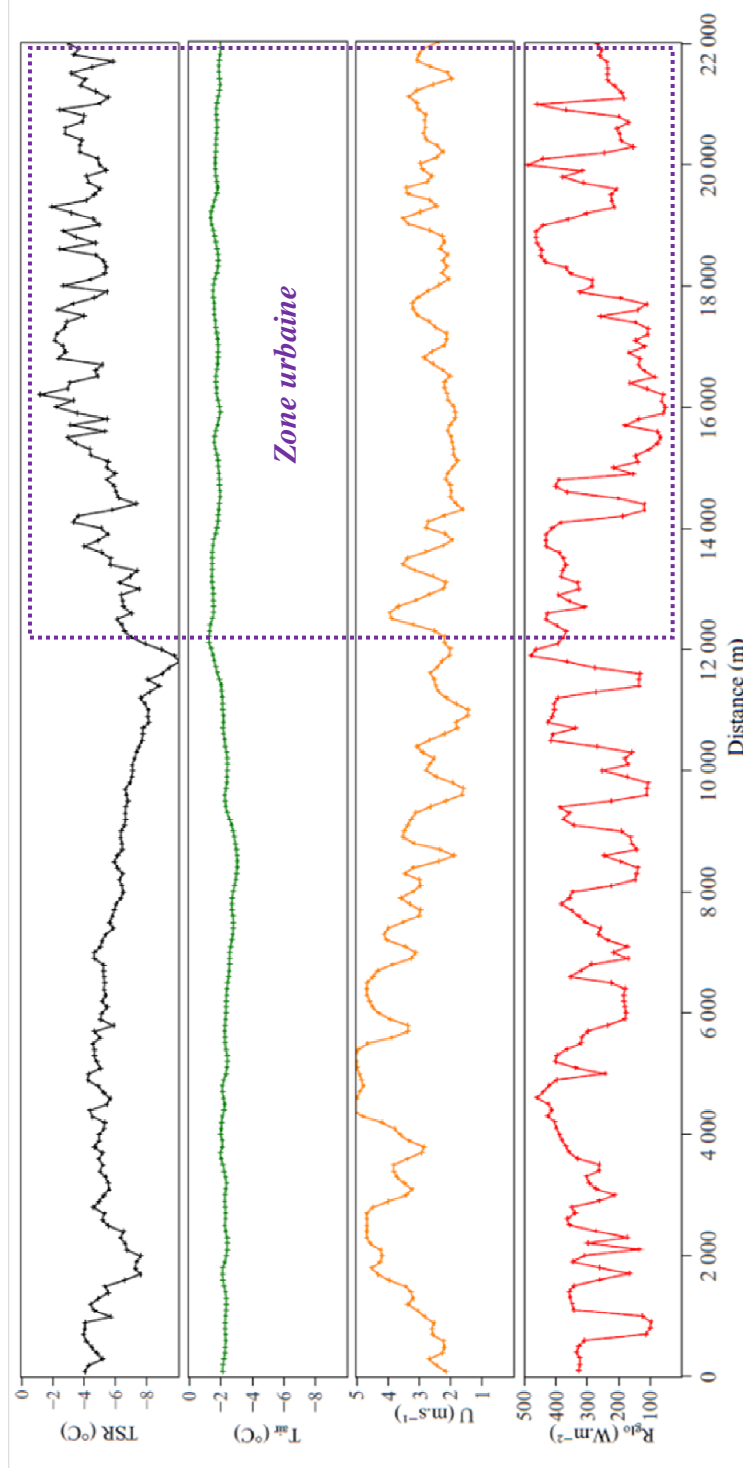


Figure 24. Variation des paramètres météorologiques et routiers pour la journée 22/02/2014 à 12h00

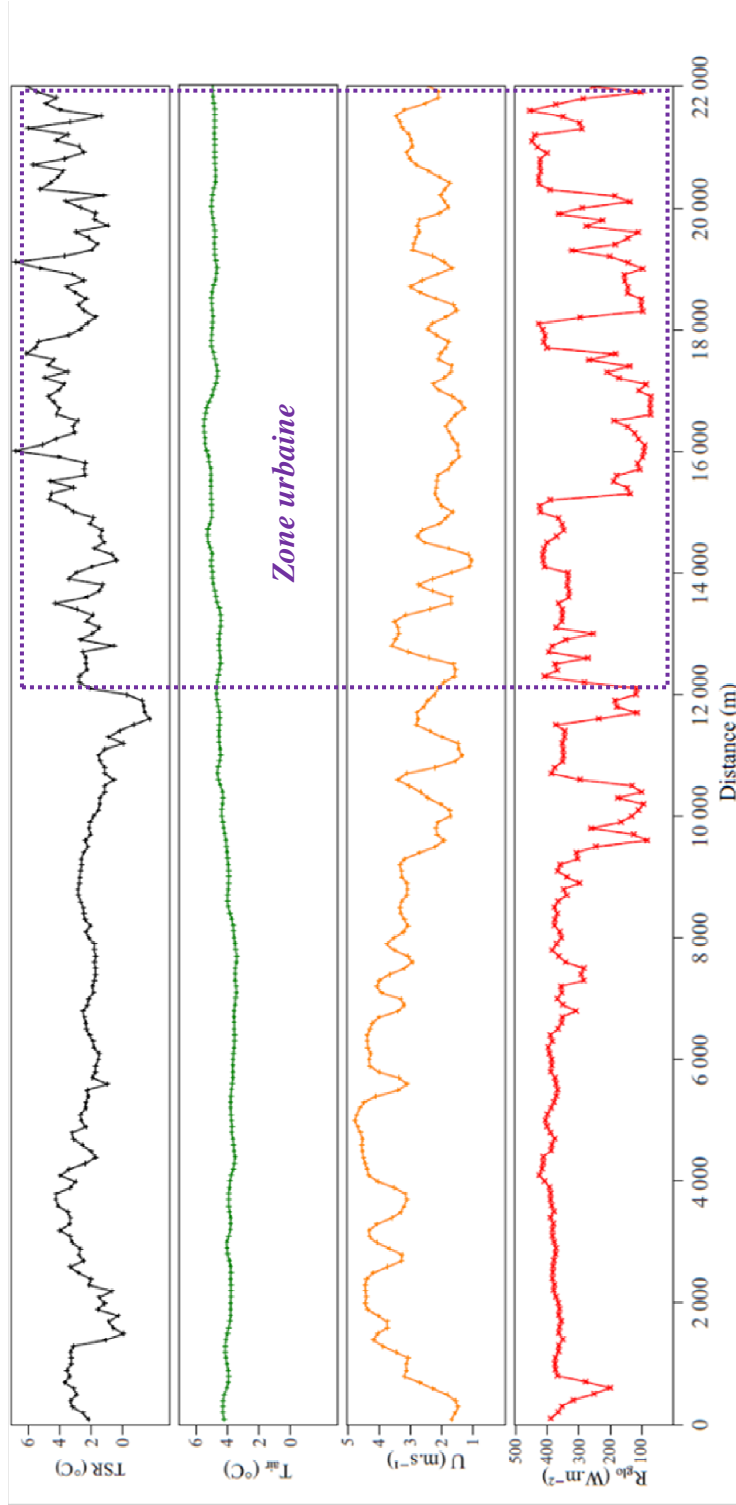


Figure 25. Variation des paramètres météorologiques et routiers pour la journée 22/03/2014 à 11h00

2.3 Appréciation de l'influence du trafic automobile sur la TSR

L'augmentation de la **TSR** de 2 à 3°C en raison du trafic est beaucoup plus appréciable dans un milieu urbain où la densité du trafic est importante que pour des milieux périurbains et ruraux. De plus, les apports énergétiques du trafic varient selon les paramètres du trafic (volume, densité, vitesse de circulation) et selon le moment de la journée.

Une deuxième étude expérimentale a été réalisée afin d'apprécier les apports thermiques spécifiques au trafic automobile et les conséquences sur la **TSR**. L'objectif est de réaliser des mesures en continu dans des conditions réelles de circulation pour quantifier les apports thermiques du trafic, puis analyser la variation des ces apports au cours de la journée.

Notre choix s'est porté sur la rue Charles III de Nancy (France) (Figure 26). Elle remplit les critères d'une configuration urbaine, et se situe au centre ville de Nancy avec une longueur d'environ 1500 m pour une largeur de 12m. La hauteur des bâtiments de cette rue est homogène, et égale en moyenne à 15m. C'est une rue à sens unique avec des feux de circulation. Elle est très circulée, avec un trafic moyen journalier de 8000 véhicules/jour, et allant jusqu'à 11000 véhicules/jour.

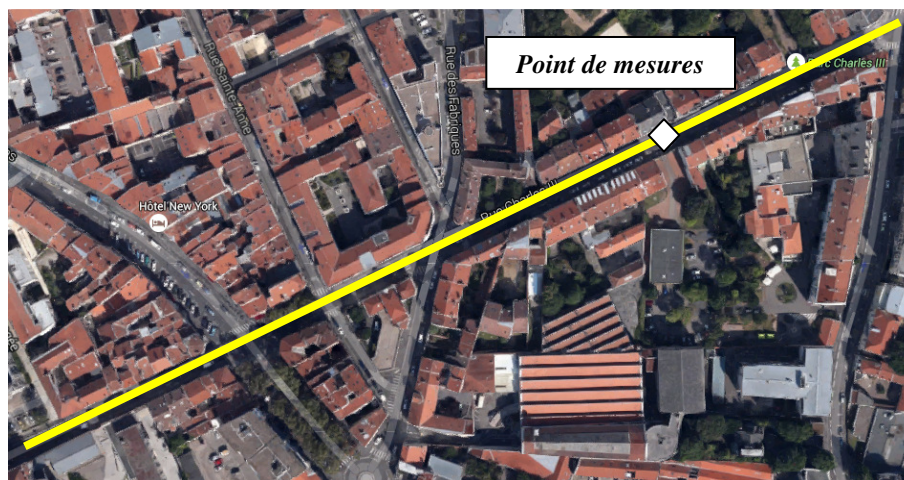


Figure 26. Vue aérienne d'une section de la rue Charles III – Nancy et du point de mesures

2.3.1 Instrumentation et mesures

Les mesures ont aussi été effectuées avec le véhicule Thermoroute[®]. La mesure de la **TSR** de la zone circulée s'est appuyée sur la thermographie infrarouge. Cette technique représente un outil de contrôle courant dans de nombreux domaines industriels et de recherche. Dans le domaine des infrastructures routières, la thermographie infrarouge occupe aujourd'hui une

place croissante. En effet, elle est présente dans l'auscultation des ouvrages d'art (contrôle non destructif), mais aussi dans la prévision du risque hivernal (Marchetti et *al.*, 2010).

Le dispositif de mesures est illustré par la Figure 27. Le radiomètre infrarouge installé à l'avant du véhicule Thermoroute® mesure la **TSR** de la zone non circulée, alors que la **TSR** de la zone circulée est enregistrée par la caméra thermique installée sur le toit du véhicule. Elle est orientée vers la zone impactée par le trafic. Les autres instruments de mesures enregistrent la variation des paramètres météorologiques (température d'air, vitesse de vent, rayonnement global, etc.). L'acquisition et l'enregistrement des données de mesures sont réglés avec un pas de temps de 1 minute.

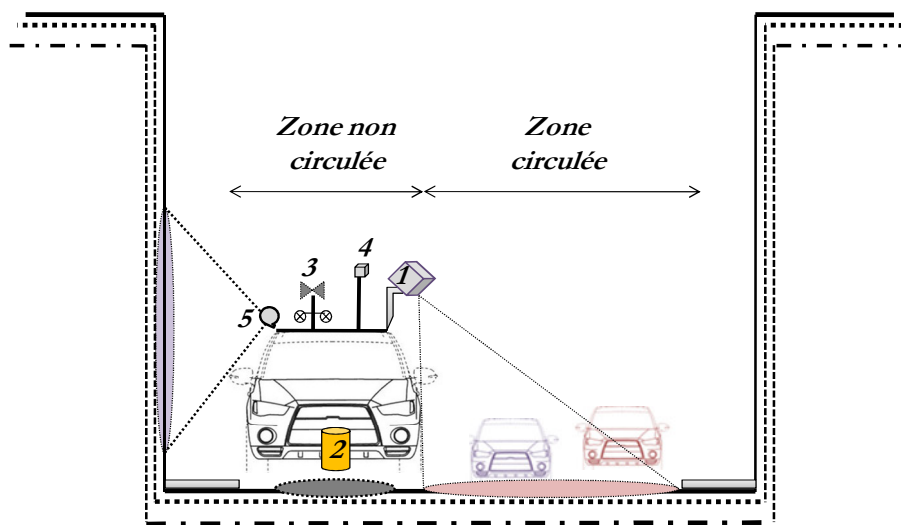


Figure 27. Schéma de l'expérience de mesure de la TSR d'une zone circulée et d'une zone non circulée avec les instruments de mesures ((1) caméra infrarouge, (2) radiomètre infrarouge, (3) mesure de T_{air} et HR, (4) pyranomètre, (5) pyrogéomètre)

Cette étude expérimentale a été répétée trois fois pour différentes conditions météorologiques hivernales sur des périodes de mesures distinctes. La première campagne de mesure a duré 48 heures, la deuxième 36 heures et la troisième 72 heures. L'horaire de début et de fin de chaque expérience a été choisi de manière à couvrir les heures de pointe et celles creuses.

2.3.2 Résultats et discussion

L'analyse des résultats porte précisément sur les données de mesures issues de la caméra infrarouge et du radiomètre infrarouge.

L'analyse thermique des données de mesures de la caméra infrarouge a été réalisée avec le logiciel ThermoCam™ Researcher. Des corrections radiatives ont été également apportées à

ces mesures en se basant sur l'approche élaborée par Marchetti et *al.* (Marchetti et *al.*, 2010). Elle permet d'obtenir des températures radiatives issues de la caméra en cohérence avec celles du radiomètre infrarouge Keller PS12-AF1, choisi comme référence en raison de ses performances en termes de temps de réponse, de précision et de sensibilité. Le bilan radiatif à la surface de la route peut s'écrire :

$$L_{\text{mesuré}} = \tau_{\text{atmosphère}} \epsilon_{\text{route}} L_{\text{route}} + \tau_{\text{atmosphère}} (1 - \epsilon_{\text{route}}) L_{\text{environnement}} + (1 - \tau_{\text{atmosphère}}) L_{\text{atmosphère}} \quad 2.37$$

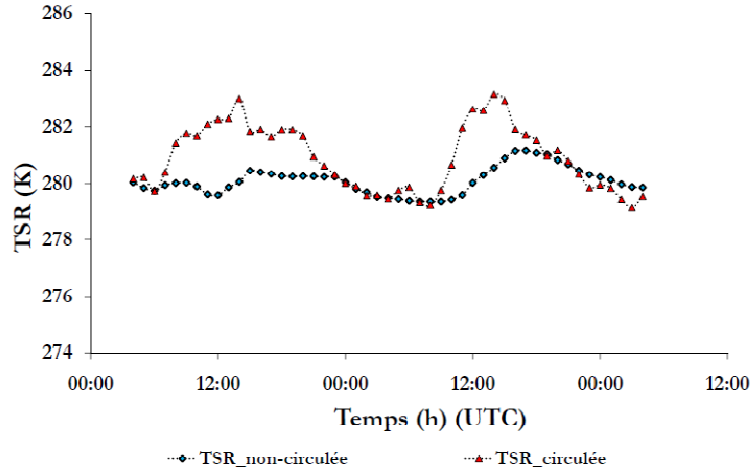
La luminance mesurée par la caméra infrarouge $L_{\text{mesuré}}$ (W/m²/sr) est la résultant de celle émise par la route, celle de l'environnement $L_{\text{environnement}}$ radiatif global et de l'atmosphère $L_{\text{atmosphère}}$, en tenant compte de l'émissivité de la route ϵ_{route} et du coefficient de transmission de l'atmosphère $\tau_{\text{atmosphère}}$ (compris entre 0 et 1). Dans la configuration choisie, la distance entre le caméra et la route est entre 6 à 8 m. Les mesures sont effectuées dans des conditions telles que l'absorption du flux infrarouge par l'atmosphère est considérée comme négligeable. L'atténuation en transmission en raison de l'humidité relative de l'atmosphère et des ses autres éléments constitutifs est alors négligée (Gaussorgues 1981 ; Handbook of military Infrared technology, 1965 ; Marchetti et *al.*, 2004 ; Marchetti et *al.*, 2006b, 2010, 2011). Ainsi, $\tau_{\text{atmosphère}}$ est supposée égale à 1.

La luminance de l'environnement est appréciée à l'aide d'un miroir diffus installé dans le champ de vision de la caméra infrarouge. L'ensemble des éléments constitutifs de la scène thermique émettent un rayonnement infrarouge, et sont assimilés à des corps noirs. Ainsi la radiance mesurée sur ce miroir permet de calculer une température radiative moyenne de l'environnement $T_{\text{environnement}}$, avec prise en compte des contributions radiatives de l'environnement immédiat de la surface routière. La configuration de l'installation de la caméra choisie (Figure 27) avait conduit à un angle d'observation éloigné de la normale par rapport à la surface de la route. Dès lors, l'émissivité de la route doit être adaptée, et est inférieure à la valeur 0.94, précédemment attribuée comme une émissivité moyenne générale pour les surfaces de bétons bitumineux. Une valeur de ϵ_{route} de 0.77 a été sélectionnée, en cohérence avec la littérature (Handbook of military Infrared technology, 1965 ; Marchetti et *al.*, 2010). Un tel choix permet de satisfaire les conditions d'angle d'observation. Cela suppose aussi que l'émissivité est indépendante de la nature des bétons bitumineux. Par conséquent, les variations de flux infrarouge détectées sont alors uniquement causées par des variations de

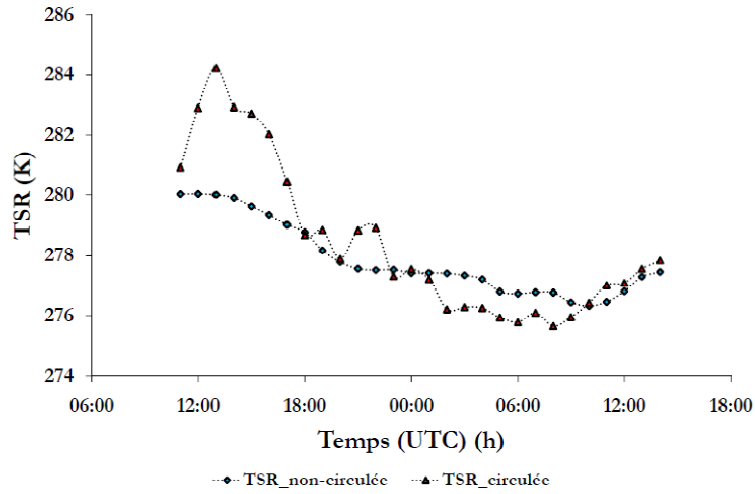
température. À l'issue de ces corrections radiatives, et en considérant les corps observés comme gris, la *TSR* s'exprime de la manière suivante :

$$TSR_{circulée}^4 = \epsilon_{route} T_{route}^4 + (1 - \epsilon_{route}) T_{environnement}^4 \quad 2.38$$

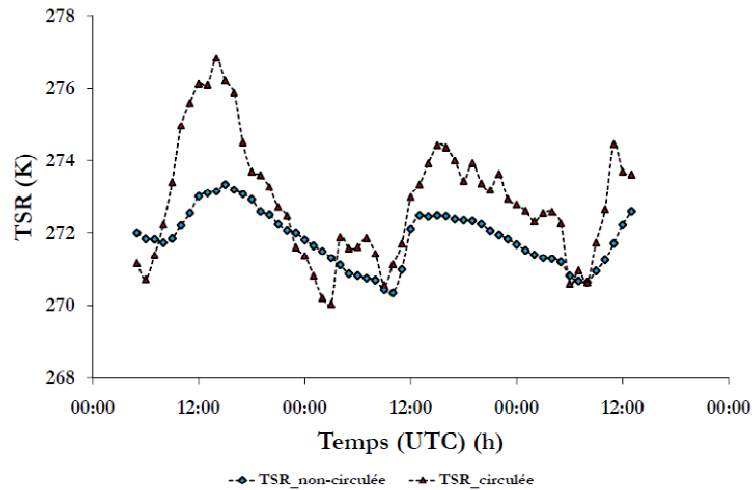
$TSR_{circulée}$ est la *TSR* de zone circulée, T_{route} la *TSR* issues des images et $T_{environnement}$ la température de l'environnement, déterminée en se basant sur la formule définie par Marchetti et *al.* (Marchetti et *al.*, 2010). La Figure 28 présente les résultats de l'analyse comparée entre les mesures issues de ces deux instruments pour les trois campagnes expérimentales. On observe un bon accord entre les mesures issues de la caméra infrarouge et celles du radiomètre infrarouge en absence de trafic.



(a) Expérience du 21 au 22 novembre 2014



(b) Expérience du 16 au 17 décembre 2014



(c) Expérience du 04 au 06 février 2015

Figure 28. Différence de la température de surface entre une zone sans trafic (*TSR_non-circulée*) et une zone circulée (*TSR_circulée*) pour les trois campagnes expérimentales

Les résultats de ces études expérimentales montrent que le trafic engendre une augmentation de la **TSR** de l'ordre de 2 à 3°C. Cette augmentation est appréciable surtout pendant la journée où la densité du trafic est importante, alors que pendant la nuit et/ou tôt le matin, avec une densité de trafic faible, aucune différence significative entre les **TSR** n'est observée. Cette différence illustre bien les apports thermiques du trafic.

En outre, les résultats de cette étude expérimentale montrent que, même pendant la journée, la différence de la **TSR** entre les deux zones est variable en fonction du temps. Cette variation est liée à la variation de la densité du trafic au cours de la journée (Figure 29). En effet, plus la densité du trafic est importante, plus ses apports thermiques sont significatifs, et ceci se traduit par une augmentation de la **TSR**.

Cette étude expérimentale confirme les résultats trouvés dans la littérature indiquant que le trafic a un effet significatif sur la **TSR** et que ses apports thermiques dépendent de ses paramètres (densité, volume, vitesse, etc.). Cependant, cet apport énergétique est global, et est le résultat de différents processus physiques d'impacts du trafic. Afin de les identifier et de les évaluer, une autre étude expérimentale a été entreprise.

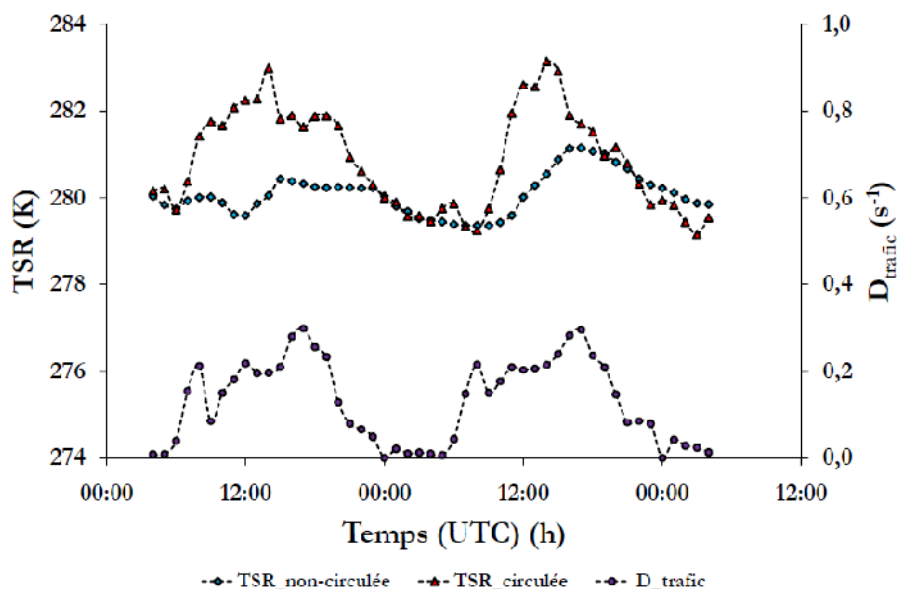


Figure 29. Densité du trafic D_{trafic} de la Rue Charles III pour la journée du 20 au 21 novembre 2014, et évolution de la TSR correspondante en zones circulée et non circulée

2.4 Étendue spatiale de l'impact du trafic automobile

Le trafic automobile influence le bilan énergétique de surface de la route selon différentes processus physiques (Prusa et al., 2002). L'objectif de cette étude expérimentale est

d'identifier et d'évaluer ces différents processus. À cet égard, des dispositifs expérimentaux embarqués et en point fixe ont été mis en place. Chaque dispositif consiste à identifier et à évaluer un ou plusieurs de ces processus physiques associés au trafic.

2.4.1 Mesures embarquées de la TSR en milieu urbain

L'objectif de cette expérience est d'évaluer les impacts dus aux frottements pneumatiques des roues, le flux de chaleur dégagé par le système d'échappement, le flux radiatif émis par la partie inférieure du véhicule ainsi que l'étendue spatiale de l'effet du trafic.

Les mesures ont été réalisées avec deux véhicules. Un premier véhicule précède le véhicule Thermoroute[®] qui enregistre la variation des paramètres routiers et météorologiques (*TSR*, T_{air} , vitesse de vent, humidité, etc.). Le protocole de cette expérience est illustré par la Figure 30.

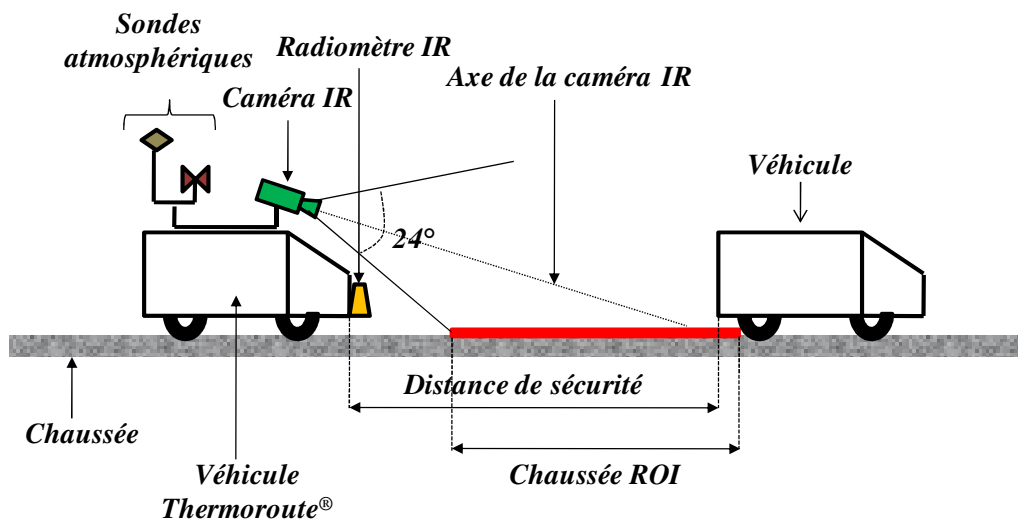


Figure 30. Illustration schématique du protocole des mesures embarquées de la TSR en milieu urbain

L'intérêt principal de cette expérience est de mesurer à l'aide de la caméra infrarouge l'évolution instantanée de la *TSR* suite au passage du véhicule. La caméra infrarouge, comme le montre la Figure 30, est installée sur le toit du véhicule Thermoroute[®], et est orientée vers la zone impactée par le passage du véhicule, désignée par *Chaussée ROI*. Les mesures ont été réalisées en milieu urbain (Figure 31), avec une vitesse de circulation comprise entre 10 et 50 km/h.



Figure 31. *Vue aérienne de l'itinéraire urbain de l'expérience avec mesures embarquées de la TSR en milieu urbain*

L'itinéraire, représenté sur la Figure 31, a été choisi pour sa spécificité de configuration urbaine. En effet, les voies de cet itinéraire sont à sens unique avec des zones avec limitation de vitesse (zone d'école) ainsi que la présence des feux de circulation. L'ensemble des rues le constituant peut être assimilé à des canyons urbains avec une hauteur moyenne des bâtiments de 15 m et une largeur moyenne des rues de 12 m.

L'expérience a été répétée plusieurs fois (9 campagnes de mesures), à différents moments de la journée, afin de prendre en compte différentes fluidité et densité du trafic, et dans des conditions atmosphériques hivernales (Tableau 14).

Tableau 14. *Conditions météorologiques des expériences pour les mesures embarquées de la TSR en milieu urbain*

Expérience n°	Date	Heure	Variables météorologiques		
			T _{air} (°C)	TSR (°C)	HR (%)
1	20/02/2013	11:25	4.7	5.0	63
		14:45	3.6	3.6	60
		17:45	2.8	1.5	55
2	21/02/2013	06:45	-0.6	-3.0	72
		08:00	-0.5	-4.3	74
		11:45	0.5	-0.4	66
		14:00	1.0	0.2	58
3	22/02/2013	09:00	-3.7	-7.2	70
		12:30	-0.8	-3.0	52

2.4.2 Quantification de l'effet de masque et du vent induit par le passage d'un véhicule

Cette expérience a consisté à instrumenter une chaussée avec un radiomètre infrarouge et un pyrgéomètre, ainsi que différentes sondes dédiées aux propriétés atmosphériques afin d'apprécier l'impact du passage d'un véhicule sur le flux radiatif reçu par la surface de la route, sur la vitesse du vent, sur la *TSR* ainsi que le flux radiatif émis par la partie inférieure d'un véhicule. Cette expérience a été conduite au Laboratoire Régional de Nancy. Son protocole repose sur le passage d'un véhicule sur une chaussée instrumentée à différentes vitesses de circulation représentatives du trafic urbain (10 à 50 km/h).

En 2012, Fujimoto *et al.* (Fujimoto *et al.*, 2012) ont montré que le passage des véhicules sur la route engendre une perturbation transversale de la vitesse du vent. Afin d'évaluer ce phénomène, plusieurs instruments de mesures ont été positionnés de manière à identifier l'effet du trafic au voisinage du véhicule (Figure 32).

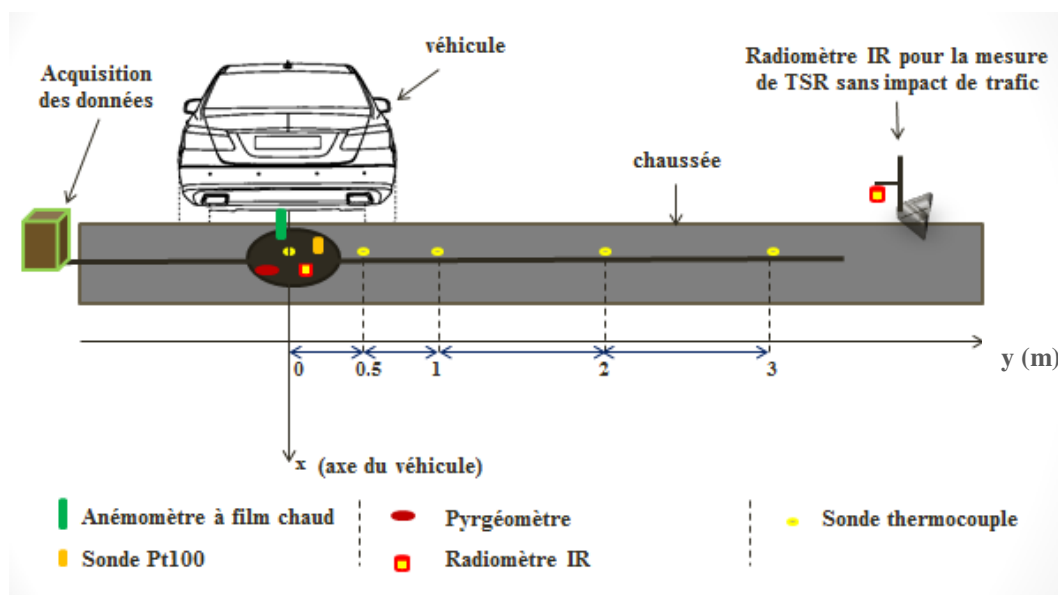


Figure 32. Schéma de l'expérience de quantification de l'effet de masque et de vent induit par le passage d'un véhicule

2.4.3 Résultats et discussion

❖ Mesures embarquées de la *TSR* en milieu urbain

Sur la Figure 33, les lignes 1 et 2 font références respectivement aux traits 1 et 2 sur l'image thermique (représentés en vert). Ils correspondent au profil de la *TSR* enregistré respectivement au moment du passage du véhicule et après un certain temps.

L'analyse des résultats des images thermiques montrent que le passage du véhicule engendre une augmentation instantanée de la **TSR** de l'ordre de 2 à 4°C (Figure 33). L'accroissement maximum est lié au frottement des pneumatiques (bandes de roulement, zones 1 et 2 Figure 33). Le troisième pic (zone 3 sur la Figure 33) représente la contribution en énergie du système d'échappement ainsi que du flux radiatif émis par la partie inférieure du véhicule. Ils présentent une contribution de 1 à 2°C. On constate que cette contribution est uniformément répartie de part et d'autre du système d'échappement. Cette contribution du système d'échappement est plus importante que le flux radiatif émis par la partie inférieure du véhicule. De plus, le pic de **TSR** de la zone 1 est plus élevé que celui de la zone 2 de 0,5°C en raison de la contribution du système d'échappement. Le quatrième pic (zone 4, sur la Figure 33) est dû à la différence d'émissivité entre la surface de revêtement (béton bitumineux) et la peinture de marquage au sol, et est peu significative (< 0,5°C).

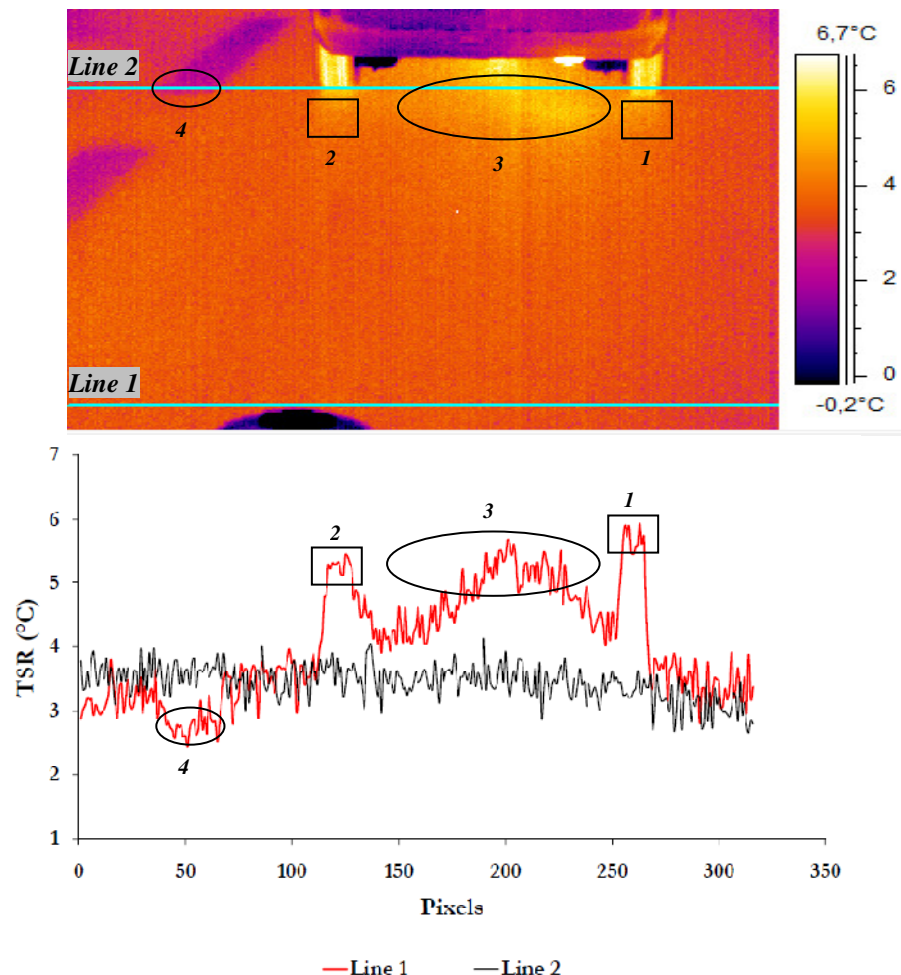


Figure 33. Quantification des processus d'impacts du trafic

Les résultats de cette étude expérimentale montrent que les flux énergétiques générés par le passage du véhicule sont très variables. La couverture de la route par le véhicule est partielle,

et de nombreuses hétérogénéités existent sur cette zone couverte. Le flux de chaleur dû aux frottements pneumatiques ne s'exerce qu'au niveau des bandes de roulements. Pour la chaleur dégagée par le système d'échappement, le flux ne s'exerce que sur une section limitée. Fujimoto et *al.* (Fujimoto et *al.*, 2008) ont montré que la température de la partie inférieure du véhicule est variable et beaucoup plus élevée du côté du moteur que de l'autre (Figure 15). Le flux radiatif émis par la partie inférieure du véhicule est spatialement hétérogène. Cette hétérogénéité nécessite une paramétrisation des processus physiques associés au trafic dans l'évaluation de leurs apports énergétiques.

En se basant sur les résultats de cette étude expérimentale, l'étendue spatiale des processus physiques associés au trafic a été déterminée, et illustré sur la Figure 34.

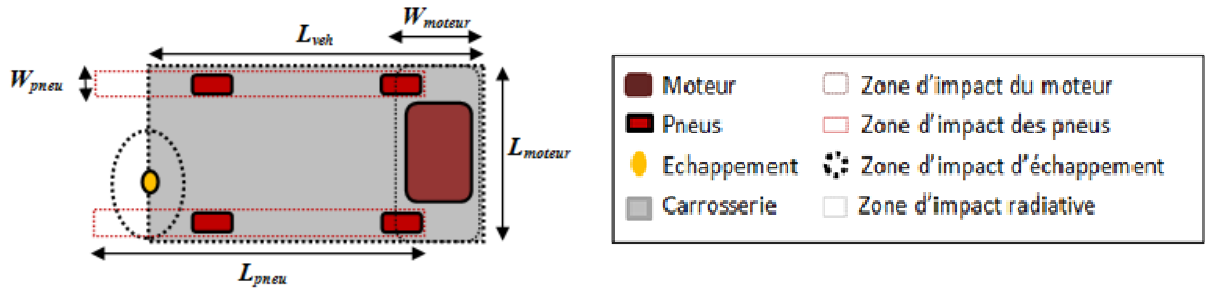


Figure 34. Zones d'impact des processus physiques associés au trafic

Les images thermiques issues de cette étude expérimentale nous ont conduit à délimiter les zones d'impact du système d'échappement et des frottements pneumatiques. Leurs dimensions sont estimées en supposant que d'une part, la longueur et la largeur de la zone d'impact des frottements pneumatiques, notés respectivement L_{pneu} et W_{pneu} , sont estimés par les équations suivantes :

$$L_{pneu} = L_{veh} \quad 2.39$$

$$W_{pneu} = 0.12 W_{veh} \quad 2.40$$

D'autre part, le rayon de la zone d'impact du système d'échappement est estimé par l'équation suivante :

$$R_{ex} = 0.40 W_{veh} \quad 2.41$$

Concernant la zone d'impact du moteur, on s'est appuyé sur l'étude faite par Fujimoto et *al.* (Fujimoto et *al.*, 2008), délimitant différentes zones de température pour la partie inférieure

du véhicule. La longueur et la largeur de la zone d'impact du moteur sont estimées par le biais des équations suivantes :

$$L_{\text{moteur}} = 0.20. L_{\text{veh}} \quad 2.42$$

$$W_{\text{moteur}} = W_{\text{veh}} \quad 2.43$$

On suppose que le flux radiatif émis par la partie inférieure du véhicule s'étend sur toute sa dimension, à l'exception des zones impactées par les autres processus (moteur, échappement, pneumatiques). Ainsi, les dimensions de l'étendue spatiale des différents processus physiques associés au trafic sont résumées dans le Tableau 15

Tableau 15. Étendue spatiale et pourcentage de chaque processus physique associés au trafic en fonction de la dimension totale du véhicule

Processus	Etendue spatiale (m ²)	Pourcentage de chaque étendue spatiale par rapport à la surface totale du véhicule
flux du moteur	$S_{\text{moteur}} = 0.2 L_{\text{veh}} W_{\text{veh}}$	$Z_{\text{moteur}} = \frac{S_{\text{moteur}}}{[L_{\text{veh}} W_{\text{veh}}]}$
flux de l'échappement	$S_{\text{ex}} = 2. \pi (0.4 L_{\text{veh}})^2$	$Z_{\text{ex}} = \frac{S_{\text{ex}}}{[L_{\text{veh}} W_{\text{veh}}]}$
frottement pneumatique	$S_{\text{pneu}} = 0.12 L_{\text{veh}} W_{\text{veh}}$	$Z_{\text{pneu}} = \frac{S_{\text{pneu}}}{[L_{\text{veh}} W_{\text{veh}}]}$
flux radiatif	$S_{\text{radiatif}} = [L_{\text{veh}} W_{\text{veh}}] - [Z_{\text{moteur}} + Z_{\text{ex}} + Z_{\text{pneu}}]$	$Z_{\text{radiatif}} = 1 - \frac{[Z_{\text{moteur}} + Z_{\text{ex}} + Z_{\text{pneu}}]}{[L_{\text{veh}} W_{\text{veh}}]}$

La délimitation des étendues spatiales relatives à chacun de ces processus physiques du trafic serviront à sa paramétrisation et à l'évaluation de leurs apports thermiques. Une pondération de la densité de flux générée par chacun de ces processus sera effectuée en se basant sur le pourcentage de chaque étendue spatiale.

❖ Quantification de l'effet de masque et du vent induit par le passage d'un véhicule

Les mesures issues du pyrgéomètre sont présentées par la Figure 35. Elles représentent la variation de la densité de flux radiatif reçue par la surface de la route suite au passage d'un véhicule à différentes vitesses de circulation. Le trafic bloque le flux radiatif reçu par la surface de la route. Cet effet de masque est d'autant plus important que la vitesse de circulation est faible. Cette importance se manifeste de deux manières. Premièrement, sa durée dépasse 6 s pour une vitesse de circulation de 10 km/h et est d'une seconde pour des vitesses de circulation au-delà de 50 km/h. Ensuite, l'effet de masque se manifeste par

l'intensité de la modification de la densité de flux radiatif reçu par la surface de la route. En effet, le passage d'un véhicule à une vitesse de 10 km/h engendre une perte en rayonnement d'environ 60 W/m². Cette perte est moindre pour des vitesses de circulation plus élevées. Ainsi, les résultats de cette étude expérimentale confirment l'hypothèse qu'un trafic dense est susceptible de modifier significativement le bilan radiatif de la surface de la route.

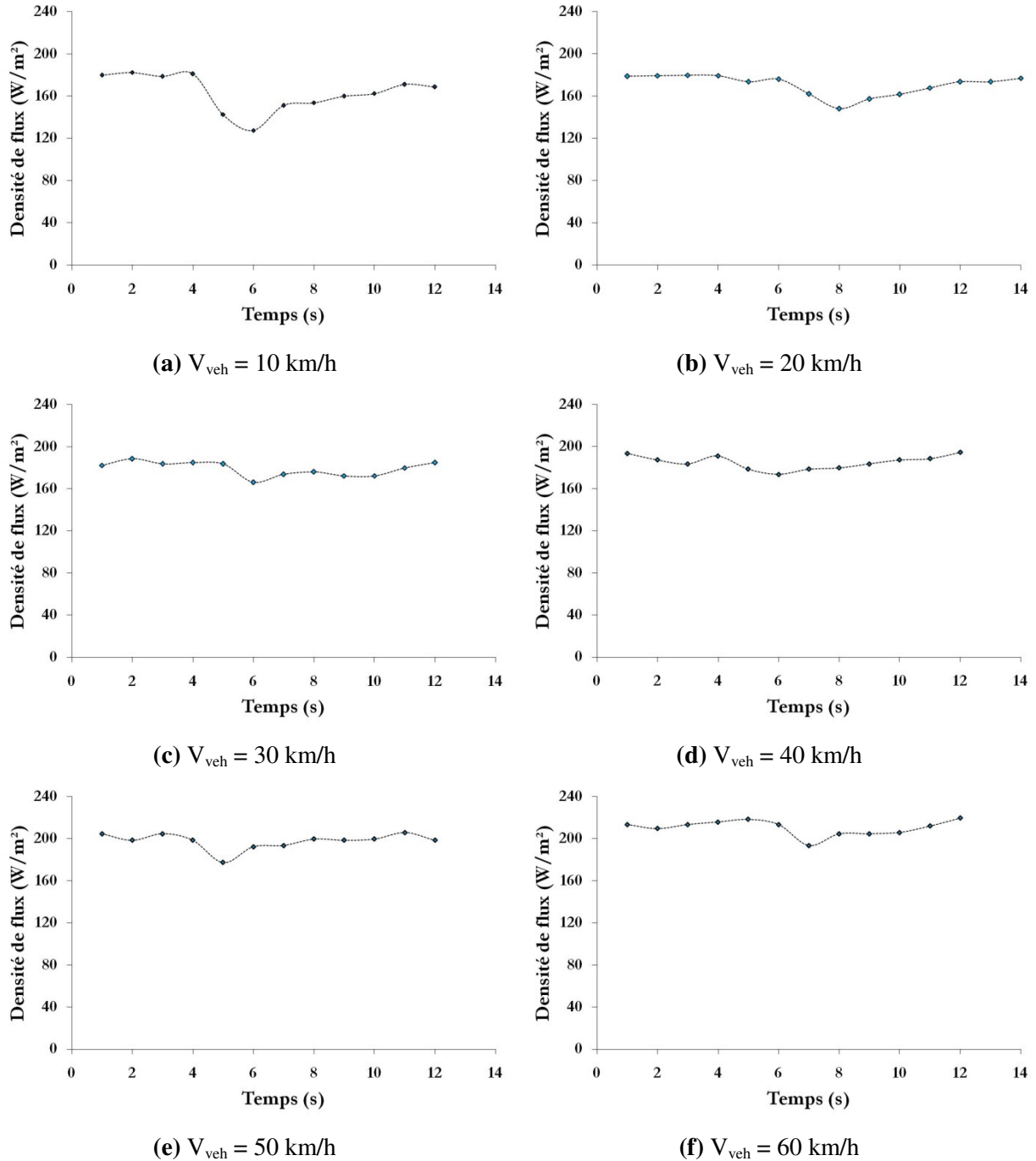


Figure 35. Modification de la densité de flux radiatif reçu par la surface de la route avec le passage d'un véhicule pour une vitesse de circulation de (a) 10 km/h, (b) 20 km/h, (c) 30 km/h, (d) 40 km/h, (e) 50 km/h et (f) 60 km/h

Les mesures issues de l'anémomètre sont illustrées par la Figure 36. Elles représentent la variation de la vitesse de vent suite au passage d'un véhicule à l'aplomb de celui-ci pour deux vitesses de circulation (30 km/h et 40 km/h). Les résultats de cette figure montrent que le passage du véhicule sur la route augmente la vitesse du vent. Cette augmentation est d'autant plus importante que la vitesse de circulation est élevée.

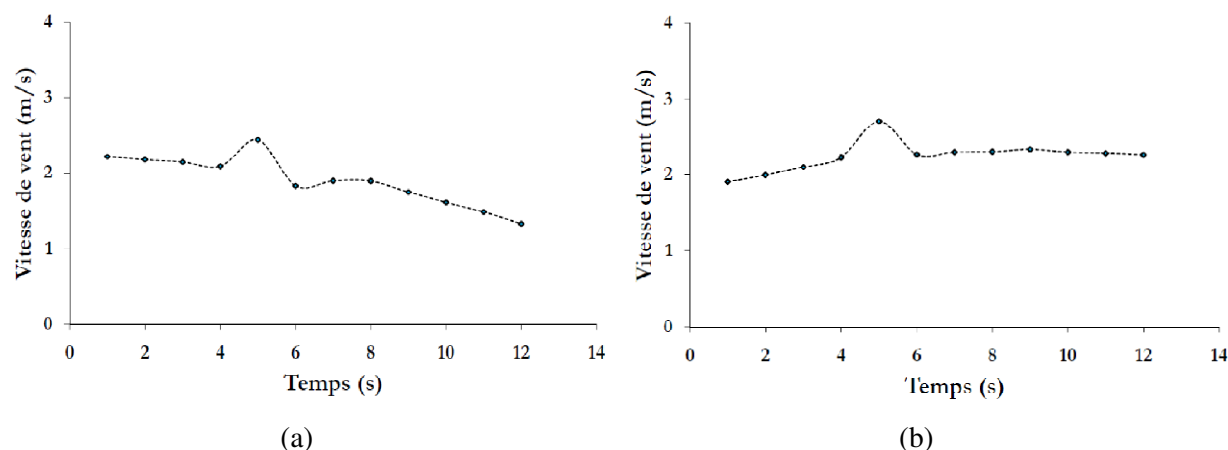


Figure 36. Modification de la vitesse du vent suite au passage d'un véhicule, (a) pour une vitesse de circulation de 30 km/h et (b) pour une vitesse de 40 km/h

L'anémomètre à fil chaud adopté pour cette expérimentation ne permet pas d'évaluer ce processus d'impact, ni d'étudier la perturbation transversale de la vitesse du vent, comme celle faite par Fujimoto et *al.* (Fujimoto et *al.*, 2012). Sachant que la résistance aérodynamique à l'interface chaussée-atmosphère est fonction de la vitesse du vent et que cette dernière est elle-même fonction de la vitesse de circulation du véhicule, ceci permet de déduire que le passage d'un véhicule sur la route est susceptible d'influencer la résistance aérodynamique de l'air, ce qui rejoint les résultats trouvés par Denby et Sandvor (Denby et Sundvor, 2012).

3 Conclusion

L'étude bibliographique ainsi que les résultats des expériences entreprises montrent que le trafic a un effet significatif sur la **TSR**. Les apports énergétiques du trafic automobile dépendent de plusieurs paramètres, et sont beaucoup plus importants en milieu urbain qu'en périurbain et rural. Ceci est dû, d'une part, à la densité du trafic, et d'autre part à la spécificité des conditions de circulation en milieu urbain. La vitesse de circulation y est limitée, ce qui accroît la durée pendant laquelle la surface de la route est soumise au trafic, augmentant par conséquent la durée de ce flux anthropique et modifiant le bilan énergétique de surface bien

plus que la nuit. La présence des feux de circulation et les embouteillages accentuent cette durée et accroissent cette contribution énergétique.

Les résultats de l'étude expérimentale, réalisée à la rue Charles III à Nancy (France), montrent que les apports thermiques du trafic ont une étendue spatiale. Ils engendrent une augmentation de la *TSR* de l'ordre de 2 à 4°C. Les apports thermiques du trafic sont très variables pendant la journée, où la densité du trafic est importante, et faibles à nuls la nuit. En outre, pendant la journée, ces apports thermiques sont intimement liés à la densité du trafic.

Les résultats des mesures embarquées, pour la quantification de l'effet de masque et du vent induit par le passage d'un véhicule, montrent que le flux de chaleur dû aux frottements pneumatiques, ainsi que le flux de chaleur dégagé par le système d'échappement et le flux radiatif émis par la partie inférieure du véhicule modifient la *TSR* de l'ordre de 1 à 2°C. L'effet de masque généré par le trafic modifie le bilan radiatif de surface de par sa durée et la vitesse de circulation. Le passage des véhicules sur la route perturbe la vitesse de vent et donc la résistance aérodynamique de l'air.

Différents processus physiques d'impacts du trafic ont été identifiés et évalués. Des équations physiques sont proposées pour décrire chacun d'eux, ainsi que des zones d'impacts et des proportions de contributions ont été déterminées.

L'apport énergétique global généré par le trafic est le résultat des effets cumulés de ces différents processus physiques. Des compléments sont alors nécessaires aux approches définies dans la bibliographie décrivant la manière avec laquelle le trafic était pris en compte dans la modélisation de la *TSR*. L'addition d'une source d'énergie constante au bilan énergétique ne suffit pas à la représentation des observations. De même, réduire ces apports du trafic à un ou deux processus représentatifs du trafic est insuffisant pour la prise en compte de ce flux anthropique. Cette problématique ouvre la porte à des perspectives numériques consistant à prendre en compte d'une manière réaliste et aussi exhaustive que possible les différents processus physiques associés au trafic afin d'évaluer avec précision les apports énergétiques et d'en apprécier leur influence sur la *TSR*.

CHAPITRE 3

Modélisation numérique des impacts thermiques du trafic

Chapitre 3 : Modélisation numérique des impacts thermiques du trafic

La *TSR* est influencée à la fois par les paramètres météorologiques qui contrôlent ses variations géographiques, qui imposent leurs effets aux paramètres météorologiques, ainsi que la morphologie de la ville, qui affecte les paramètres météorologiques. Le microclimat urbain influence le bilan énergétique par sa surface d'échange, par le facteur « vue du ciel », sa rugosité, le comportement thermique de ses matériaux constitutifs, ou aussi, par la réflexion des rayonnements solaire et terrestre (piégeage radiatif). Néanmoins, d'autres processus physiques d'origine anthropique influencent aussi la *TSR*, tel que le trafic. L'étude bibliographique et les résultats des expériences entreprises dans le cadre de cette étude ont montré que le trafic modifie la *TSR* selon différents processus (Prusa et *al.*, 2002) : augmentation de la turbulence de l'air due au déplacement des véhicules, blocage intermittent des rayonnements solaires incidents, émission des rayonnements de grande longueur d'onde par la partie inférieure des véhicules, flux de chaleur sensible et d'humidité dégagés par le moteur et par le système d'échappement, et flux de chaleur dû aux frottements pneumatiques. L'effet cumulatif de ces différents processus physiques affecte significativement la *TSR* de 2 à 4°C. De plus, cet effet varie en fonction des paramètres du trafic (densité, vitesse de circulation, fluidité, etc.).

Dans l'étude bibliographique, on a montré que les apports thermiques du trafic ont été intégrés dans la modélisation du bilan énergétique de la surface de la route dans une configuration urbaine. Cette paramétrisation simple reposait soit sur l'addition d'une source de chaleur externe représentative de ces impacts thermiques au bilan énergétique de surface, soit par la prise en considération de certains processus physiques identifiés comme significatifs. Cette modélisation de l'état de surface de la route reste améliorable en raison de l'absence d'une évaluation détaillée des différents processus physiques associés au trafic ainsi que par la prise en compte de l'influence de ces paramètres sur ces apports thermiques.

Ainsi, l'amélioration de la description, de l'évaluation et de l'intégration de ces différents processus physiques dans un modèle numérique de prévision, dans une spécificité de configuration urbaine, sont susceptibles d'améliorer la modélisation de l'état de surface de la route. Notre choix de modèle s'est porté sur Town Energy Balance (TEB). Les processus physiques de la ville utilisés dans ce modèle ont été décrits d'une manière détaillée et

complète. Le trafic était déjà intégré dans le cadre de l'étude du confort urbain pour étudier les impacts des apports thermiques d'origine anthropique sur ce confort et de simuler le bilan thermique en ville. Ce flux thermique associé au trafic était considéré comme une constante additionnée au flux turbulent du canyon urbain. Cette approche a permis d'améliorer la modélisation du bilan énergétique en ville et de mieux évaluer la consommation en énergie pour la climatisation dans des conditions estivale (Pigeon et *al.*, 2007 ; Colombert, 2008). Cependant, les apports thermiques du trafic sont variables en fonction de l'heure dans la journée et en fonction des paramètres qui lui sont associés. De plus, ce flux généré est le résultat de l'effet cumulatif de ces différents processus physiques. Dès lors, l'objectif de ce chapitre consistera à améliorer la prise en compte du trafic dans le modèle TEB par la modification du bilan énergétique de surface de la route.

La première partie de ce chapitre décrira de manière non exhaustive le modèle TEB. Dans un premier temps, nous présenterons ce modèle, ses points d'intérêts, ainsi que les différentes améliorations dont il a bénéficié. Par la suite, nous décrirons le concept du bilan énergétique de surface de la route qui y est développé. Enfin, nous décrirons la configuration initiale avec laquelle le trafic y était intégré.

La deuxième partie de ce chapitre portera sur la modification de la paramétrisation du trafic dans le modèle TEB. Deux approches seront présentées et adaptées pour mieux l'intégrer. Une première approche consiste à prendre en compte la variation en fonction du temps des apports thermiques globaux générés par le trafic, nommée configuration globale. Une seconde approche consiste à intégrer les différents processus physiques associés au trafic ainsi que la variation de leurs impacts thermiques en fonction des paramètres du trafic (densité, vitesse de circulation, fluidité), nommée configuration détaillée.

La dernière partie de ce chapitre portera sur une analyse comparée des résultats de ces deux approches d'intégration du trafic. D'abord, on comparera les résultats de la **TSR** issus de la modélisation avec TEB selon ces approches avec des mesures de terrain. Par la suite, on analysera la sensibilité des ces modifications, en particulier sur la température d'air. Les analyses seront effectuées aussi par rapport à des mesures en ville. Enfin, une étude de sensibilité du modèle TEB aux différents processus physiques du trafic sera présentée. Les processus les plus importants et responsables de l'amélioration de la **TSR** seront aussi identifiés et discutés.

Le modèle TEB a été initialement développé pour des applications en météorologie et prévision de temps à des échelles spatiales kilométriques. Il ne cesse d'être amélioré afin d'être appliqué à plus haute résolution en prenant en compte de façon plus réaliste certains aspects du climat urbain et du fonctionnement des bâtiments. En particulier, ces améliorations ont pour objectif de mettre au point un outil de modélisation permettant d'évaluer efficacement des choix de politiques urbaines ou des stratégies d'adaptation des villes face aux effets du climat urbain lui-même ou du changement climatique.

Comme il est basé sur la paramétrisation de processus physiques, TEB peut être utilisé pour n'importe quelle ville. Il a ainsi été évalué pour des villes sous différents climats tels que : Vancouver et Mexico (Masson et *al.*, 2002), Marseille (Lemonsu et *al.*, 2004 ; Roberts et Oke, 2006), Łódź (Offerle et *al.*, 2005), Ouagadougou (Offerle et *al.*, 2005), Toulouse (Pigeon et *al.*, 2008) et Montréal (Lemonsu et *al.*, 2010). Ces études ont montré que TEB produisait avec précision le bilan énergétique de la surface urbaine, la température de l'air dans les rues, la consommation d'énergie de la climatisation et les températures de surface des différentes parois constitutives du canyon urbain, en mode forcé ou bien en mode couplé avec un modèle atmosphérique.

Dans l'élaboration de méthodes pour étudier les impacts et les stratégies d'adaptation des villes au changement climatique, plusieurs processus physiques ont été améliorés et/ou introduits dans ce modèle. Par exemple, une meilleure prise en compte de la thermique des bâtiments (bilan interne dans le bâtiment, fenêtres, chauffage, climatisation, ventilation, volets, etc.) permet maintenant de calculer les consommations d'énergie dépendant des variations météorologiques et climatiques (Bueno et *al.*, 2012). Des jardins et toits végétalisés (Lemonsu et *al.*, 2012 ; De Munck et *al.*, 2013) y ont également été introduits afin d'étudier l'apport de la végétalisation comme outil pour l'adaptation des villes au réchauffement. Ces développements récents placent TEB au tout premier plan mondial des modèles urbains pour les études d'impact.

1.2 Concept du bilan énergétique de surface de la route

La géométrie urbaine et l'imperméabilisation des surfaces par des matériaux artificiels, aux propriétés physiques différentes des sols naturels, entraînent d'importantes modifications des flux énergétiques de surface par comparaison au milieu rural. Le stockage de la chaleur devient le facteur prépondérant du bilan d'énergie en surface. Celui de chaleur sensible reste

élevé de par l'importance des surfaces de conduction des matériaux urbains et celui de chaleur latente est réduit en raison de la couverture végétale très faible, notamment en hiver. Le bilan énergétique de la surface de la route est formulé d'une façon similaire à celui explicité par Oke (Oke, 1988). Il est traduit par l'équation suivante :

$$R_n = Q_{LE} + Q_H + \Delta Q_s \quad 3.1$$

R_n (W/m²) est la densité de rayonnement net résultant du bilan radiatif dans le visible et l'infrarouge. Elle dépend des caractéristiques radiatives, de l'albédo et de l'émissivité des surfaces. Q_{LE} et Q_H , (W/m²) sont respectivement les densités de flux de chaleur latente et sensible, et ΔQ_s (W/m²) le terme de stockage de chaleur dans le sol.

Dans le modèle TEB, la route est constituée par plusieurs couches, et l'évolution de sa température est calculée avec l'équation 4.2.

$$C_1 \frac{\partial T_{SR1}}{\partial t} = \frac{1}{d_1} (R_n - Q_H - Q_{LE} - \Delta Q_{S1,2}) \quad 3.2$$

Cette équation permet de calculer l'évolution de la température de surface, prise au centre de la première couche considérée comme étant suffisamment mince, dont l'indice 1 désigne le numéro de la couche. C_1 (J/m³/K) est la capacité calorifique volumique de cette première couche, d_1 (m) son épaisseur et $\Delta Q_{S1,2}$ (W/m²) la densité de flux de chaleur par conduction entre les deux premières couches de surface.

L'évolution de la température dans les autres couches inférieures est exprimée par le biais de l'équation de conduction de la chaleur, qui s'écrit alors :

$$C_k \frac{\partial T_{SRk}}{\partial t} = \frac{1}{d_k} (\Delta Q_{S k-1,k} - \Delta Q_{S k,k+1}) \quad 3.3$$

k désigne l'indice de la couche, la numération débute de la surface pour aller vers l'intérieur. C_k (J/m³/K) représente la capacité calorifique volumique de la k^{ième} couche et d_k (m) son épaisseur. $\Delta Q_{S k,k+1}$ (W/m²) est la densité de flux de chaleur par conduction entre les couches k et $k+1$ et se calcule avec les équations suivantes :

$$\Delta Q_{S\ k,k+1} = \bar{\lambda}_{k,k+1} \frac{T_{route_k} - T_{route_k+1}}{\frac{1}{2}(d_k - d_{k+1})} \quad 3.4$$

$$\bar{\lambda}_{S\ k,k+1} = \frac{d_k - d_{k+1}}{\left(\frac{d_k}{\lambda_k}\right) + \left(\frac{d_{k+1}}{\lambda_{k+1}}\right)} \quad 3.5$$

T_{route_k} (K) représente la température de la $k^{ième}$ couche de la surface de la route, λ_k (W/m/K) sa conductivité thermique et $\bar{\lambda}_{k,k+1}$ (W/m/K) la conductivité thermique moyenne entre les couches k et $k+1$.

Pour les conditions aux limites sur la route, le flux est supposé nul en dessous de la dernière couche de matériaux représentée. Ainsi, la densité du flux par conduction entre les deux dernières couches s'écrit :

$$\Delta Q_{S\ N,N+1} = 0 \quad 3.6$$

La discrétisation maximale des couches de sol dans le modèle TEB est limitée à 9 couches. Dans notre cas d'étude, seules 5 couches représentatives aussi bien de la structure de la route que du sol ont été considérées.

Le rayonnement net à la surface de la route R_n dans le modèle TEB est décrit par les équations suivantes.

$$R_n = R_{nl} + R_{ns} \quad 3.7$$

$$R_{nl} = R_{ld} + R_{lu} \quad 3.8$$

$$R_{ns} = R_{sd} + R_{su} \quad 3.9$$

R_{nl} et R_{ns} sont respectivement les rayonnements nets de grandes et de courtes longueurs d'onde reçus par la surface de la route. R_{ld} est le rayonnement de grandes longueurs d'onde descendant, et R_{lu} le rayonnement de grandes longueurs d'onde ascendant. R_{sd} représente le rayonnement de courtes longueurs d'onde descendant et R_{su} celui de courtes longueurs d'onde ascendant.

Le calcul du bilan radiatif à la surface de la route à l'intérieur du canyon urbain prend en considération les interactions entre ses différentes composantes (murs, toit, jardin, hydrométéore au sol). Le rayonnement net s'écrit alors sous la forme suivante :

$$\begin{aligned}
R_n = R_{g_{abs}} &+ [PLW_{S_{toR}} R_{LW}] + [PLW_{R_{toR}} TSR^4(t + dt)] \\
&+ [PLW_{M_{toR}} T_{Murs}^4(t + dt)] + [PLW_{N_{toR}} T_{Neige}^4(t + dt)] \\
&+ [PLW_{J_{toR}} T_{Jardin}^4(t + dt)]
\end{aligned} \tag{3.10}$$

$R_{g_{abs}}$ est le rayonnement global absorbé par la surface de la route, R_{LW} le rayonnement de grandes longueurs d'onde émis par la surface de la route. TSR désigne la température à la surface de la route, T_{Murs} celle des parois des murs, T_{Neige} la température à la surface de la couche de neige et T_{Jardin} la température à la surface de couvert végétal (pelouses). $PLW_{S_{toR}}$ (W/m²/K⁴) est le coefficient d'interaction radiative soleil-route, $PLW_{R_{toR}}$ (W/m²/K⁴) celui entre route-route, $PLW_{M_{toR}}$ (W/m²/K⁴) celui entre les murs et la route, $PLW_{N_{toR}}$ (W/m²/K⁴) pour la neige et la route et $PLW_{J_{toR}}$ (W/m²/K⁴) celui entre jardin et route. Ces coefficients d'interaction évaluent le taux des échanges radiatifs entre les différentes composantes du canyon urbain. Le modèle TEB suppose que la réflexion des rayonnements au sein du canyon urbain est infinie, expliquant ainsi le phénomène de piégeage radiatif. Ces coefficients sont définis, dans le modèle TEB, par les équations suivantes :

$$PLW_{S_{toR}} = \sigma \epsilon_{route} SVF_{route} + \epsilon_{route} (1 - \epsilon_{murs}) SVF_{murs} (1 - SVF_{route}) \tag{3.11}$$

$$PLW_{R_{toR}} = \sigma \epsilon_{route} [-1 + \epsilon_{route} (1 - \epsilon_{murs}) (1 - SVF_{route}) SVF_{murs}] \tag{3.12}$$

$$PLW_{M_{toR}} = \sigma \epsilon_{murs} \epsilon_{route} (1 - SVF_{route}) [1 + (1 - \epsilon_{murs}) (1 - 2SVF_{murs})] \tag{3.13}$$

$$PLW_{N_{toR}} = \sigma \epsilon_{route} (1 - \epsilon_{murs}) \epsilon_{neige} (1 - SVF_{route}) SVF_{murs} \tag{3.14}$$

$$PLW_{J_{toR}} = \sigma \epsilon_{route} (1 - \epsilon_{murs}) \epsilon_{jardin} (1 - SVF_{route}) SVF_{murs} \tag{3.15}$$

σ est la constante de Stefan-Boltzmann (5.67 x 10⁻⁸ W/m²/K⁴), ϵ_{route} l'émissivité de la route (0.94, sans unité), ϵ_{murs} celle des surfaces des murs (0.90, sans unité), ϵ_{neige} l'émissivité de neige (1, sans unité), ϵ_{jardin} l'émissivité du couvert végétal (0.98, sans unité). SVF_{route} et

SVF_{murs} représentent respectivement les facteurs de vue du ciel pour la route et les murs. Ils estiment la fraction du ciel vue par la surface considérée. Ces coefficients se calculent en fonction de la hauteur des bâtiments $h_{bât}$ (m) et de la largeur du canyon urbain W_{canyon} (m).

$$SVF_{route} = \left(\sqrt{\left(\frac{h_{bât}}{W_{canyon}} \right)^2 + 1} - \frac{h_{bât}}{W_{canyon}} \right) \quad 3.16$$

$$SVF_{murs} = \frac{1}{2} \frac{\frac{h_{bât}}{W_{canyon}} + 1 - \sqrt{\left(\frac{h_{bât}}{W_{canyon}} \right)^2 + 1}}{\frac{h_{bât}}{W_{canyon}}} \quad 3.17$$

La densité de flux sensible Q_H (W/m²) dans le modèle TEB est exprimée par l'équation suivante :

$$Q_H = \frac{\rho_a C_p}{R_{route}} [TSR(t + dt) - T_{canyon}] \quad 3.18$$

C_p désigne la capacité thermique massique (J/kg/K), ρ_a la masse volumique de l'air (kg/m³). T_{canyon} (K) est la température de la couche limite inférieure du canyon urbain (à 2 m de la surface de la route), et R_{route} la résistance aérodynamique entre la route et le canyon dans le cas d'une route sèche (s/m).

Le flux de chaleur latente Q_E (W/m²) dans le modèle TEB s'écrit sous la forme suivante:

$$Q_{LE} = \frac{\rho_a L_v}{R_{route_humide}} [Q_{route_sat}(t + dt) - Q_{canyon}] \quad 3.19$$

L_v représente la chaleur latente d'évaporation de l'eau liquide (J/kg), Q_{route_sat} (kg/kg) l'humidité spécifique à saturation à la surface de la route, Q_{canyon} (kg/kg) l'humidité spécifique de l'air à la couche limite inférieure du canyon urbain (à 2 m au dessus de la surface de la route) et R_{route_humide} la résistance aérodynamique d'une route humide (s/m).

Dans cette configuration, le modèle TEB n'intègre pas les apports énergétiques d'origine anthropique dans le bilan énergétique de surface. Cependant, ils interviennent dans le calcul des flux turbulents du canyon urbain.

1.3 Paramétrisation initiale du flux anthropique lié au trafic dans TEB

Le trafic était initialement introduit d'une façon marginale dans la modélisation des paramètres de surface. Il était considéré comme une densité de flux constante de chaleur sensible et latente, représenté respectivement sur la Figure 38 par Q_{H_trafic} et Q_{E_trafic} . Ces flux s'additionnent aux flux turbulents du canyon urbain. Ils sont exprimés par les équations suivantes :

$$Q_{H_top} = Q_H + 2 \frac{h_{bât}}{W_{canyon}} Q_{H_murs} + \frac{1}{f_{route}} Q_{H_trafic} \quad 3.20$$

$$Q_{E_top} = Q_{LE} + \frac{1}{f_{route}} Q_{E_trafic} \quad 3.21$$

Q_{H_top} et Q_{E_top} (W/m²) représentent respectivement la densité du flux de chaleur sensible et latente, à 2 m de hauteur au dessus de la surface de la route. Q_{H_murs} est la densité de flux de chaleur sensible des murs (W/m²). $1/f_{route}$ représente la fraction de la route par rapport à la largeur du canyon urbain (allant de 0.5 à 0.8).

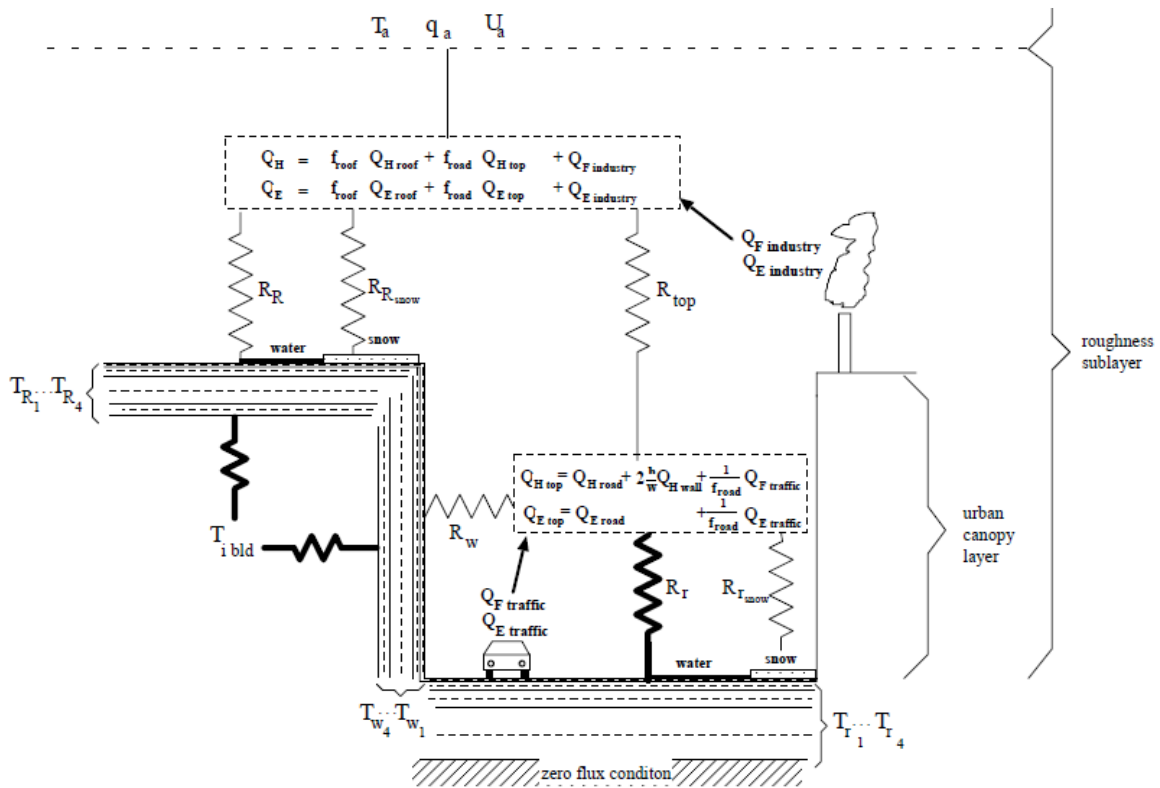


Figure 38. Résistances aérodynamiques, flux de chaleurs sensibles et latentes et paramètres climatiques intervenant dans le schéma de TEB (Masson et al., 2002).

L'évaluation de la densité de flux de chaleur sensible et latente dus au trafic dans le modèle TEB s'appuie sur la méthode développée par Sailor et Lu (Sailor et Lu, 2004). Ils proposent une évaluation journalière de la densité de flux de chaleur lié au trafic par le biais de l'équation suivante :

$$Q_{trafic(jour)}(ville) = \frac{DVD}{Surface\ de\ la\ ville} E_{veh} \quad 3.22$$

Q_{trafic} (J/jour/km²) est l'énergie rejetée par le trafic automobile par jour, par rapport à la surface totale de la ville. DVD (*daily vehicle distance*) est le nombre de kilomètre parcouru en moyenne par jour par tous les véhicules du parc automobile de la ville (km/jour). La surface de la ville s'exprime en km². E_{veh} est l'énergie rejetée par véhicule par kilomètre parcouru (exprimé en J/km par Colombert (Colombert, 2008)), et est donnée par :

$$E_{veh} = \frac{NHC \rho_{fuel}}{FE} \quad 3.23$$

NHC représente la chaleur nette de combustion de carburant (J/kg) et ρ_{fuel} est la masse volumique du combustible (kg/l). FE est la consommation moyenne de carburant (l/km).

En France, deux types de carburant sont majoritairement utilisés, l'essence et le diesel. La densité de l'essence est de 0,755 kg/l et celle du diesel est de 0,845 kg/l (Guibet, 1998). D'après Guibet (Guibet, 1998) le NHC pour l'essence est de 42700 J/kg, et de 42600 J/kg pour le diesel.

Initialement, la densité de flux de chaleur latente dû au trafic était supposé nul ($Q_{E_trafic} = 0$ W/m²). La densité de flux d'énergie totale dégagé par le trafic Q_{veh} était entièrement attribuée au flux de chaleur sensible Q_{H_trafic} . De plus, ces densités de flux de chaleur sensible et latente dues au trafic étaient supposées n'intervenir qu'entre 6h et 18h, et ne s'appliquer que sur les surfaces urbaines minérales modélisées par TEB.

Afin d'évaluer le flux de chaleur dégagé par le trafic à Nancy, on s'est basé sur les hypothèses définies par Colombert (Colombert, 2008) dans son étude portant sur la sensibilité du bilan d'énergie en ville (Paris) aux flux de chaleur générés par le trafic. Elle a supposé que la consommation moyenne de combustible (FE) par véhicule est de l'ordre de 8,5 km/l, ce chiffre intègre entre autres la surconsommation due à la climatisation (3,1 l/100km pour les

véhicules essence en cycle urbain et 3,2 l/100km pour le diesel). Le pouvoir calorifique moyen *NHC* de 46000 J/kg a été choisi et une masse volumique moyenne de carburant ρ_{fuel} de 0,75 kg/l. Ainsi, E_{veh} est de l'ordre de 3832.7 J/m. Cette valeur est en cohérence avec les résultats trouvés par Sailor et Lu (Sailor et Lu, 2004) (3975 J/m), et ceux trouvés par Pigeon (Pigeon et *al.*, 2007) (3902 J/m).

La superficie de la ville de Nancy est égale à 15.1 km². Les données relatives à la *DVD* sont issues de la base de données du Pôle de Déplacement de la Communauté Urbaine de Grand Nancy, et est de l'ordre de 5.82 10⁶ km/jour. Ainsi, la densité de flux de chaleur sensible due au trafic, dans le cas de Nancy est évaluée par l'équation suivante :

$$Q_{H_traffic} = 1.15 \cdot 10^{-8} \frac{DVD}{Surface\ de\ Nancy} \frac{NHC\ \rho_{fuel}}{FE} \quad 3.24$$

La constante 1.15 10⁻⁸ est issue de la conversion en système international de paramètres constitutifs de cette équation, $Q_{H_traffic}$ est égale, pour le cas de Nancy, à 17 W/m².

Si les apports thermiques du trafic, ici constants, s'additionnent au flux turbulent du canyon urbain, l'étude bibliographique ainsi que les expériences entreprises ont montré que la contribution énergétique du trafic varie en fonction temps. Cette variation est intimement liée à la variation temporelle de la densité du trafic. En outre, il a été montré que le trafic modifie le bilan énergétique de surface de la route selon différents processus physiques (Prusa et *al.*, 2002). Ainsi, réduire tous ses processus en une constante additionnée au flux du canyon urbain, ne représente pas suffisamment les apports anthropiques du trafic au bilan énergétique de surface de la route. Afin d'améliorer la description de cette densité de flux dans TEB, une nouvelle paramétrisation est considérée pour établir la contribution énergétique du trafic dans l'élaboration du bilan énergétique de surface et améliorer ainsi la modélisation de la *TSR*.

2 Proposition d'amélioration de la prise en compte du flux anthropique associé au trafic dans TEB

L'amélioration de la prise en compte du trafic dans TEB s'est effectuée sur deux étapes. Dans une première approche (A1), le temps est intégré dans l'évaluation des apports énergétiques associés au trafic. Cette approche est nommée évaluation globale des apports thermiques anthropiques associés au trafic. Une seconde approche (A2) consiste à intégrer différents

processus physiques associés au trafic dans la modélisation du bilan énergétique de surface, et nommée évaluation détaillée des apports thermiques anthropique liés au trafic.

2.1 Évaluation globale des apports thermiques anthropiques associés au trafic

Cette approche A1 se base sur le même concept que la configuration initiale (CI) du trafic dans TEB. Les apports thermiques du trafic s'additionnent aux flux turbulents du canyon urbain et interagissent avec le bilan énergétique de surface de la route par l'intermédiaire des coefficients d'interactions $PLW_{x_to_y}$, précédemment définis. L'amélioration, par rapport à la configuration initiale, repose sur l'introduction du temps dans l'évaluation des apports thermiques du trafic, par l'intermédiaire de sa densité. Elle varie en fonction du temps, des caractéristiques du trafic (volume, vitesse de circulation), et en fonction des conditions de circulations (fluidité, configuration du flux de circulation, etc.). Ainsi, les apports thermiques globaux associés au trafic ne sont plus constants mais liées directement à la densité du trafic.

On s'est alors basé sur les consommations énergétiques des véhicules. Cette approche a été utilisée par Klysik (Klysik, 1996) pour son étude sur la distribution spatiale et saisonnière des émissions de chaleur anthropique à Lodz (Pologne) et par Ichinose et *al.* (Ichinose et *al.*, 1999) pour leur étude sur l'impact de la chaleur anthropique sur le climat urbain de Tokyo (Japon). D'autres travaux, dont ceux de Sailor et Lu (Sailor et Lu, 2004) qui ont développé une méthode pour la quantification des profils journaliers et saisonniers de la chaleur anthropique en zone urbaine, ceux de Pigeon et *al.* (Pigeon et *al.*, 2007) pour l'évaluation du flux de chaleur d'origine anthropique à Toulouse, et de Colombert (Colombert, 2008) pour étudier la sensibilité du bilan d'énergie en ville aux flux de chaleurs dégagés par le trafic dans des conditions estivales, ont été utilisés.

La méthode développée par Sailor et Lu (Sailor et Lu, 2004) donne une évaluation globale du flux d'énergie rejeté par le véhicule, E_{veh} (J/m) (équation 3.23). En se basant sur cette méthode, Pigeon et *al.* (Pigeon et *al.*, 2007) ont défini une nouvelle formule permettant d'évaluer le profil horaire de la densité de flux de chaleur dégagée par le trafic Q_{trafic} (W/m²). Elle dépend d'une zone d'impact du trafic W_{trafic} (m), de la densité du trafic D_{trafic} (s⁻¹) et de l'énergie rejetée par véhicule par mètre parcouru E_{veh} (J/m). Elle est exprimée par l'équation suivante :

$$Q_{traffic} = \frac{1}{W_{traffic}} D_{traffic} E_{veh} \quad 3.25$$

Bien que dans sa configuration initiale, le modèle TEB suppose que la densité de flux de chaleur latent due au trafic est négligeable et est égal à 0 W/m². Néanmoins, ce modèle le distingue par rapport à la densité de flux de chaleur sensible du trafic. Cependant, $Q_{traffic}$ calculée par l'équation 3.25 correspond à l'ensemble de la densité de flux de chaleur dégagée par le trafic. Pour cela, on s'est basé sur l'approche définie par Pigeon et *al.* (Pigeon et *al.*, 2007) pour évaluer la contribution de chacun de ces densités de flux. En effet, la densité de flux de chaleur latente correspond à 8% de la densité de flux global $Q_{traffic}$ dégagée par le véhicule, et la densité de flux de chaleur sensible à 92% de celui-ci. Ces chiffres ont été justifiés par une approche chimique. Ils ont considéré que les carburants utilisés sont proches de l'octane (C_8H_{18}) et à partir de l'équation de combustion complète ($2C_8H_{18} + 25O_2 \rightarrow 16CO_2 + 18H_2O$), la quantité de vapeur d'eau émise est estimée. Cette quantité est ensuite multipliée par la chaleur latente d'évaporation de l'eau et le rapport avec le pouvoir calorifique du carburant donne 8%. Ainsi, les densités de flux de chaleur sensible et latente du trafic s'écrivent alors respectivement :

$$Q_{H_traffic} = 0.92 \left[\frac{1}{W_{traffic}} D_{traffic} E_{veh} \right] \quad 3.26$$

$$Q_{E_traffic} = 0.08 \left[\frac{1}{W_{traffic}} D_{traffic} E_{veh} \right] \quad 3.27$$

Avec les modifications apportées par cette première approche A1, les flux turbulents de chaleurs sensible et latent du canyon urbain (équations 3.18 et 3.19) deviennent :

$$Q_{H_top} = Q_H + 2 \frac{h_{bât}}{W_{canyon}} Q_{H_murs} + \frac{0.92}{f_{route}} \left[\frac{1}{W_{traffic}} D_{traffic} E_{veh} \right] \quad 3.28$$

$$Q_{E_top} = Q_{LE} + \frac{0.08}{f_{route}} \left[\frac{1}{W_{traffic}} D_{traffic} E_{veh} \right] \quad 3.29$$

2.2 Évaluation détaillée des apports thermiques du trafic automobile

L'étude bibliographique, ainsi que les résultats de l'expérience de mesures embarquées de la *TSR* en milieu urbain, ont montré que les apports thermiques du trafic se limitent au niveau

d'une zone d'impact, précédemment définie par W_{trafic} . Afin de mieux prendre en compte ces apports thermiques du trafic dans la modélisation de la **TSR**, une seconde approche propose d'en incorporer les différents processus, et de prendre en considération sa zone d'impact. Ainsi, la surface de la route est partitionnée en deux mailles. Une zone non circulée est dépourvue de véhicules avec un bilan énergétique de surface qui ne subit aucune modification par rapport à la configuration initiale du modèle TEB. Une seconde zone circulée subit le passage des véhicules et leurs paramètres physiques et thermiques se substituent à ceux de la surface de la route. On aura donc à établir un second bilan énergétique. Une moyenne pondérée entre les deux bilans sera ensuite établie pour déterminer la **TSR**.

La configuration du modèle TEB selon cette approche d'évaluation détaillée des flux anthropiques liés au trafic est décrite sur la Figure 39. Tous les processus physiques du trafic, ainsi que les paramètres de surface influencés par le trafic y sont représentés en couleur rouge.

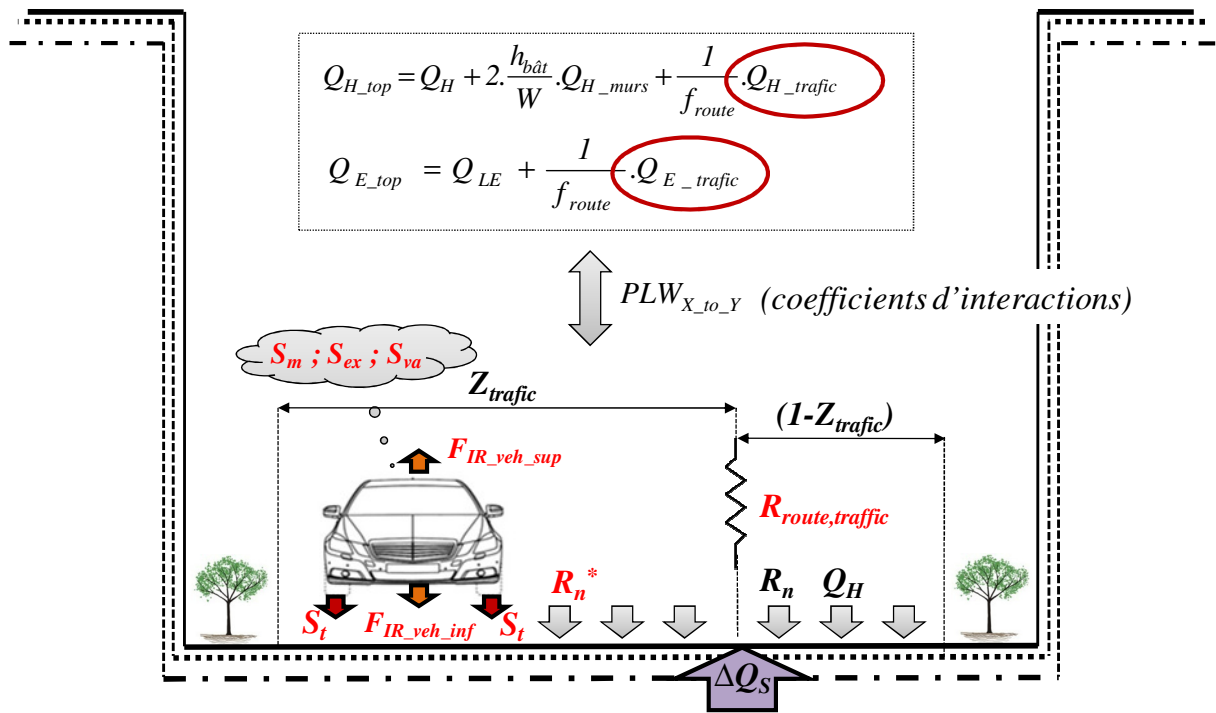


Figure 39. Configuration du modèle TEB avec une paramétrisation détaillée des processus physiques liés au trafic

Cette paramétrisation des flux anthropiques liés au trafic dans le modèle TEB repose sur plusieurs hypothèses. Seule la densité de flux de chaleur liée aux frottements pneumatiques S_t est additionnée au bilan énergétique de surface de la route. Ensuite, les densités de flux de chaleur dégagées par le système d'échappement E_{ex} , par le moteur E_{comb} , ainsi que la densité de flux de chaleur sensible induite par le trafic S_{va} influencent les densités de flux turbulent du

canyon urbain Q_{H_top} et Q_{E_top} . D'autre part, la densité de flux radiatif infrarouge émise par le véhicule s'ajoute au bilan radiatif de la surface de la route. La densité de flux infrarouge émise par la partie inférieure du véhicule $F_{IR_veh_inf}$ s'ajoute à la densité de flux de grande longueur d'onde reçu par la surface de la route R_{ld} , et la densité de flux infrarouge émise par la partie supérieure du véhicule $F_{IR_veh_sup}$ s'ajoute à la densité de flux de grande longueur d'onde de l'atmosphère R_{lu} . L'augmentation de la turbulence d'air générée par le passage des véhicules sur la route engendre une augmentation de la résistance aérodynamique de la route, désignée $R_{route,traffic}$ sur la Figure 39. Enfin, l'effet de masque sur la densité de flux radiatif reçu par la surface de la route se traduit par une modification du rayonnement net reçu par la surface de la route, désignée R_n^* . La perturbation apportée par le trafic aux paramètres de surface est intermittente. Elle dépend de la présence ou non du trafic. Ceci se traduit par l'introduction d'un coefficient d'effet de masque incluant sa présence/absence et sa répartition dans la journée.

Les résultats obtenus lors de l'expérience de mesures embarquées de la **TSR** en milieu urbain ont montré que chaque processus physique du trafic possède une étendue spatiale d'impact (cf. chapitre 2, Tableau 15). Elle dépend des dimensions du véhicule (L_{veh} , W_{veh}). Ainsi, une pondération de flux de chaleur dégagés par chacun de ces processus selon leur étendue spatiale a été également entreprise dans la paramétrisation du trafic dans TEB.

En se basant sur ces différentes hypothèses, l'équation d'évolution de température de la première couche de surface (équation 3.2), assimilée à la **TSR** se transforme comme suit :

$$C_1 \frac{\partial TSR}{\partial t} = \frac{1}{d_1} \left[(1 - Z_{traffic}) [R_n + Q_H + Q_{LE} + \Delta Q_{S\ 1,2}] + Z_{traffic} [R_n^* + Q_H^* + Q_{LE}^* + \Delta Q_{S\ 1,2} + C_{masque} Z_{pneu} S_t] \right] \quad 3.30$$

R_n^* (W/m²) est le rayonnement net à la surface de la route avec trafic. Q_H^* et Q_{LE}^* (W/m²) représentent les densités de flux turbulents respectivement de chaleur sensible et latente de la surface de la route en présence de trafic.

Le passage des véhicules sur la route influence aussi bien le flux radiatif infrarouge R_{nl}^* et les rayonnements solaires incidents R_{ns}^* . Ainsi, le rayonnement net de la surface de la route, sous impact du trafic R_n^* , devient alors :

$$R_n^* = R_{nl}^* + R_{ns}^* \quad 3.31$$

La prise en considération de l'influence du trafic sur la densité de flux radiatif de grandes longueurs d'onde de la surface de la route a été réalisée comme suit :

$$R_{nl}^* = R_{ld}^* + R_{lu}^* \quad 3.32$$

$$R_{ld}^* = (1 - C_{masque}) R_{ld} + C_{masque} R_{veh_inf} \quad 3.33$$

$$R_{lu}^* = (1 - C_{masque}) R_{lu} + C_{masque} R_{veh_sup} \quad 3.34$$

Afin de prendre en considération l'impact du trafic sur les rayonnements solaires incidents, il a été considéré que la présence du trafic sur la route se traduit par une variation intermittente de l'albédo de la route. Ceci est décrit par l'équation suivante :

$$a_{route,traffic} = (1 - C_{masque}) a_{route} + C_{masque} a_{veh} \quad 3.35$$

a_{route} est l'albédo de la route (0.08, sans unité) et $a_{route-traffic}$ l'albédo de la route avec trafic. Dans notre cas d'étude, on néglige l'hétérogénéité des matériels constitutifs de la carrosserie du véhicule, et on suppose une valeur moyenne de l'albédo du véhicule a_{veh} égale à 0.057 (sans unité, moyenne entre l'albédo de l'acier, 0.075, et celui de l'aluminium 0.039), Ainsi, la densité de flux net de rayonnement de courtes longueurs d'onde R_{ns}^* sera calculé en prenant en considération cette nouvelle formule de définition de l'albédo de la route.

L'impact du trafic sur la densité de flux turbulent de chaleur sensible et latente de la surface de la route (Q_H^* et Q_{LE}^*) a été paramétré par la modification de la résistance aérodynamique de la route. Ainsi, ces deux flux s'écrivent sous la forme suivante :

$$Q_H^* = \frac{\rho_a C_p}{R_{route-traffic}} [TSR(t + dt) - T_{canyon}] \quad 3.36$$

$$Q_{LE}^* = \frac{\rho_a L_v}{R_{route-traffic_humide}} [Q_{route_sat}(t + dt) - Q_{canyon}] \quad 3.37$$

$R_{route-traffic}$ et $R_{route-traffic_humide}$ sont les résistances aérodynamiques de la route en présence du trafic respectivement pour une route sèche et humide. R_{route} (s/m) et R_{route_humide} (s/m) représentent la résistance de la route respectivement pour une route sèche et humide. $R_{traffic}$ est la résistance aérodynamique spécifique au trafic définie par Denby et Sundvor (Denby et Sundvor, 2012), et est décrite par les équations 2.32 et 2.33. Dès lors, $R_{route-traffic}$ et $R_{route-traffic_humide}$ s'écrivent alors :

$$\frac{1}{R_{route-traffic}} = \frac{1}{R_{route}} + C_{masque} \frac{1}{R_{traffic}} \quad 3.38$$

$$\frac{1}{R_{route-traffic_humide}} = \frac{1}{R_{route_humide}} + C_{masque} \frac{1}{R_{traffic}} \quad 3.39$$

En se basant sur l'approche décrite par Pigeon et *al.* (Pigeon et *al.*, 2007), les densités de flux de chaleur dégagées par le moteur E_{comb} et le système d'échappement E_{ex} ont été réparties en flux de chaleur sensible et latente, et additionnés aux densités de flux turbulents du canyon urbain. S_{va} est additionné à la densité de flux de chaleur sensible du canyon urbain. Ainsi, les flux turbulents du canyon urbain (équations 3.18 et 3.19) se transforment comme suit :

$$Q_{H_top} = Q_H + 2 \frac{h_{bât}}{W_{canyon}} Q_{H_murs} + \frac{1}{f_{route}} [0.92(Z_{moteur} E_{comb} + Z_{ex} E_{ex}) + Z_{radiatif} S_{va}] \quad 3.40$$

$$Q_{E_top} = Q_{LE} + \frac{1}{f_{route}} [0.08 (Z_{moteur} E_{comb} + Z_{ex} E_{ex})] \quad 3.41$$

Avec cette configuration, plusieurs processus physiques du trafic ont été pris en considération dans la modélisation de la *TSR*. De plus, les influences des paramètres du trafic (densité, volume et vitesse de circulation) ont été également intégrées dans l'évaluation des apports énergétiques du trafic par l'intermédiaire de C_{masque} . De même, l'hétérogénéité spatiale des processus physiques choisis et associés au trafic a été entreprise dans cette paramétrisation.

3 Analyse comparée des deux approches de paramétrisation

La modélisation de la *TSR* avec TEB ont été comparés avec des mesures issues de l'expérience portant sur l'appréciation de l'influence du trafic sur la *TSR* (cf. chapitre 2,

Figure 28). Le modèle TEB simule une température moyenne de la surface de la route, et ne différencie pas les zones circulées et non circulées. On s'est basé sur l'approche consistant à déterminer la TSR à partir de la densité de flux moyenne pondérée de la surface de la route pour les deux zones de mesures. Elle est exprimée par l'équation suivante :

$$TSR_{mesurée} = \frac{1}{\sigma \epsilon_{route}} \sqrt[4]{\frac{1}{3} (\sigma \epsilon_{route} TSR_{non_circulée}^4) + \frac{2}{3} (\sigma \epsilon_{route} TSR_{circulée}^4)} \quad 3.42$$

Les constantes 2/3 et 1/3 représentent respectivement les fractions de la route circulée et non circulée. Ils correspondent en modélisation à Z_{trafic} et $1-Z_{trafic}$. La Figure 40 représente la variation de la $TSR_{mesuré}$ en fonction de temps, pour la première campagne de mesures, du 20 au 21 novembre 2014. Cette approche a été appliquée aux autres campagnes de mesures.

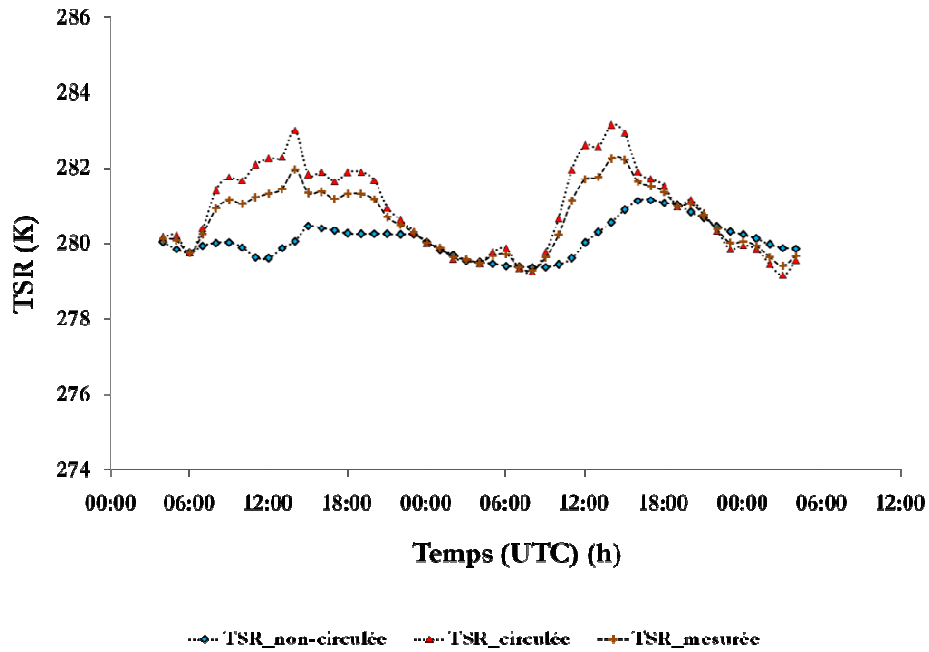


Figure 40. Évaluation de l'impact du trafic sur la TSR et illustration de la température moyenne pondérée mesurée pour la première expérience (du 20 au 21 novembre 2014)

L'analyse comparée portera aussi sur la variation de la T_{air} en fonction de l'approche d'intégration du trafic dans TEB. $T_{air_mesurée}$ correspond à la mesure de la température d'air à l'aide du capteur Sensirion SHT15 installé sur le toit du véhicule Thermoroute[®] à environ 2 m de hauteur (cf. chapitre 2, Figure 18 et

Tableau 12). Les comparaisons seront effectuées avec les résultats de la température du canyon urbain à 2 m de hauteur (T_{air_TEB}) issus du modèle TEB.

3.1 Résultats de l'intégration du trafic dans TEB selon une paramétrisation globale

Dans cette partie nous allons présenter les résultats de la modélisation de la TSR et de T_{air} , selon la configuration initiale (CI) et selon la première approche (A1) d'intégration du trafic dans TEB. Dans la configuration initiale, le trafic était intégré comme étant une constante, $Q_{H_trafic} = 17 \text{ W/m}^2$, additionné à la densité de flux turbulent du canyon urbain. De plus, cette densité de flux est supposée n'intervenir qu'entre 6h et 18h. L'amélioration apportée par la première approche a consisté à mieux évaluer les apports thermiques globaux générés par le trafic. Elle consiste en la prise en considération de la variation de ces apports en fonction de sa densité.

Afin d'évaluer la contribution thermique du trafic à la modélisation de la TSR et de T_{air} , selon la CI et l'approche A1, une analyse comparée par rapport à une troisième configuration où les apports thermiques du trafic sont supposés nuls ($Q_{H_trafic} = 0 \text{ W/m}^2$, $Q_{E_trafic} = 0 \text{ W/m}^2$) a été conduite. TSR_{TEB_CI} et $T_{air_TEB_CI}$ représentent respectivement les résultats de la modélisation de la TSR et de T_{air} selon la configuration initiale du trafic dans TEB. $TSR_{TEB_sans-traffic}$ et $T_{air_TEB_sans-traffic}$ désignent respectivement les résultats de la TSR et de T_{air} selon la configuration où les apports thermiques du trafic sont supposés nuls. Enfin TSR_{TEB_A1} et $T_{air_TEB_A1}$ représentent les résultats de la TSR et de T_{air} modélisés selon la première approche A1. Les résultats de la modélisation sont illustrés par les Figure 41 à Figure 43. Elles comparent les résultats de la TSR et de T_{air} issus du modèle TEB avec les mesures des trois campagnes expérimentales.

L'analyse préliminaire des résultats de la TSR indique que l'intégration du trafic selon l'approche A1, n'améliore pas sa modélisation par rapport à la configuration initiale. L'écart entre les résultats de la modélisation et les mesures de terrain est important, et est de l'ordre de 3 à 4°C. L'intégration du trafic selon ces deux configurations (CI et A1) n'apporte d'améliorations significatives ni sur la TSR , ni sur T_{air} par rapport à la configuration de TEB sans trafic. Ceci, permet de déduire que l'intégration du trafic comme une source de chaleur au niveau du canyon urbain, qu'elle soit constante ou variable en fonction de la densité du

trafic, ne présente pas une influence significative sur la **TSR**. Cet écart pourrait être assimilé à un déficit en énergie lié au trafic, compensable par une augmentation de Q_{trafic} .

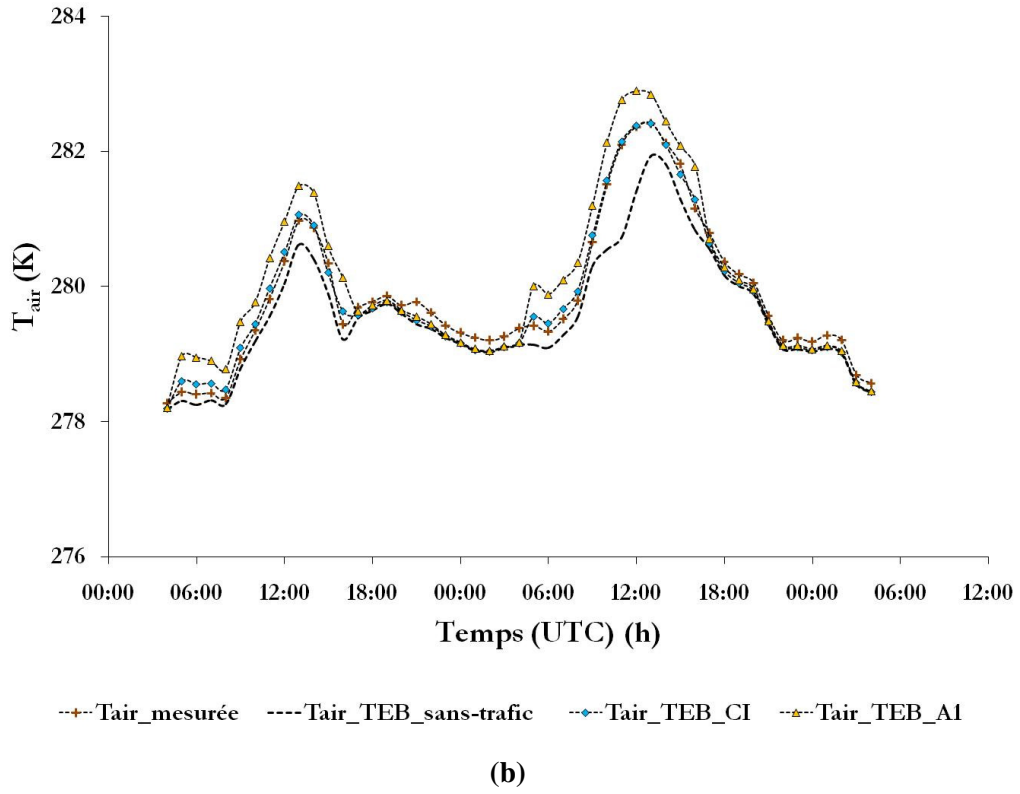
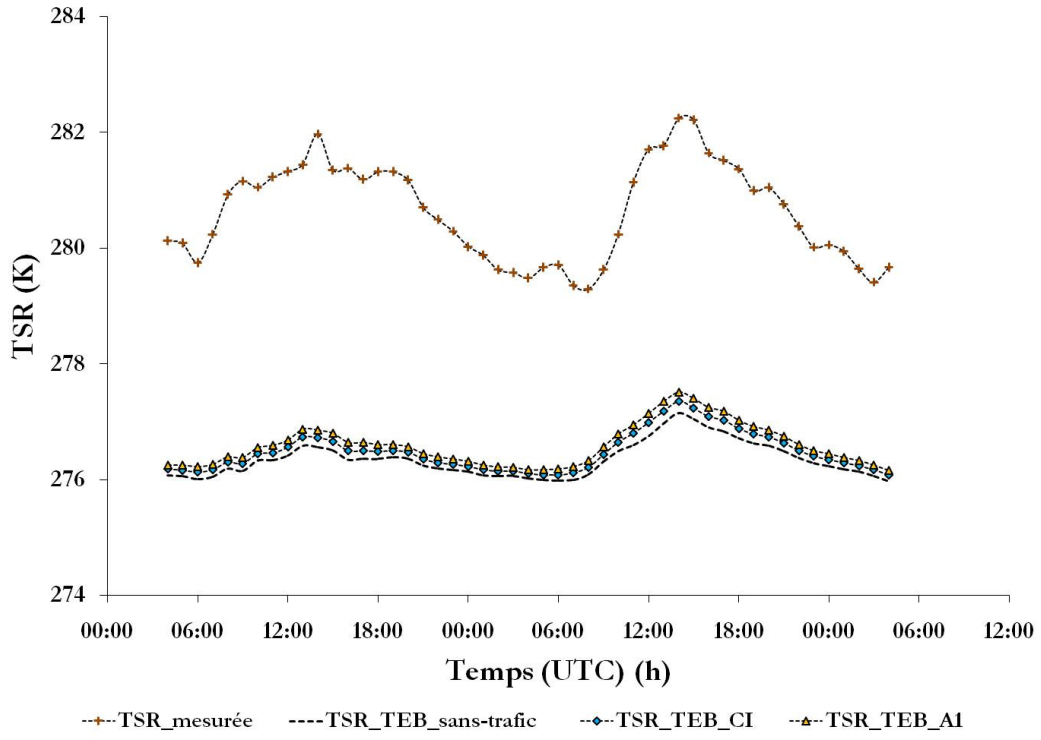
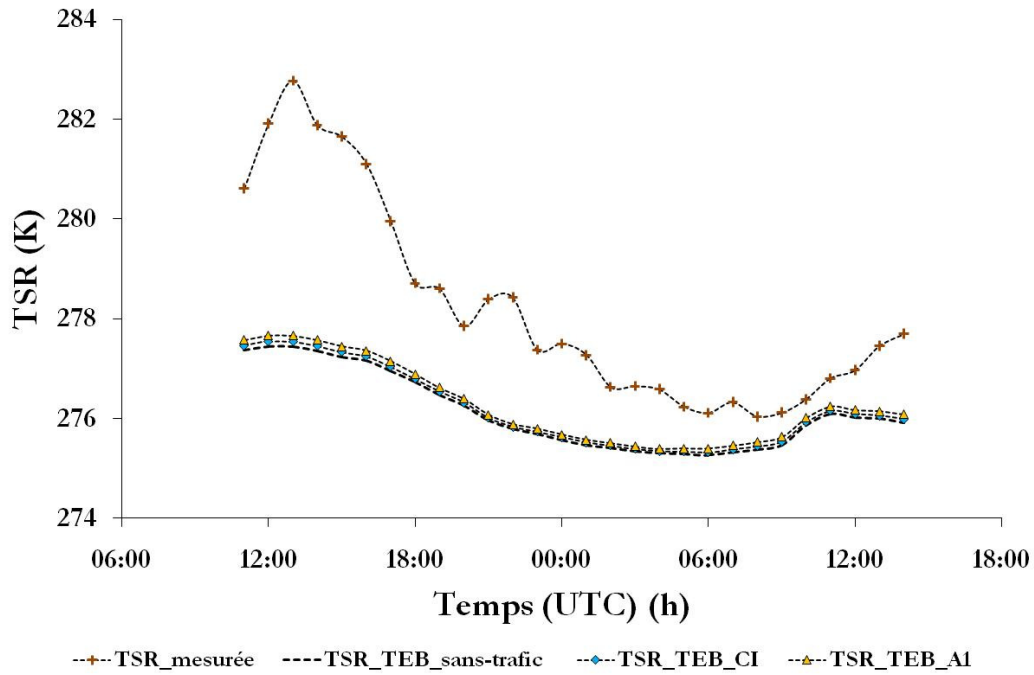
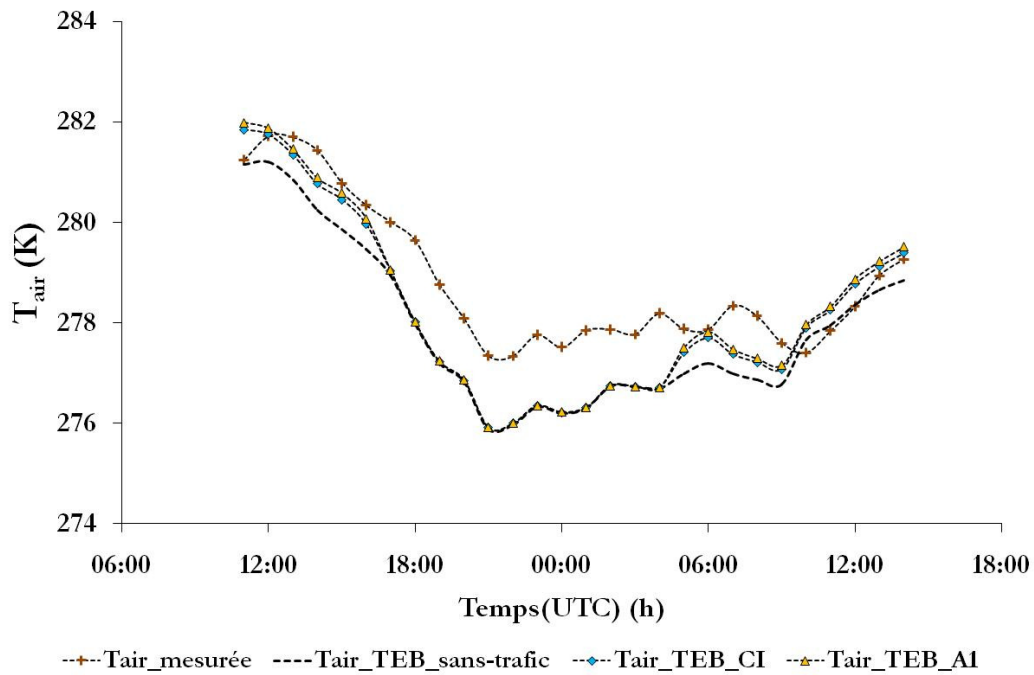


Figure 41. Comparaison des résultats de (a) la TSR et (b) de T_{air} , modélisés selon la configuration initiale et l'approche A1 d'intégration du trafic dans TEB avec les mesures de terrain, pour la première expérience du

20 au 21 novembre 2014

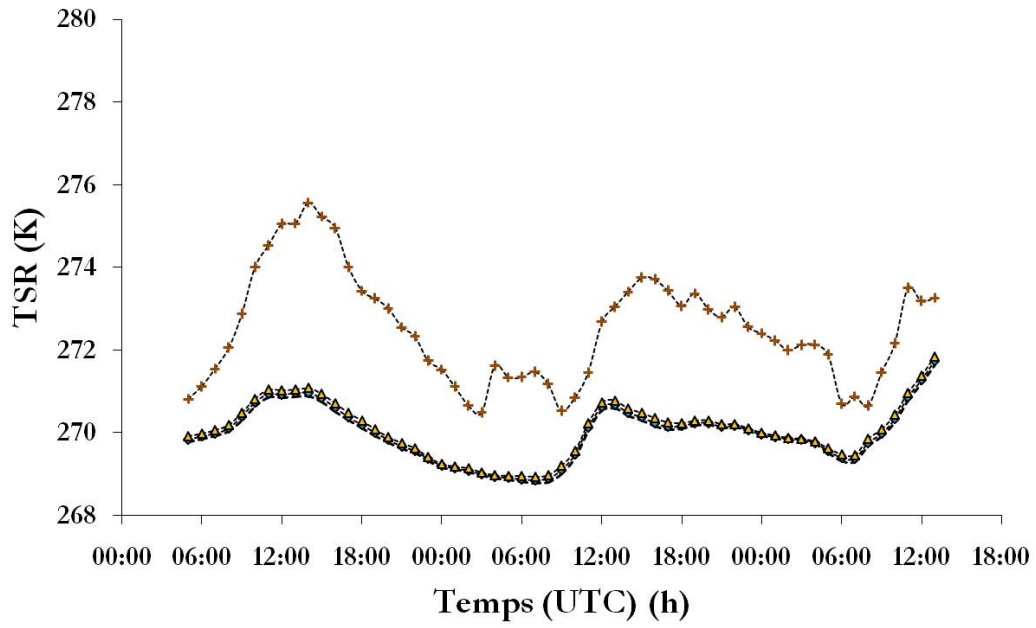


(a)

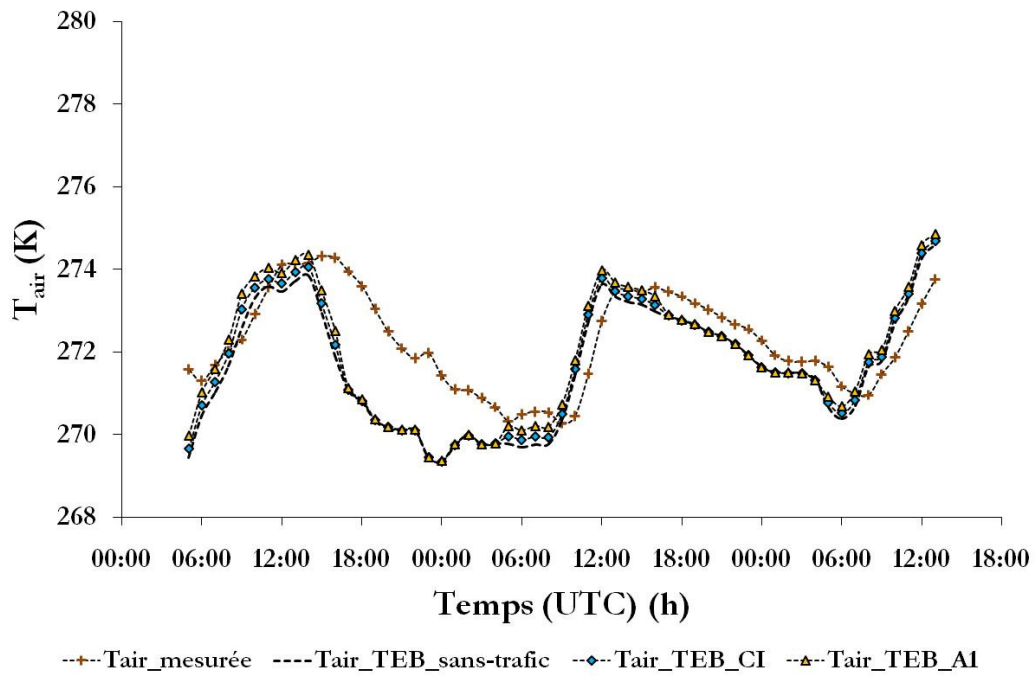


(b)

Figure 42. Comparaison des résultats de (a) la TSR et (b) de T_{air} , modélisés selon la configuration initiale et l'approche A1 d'intégration du trafic dans TEB avec les mesures de terrain, pour la deuxième expérience du 16 au 17 décembre 2014



(a)



(b)

Figure 43. Comparaison des résultats de (a) la TSR et (b) de T_{air} , modélisés selon la configuration initiale et l'approche A1 d'intégration du trafic dans TEB avec les mesures de terrain, pour la troisième expérience du 04 au 06 février 2015

Le trafic était initialement intégré dans TEB pour étudier ces impacts thermiques sur le confort urbain et pour l'évaluation du bilan thermique en ville. Aussi, l'analyse devrait porter, de préférence, sur les résultats de la modélisation de T_{air} .

L'analyse des résultats de T_{air} , montrent que l'intégration du trafic dans TEB selon la CI a amélioré la modélisation de la T_{air} . En effet, la Figure 41a montre que, pour la première expérience, les résultats de la $T_{air_TEB_CI}$ sont confondus avec les mesures de terrain $T_{air_mesurée}$. De même, les résultats de la deuxième expérience (Figure 41b) indiquent un écart de moins de 0.5°C par rapport aux mesures. En raison de la multiplicité des processus physiques intervenant dans la modélisation de la T_{air} et de l'incertitude des instruments, on considère cet écart de 0.5°C négligeable.

En outre, les résultats de la Figure 41b montrent qu'entre 18h00 et 06h00, où la contribution énergétique du trafic est nulle, l'écart par rapport aux mesures est plus important qu'entre 06h00 et 18h00, où la contribution du trafic est davantage marquée. Ainsi, on peut déduire que l'intégration du trafic dans TEB selon la CI, améliore la modélisation de la T_{air} . Cependant, il est difficile de développer une explication physique, justifiant que ces apports thermiques sont constants sur toute la journée. D'ailleurs, on a montré précédemment que ces apports sont fonction de la densité du trafic et de la vitesse de circulation des véhicules.

Les résultats de la modélisation de la T_{air} , selon la première approche (A1), indiquent que cette dernière ne rend pas encore bien compte des variations expérimentales observées au niveau des résultats de la première expérience, avec une augmentation d'environ 1°C par rapport aux mesures (Figure 41b). L'écart est de près de 2°C parfois pour la 2^e expérience. Il subsiste encore pendant la nuit sur la 3^e expérience. Ceci peut être expliqué par un apport énergétique supplémentaire associé au trafic. Cet apport justifie la différence d'évaluation des apports thermiques générés par le trafic selon l'approche A1 par rapport à la CI. Ceci est illustré sur la Figure 44 qui présente l'évolution de Q_{trafic_A1} , Q_{trafic_CI} et D_{trafic} en fonction du temps. Q_{trafic_A1} et Q_{trafic_CI} présentent les densités flux thermiques générés par le trafic et évalués respectivement par l'approche A1 et la CI. Les résultats de cette figure montrent que, contrairement à Q_{trafic_CI} constant sur toute la période de la modélisation, Q_{trafic_A1} évolue en fonction de temps, et est intimement lié à D_{trafic} .

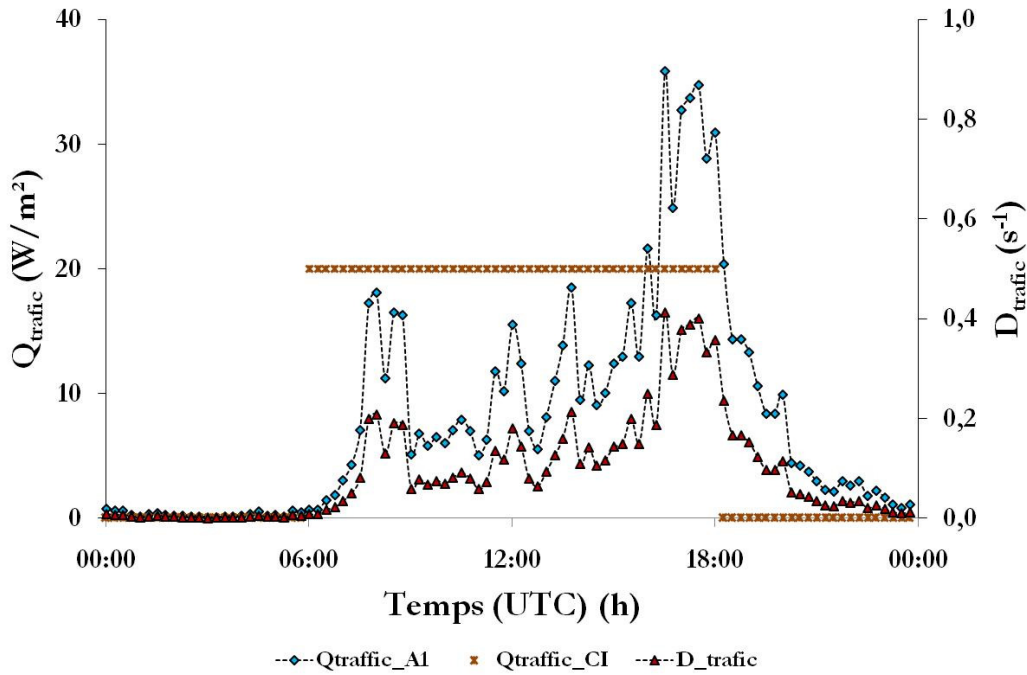
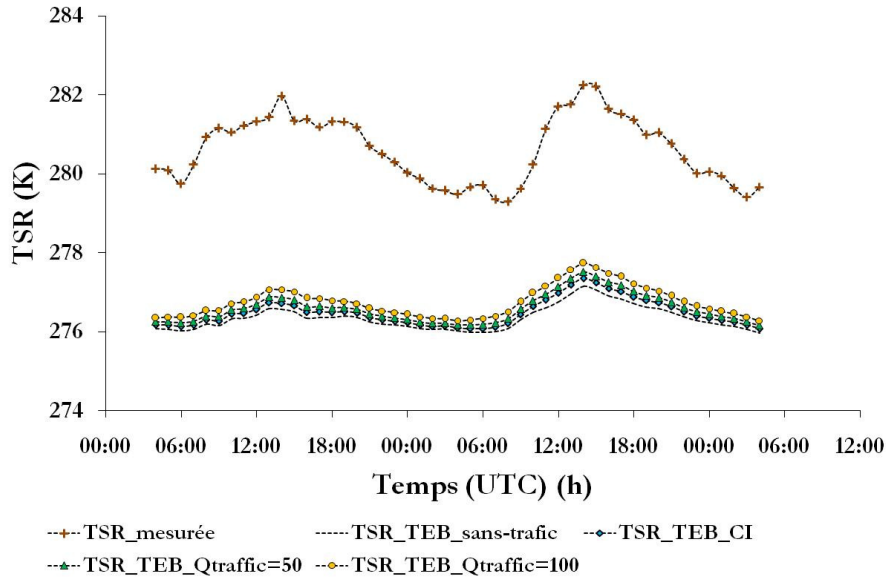
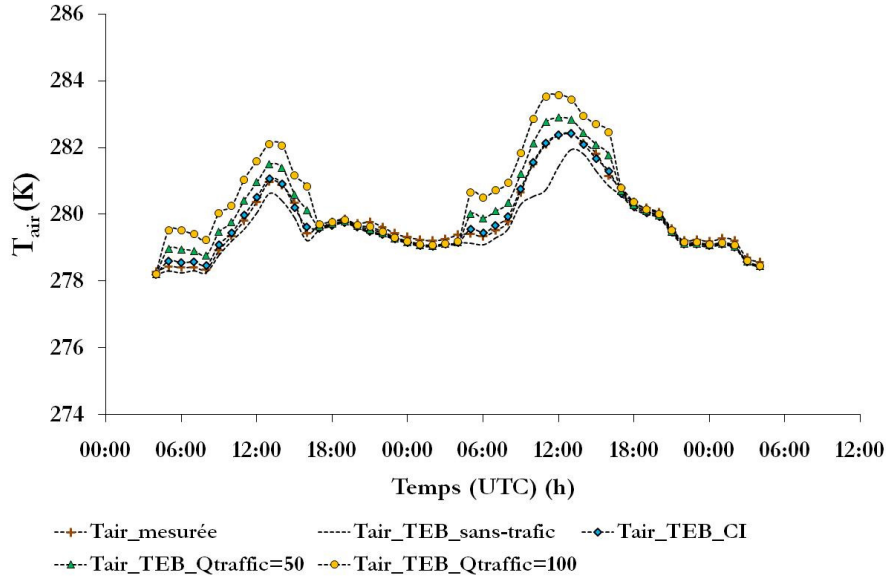


Figure 44. Différence d'évaluation de la densité de flux de chaleur globale générés par le trafic Q_{trafic} (W/m^2) selon la CI et l'approche A1 en fonction de la densité du trafic D_{trafic} pour l'expérience du 20 au 21 novembre 2014

L'évaluation de Q_{trafic} selon l'approche A1 est plus réaliste qu'avec la CI. Cependant, l'intégration du trafic selon cette approche n'a pas amélioré la **TSR** et n'a pas fondamentalement modifié la modélisation de T_{air} . Ainsi, afin d'étudier les limites de cette configuration, un test de sensibilité de la **TSR** et de T_{air} à la densité de flux de chaleur dégagée par le trafic Q_{trafic} a été conduit. Quatre modélisations ont été effectuées : une extrême inférieur de $0 \text{ W}/\text{m}^2$, correspond à une densité de trafic D_{trafic} nulle (configuration TEB sans trafic) ; une extrême supérieur de $100 \text{ W}/\text{m}^2$, correspond à une densité du trafic $D_{\text{trafic}} = 0.54 \text{ (s}^{-1}\text{)}$; et deux valeurs intermédiaires de $17 \text{ W}/\text{m}^2$, correspondant à la CI, et de $50 \text{ W}/\text{m}^2$ correspondant à $D_{\text{trafic}} = 0.38 \text{ (s}^{-1}\text{)}$. Pour cette étude de sensibilité, on présente seulement les résultats de la première expérience (Figure 45).



(a)



(b)

Figure 45. Évaluation de la sensibilité de (a) la TSR et de (b) la T_{air} au flux de chaleur sensible Q_{H_trafic} , selon la configuration initiale d'intégration du trafic dans TEB

Les résultats de la Figure 45 montrent qu'une augmentation extrême de $Q_{H_trafic}=100$ W/m² engendre une légère amélioration de l'ordre de 1°C au niveau de la modélisation de la **TSR**. Cependant, cette amélioration ne suffit pas à corriger les écarts entre la modélisation de la **TSR** et les mesures. Ces résultats montrent également que la variation de Q_{trafic} perturbe énormément la modélisation de la T_{air} . Elle engendre un écart d'environ 2°C par rapport à $T_{air_mesurée}$. Ce résultat est cohérent puisqu'il correspond à l'introduction d'une source croissante de chaleur dans le canyon urbain.

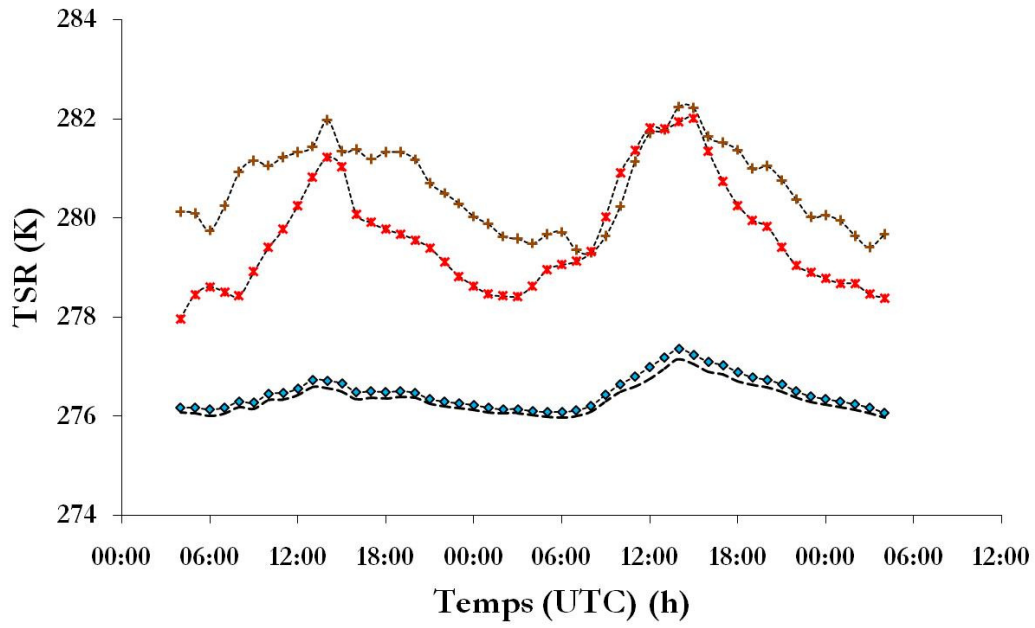
Les résultats de la modélisation de la TSR et de la T_{air} selon l'approche A1 ainsi que les résultats de l'étude de sensibilité indiquent que la paramétrisation globale du trafic avec une source de chaleur additionnée à la densité de flux turbulents du canyon ne convient pas à la modélisation de la TSR et n'améliore pas celle de T_{air} . Cette conclusion s'applique à notre cas d'étude dans des conditions hivernales où les apports énergétiques d'origine anthropique sont significatifs et peuvent être supérieurs aux densités de flux globaux reçus par la surface de la route (Taha, 1997). Ils méritent d'être paramétrés différemment dans la modélisation du bilan énergétique de surface. Cependant, cette paramétrisation reste fiable dans les cas de modélisations pour des conditions estivales (Sailor et Lu, 2004 ; Pigeon et *al.*, 2007 ; Colombert, 2008). Dans notre cas d'étude, une nouvelle approche a été développée portant sur une paramétrisation détaillée des différents processus physiques associés au trafic automobile.

3.2 Résultats de l'intégration du trafic dans TEB selon une paramétrisation détaillée

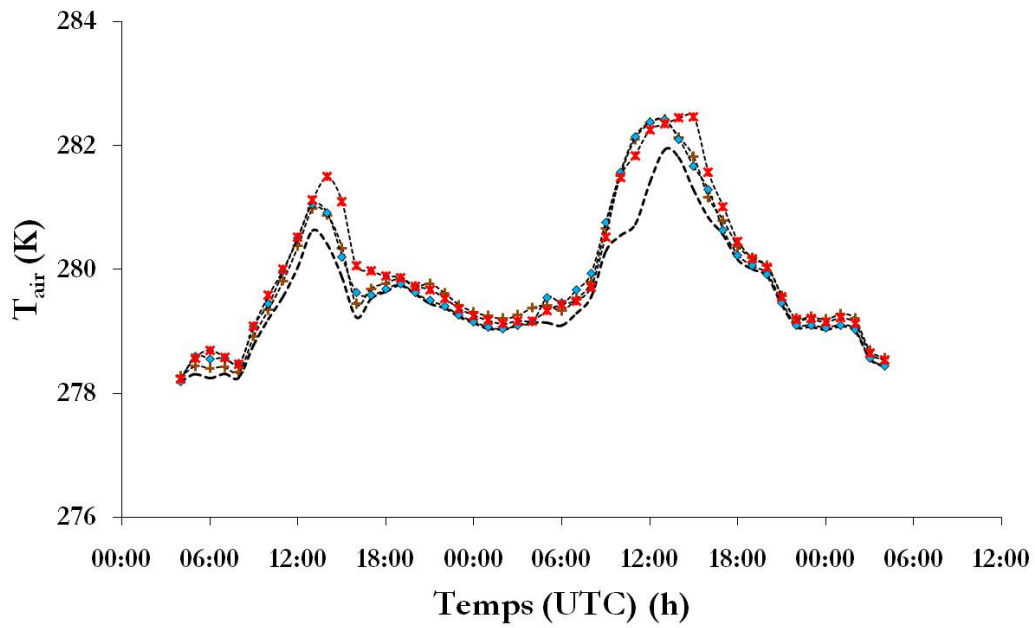
3.2.1 Analyse et discussion des résultats sur la TSR et de la T_{air}

Cette approche consiste à intégrer les différents processus physiques associés au trafic qui ont été identifiés et décrits précédemment dans le chapitre 2. Dans cette partie, nous allons analyser l'influence de l'apport thermique cumulatif associé à ces différents processus sur le bilan énergétique de surface de la route. L'analyse comparée portera sur les résultats de la modélisation de la TSR et de T_{air} par le modèle TEB avec les mesures de terrain. Les Figure 46 à Figure 48 représentent les résultats pour les trois expériences. Ils comparent les résultats de la modélisation de la TSR et de la T_{air} selon la CI, l'approche A1, l'approche où le trafic est supposé nul, et l'approche A2 avec les mesures de terrain. TSR_{TEB_A2} et $T_{air_TEB_A2}$ représentent respectivement les résultats de la TSR et de la T_{air} modélisé avec TEB selon l'approche A2.

L'analyse préliminaire de ces résultats montre que l'intégration du trafic dans TEB selon l'approche A2 a amélioré la modélisation de la TSR . En effet, l'écart de température entre TSR_{TEB_A2} et $TSR_{mesurée}$ est de l'ordre de 0.5 à 1.5°C. Cet écart est réduit, comparé à celui obtenu avec la configuration initiale et l'approche A1. De plus, ces résultats indiquent que la paramétrisation du trafic dans TEB selon cette seconde approche A2, génère un apport thermique très significatif, de l'ordre de 2 à 3°C. Ces résultats sont en cohérence avec l'étude expérimentale et ceux trouvés dans la littérature.

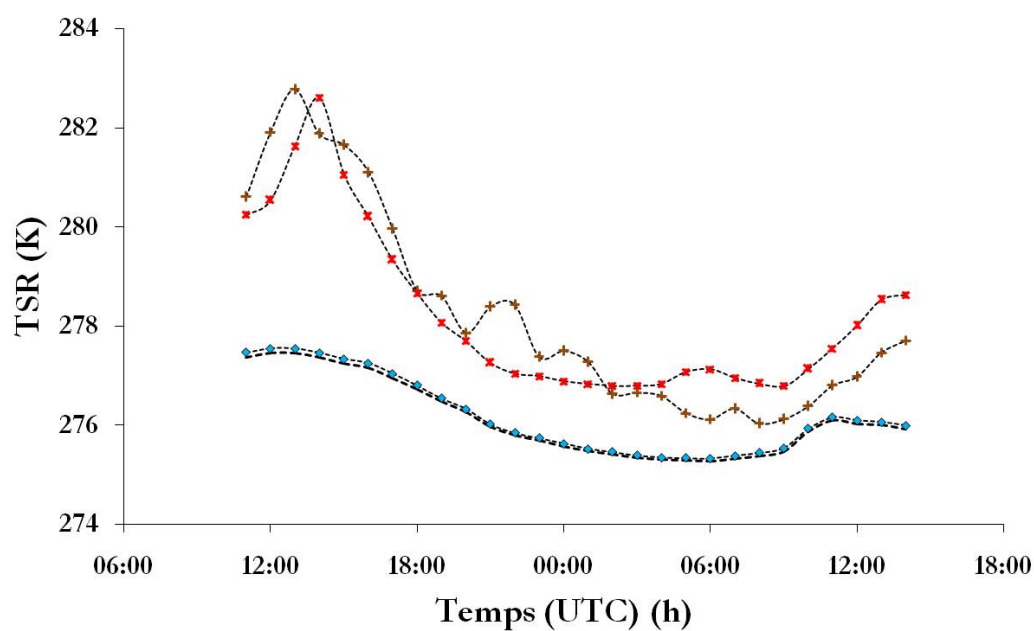


(a)

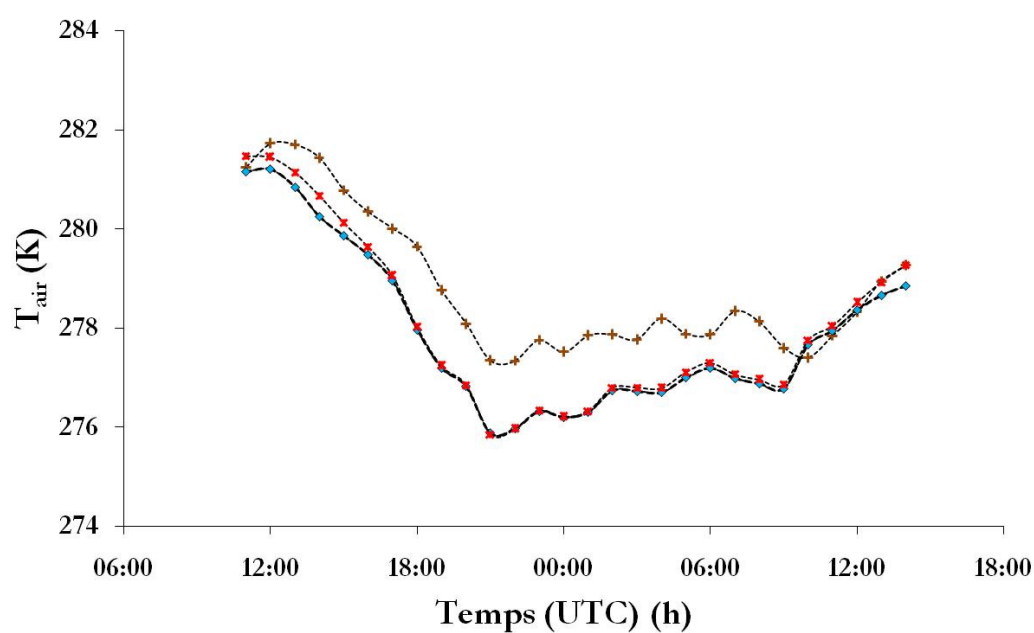


(b)

Figure 46. Comparaison des résultats de (a) la TSR et (b) de T_{air} , modélisés selon la configuration initiale et l'approche A2 d'intégration du trafic dans TEB avec les mesures de terrain, pour la première expérience du 20 au 21 novembre 2014

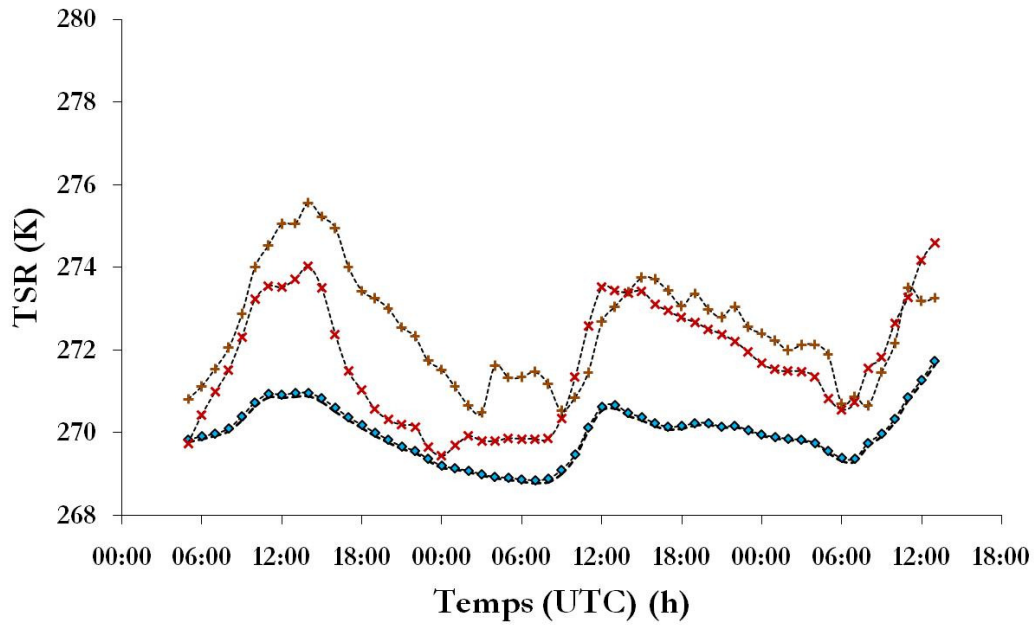


(a)

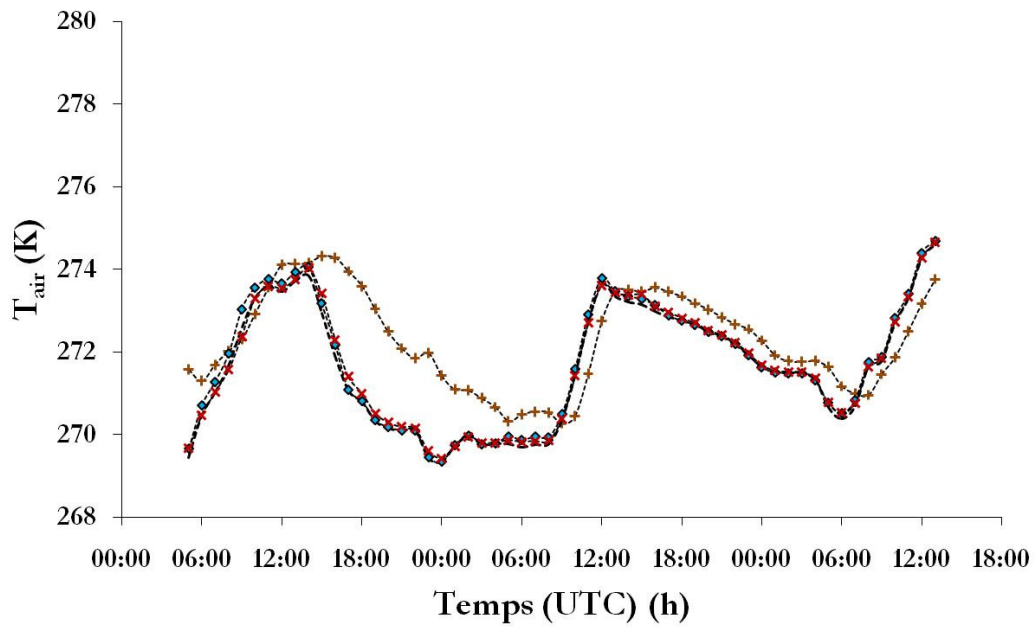


(b)

Figure 47. Comparaison des résultats de (a) la TSR et (b) de T_{air} modélisés selon la configuration initiale et l'approche A2 d'intégration du trafic dans TEB avec les mesures de terrain, pour la deuxième expérience du 16 au 17 décembre 2014



(a)



(b)

Figure 48. Comparaison des résultats de (a) la TSR et (b) de T_{air} modélisés selon la configuration initiale et l'approche A2 d'intégration du trafic dans TEB avec les mesures de terrain, pour la troisième expérience du 04 au 06 février 2015

En outre, ces résultats montrent que les apports thermiques du trafic varient en fonction du temps. Cette variation est liée à la densité du trafic dans la journée. Plus la densité du trafic est importante, plus ces apports sont importants et, ainsi l'écart de température par rapport aux mesures se réduit. Ceci est remarquable surtout pendant les heures de pointe où la densité du trafic est à son maximum, et l'écart se réduit au minimum. Il est de l'ordre de 0.5°C pour les trois expériences. Cependant, pendant la nuit et le matin très tôt, où la densité du trafic est faible, cet écart devient plus important (1.5°C pour la première expérience et 1°C pour la deuxième). Ainsi, à ce niveau d'étude, on peut déduire que l'amélioration de la modélisation de la TSR est liée aux apports thermiques cumulatifs générés par les différents processus physiques du trafic intégré dans le modèle TEB. L'analyse des résultats de T_{air} montrent que l'intégration du trafic dans TEB selon l'approche A2 ne modifie pas significativement sa modélisation. Les écarts avec les mesures sont les mêmes que pour la configuration initiale et l'approche A1.

Les deux approches d'intégration du trafic dans TEB, A1 et A2, supposent que le trafic attribue de l'énergie au niveau du canyon urbain. Cependant, la différence entre elles est que la première approche considère que la densité de flux d'énergie généré par le trafic est totalement attribuée aux densités de flux turbulents du canyon urbain, Q_{E_top} et Q_{H_top} . La seconde approche partage cette densité de flux entre le bilan énergétique de surface de la route et les flux du canyon. La question de la répartition de cette densité de flux anthropique est alors soulevée.

Ainsi, on peut conclure que l'intégration du trafic selon une paramétrisation détaillée a amélioré la modélisation de la TSR et a préservé celle de T_{air} . Cette approche s'est basée sur différentes hypothèses. Elle a considéré que les apports thermiques du trafic se limitent à une zone d'impact (Z_{trafic}) avec un bilan énergétique de surface par zone. Elle a supposé également, que les densités de flux de chaleurs sensibles E_{comb} et E_{ex} et S_{va} influencent les densités de flux turbulents du canyon urbain Q_{H_top} et Q_{E_top} . Afin de tester la sensibilité des résultats de la TSR et de T_{air} à ces deux hypothèses, différentes modélisations ont été conduites.

3.2.2 Influence de Z_{trafic} sur la modélisation de la TSR et de la T_{air}

Le premier test a porté sur le paramètre Z_{trafic} . Différentes valeurs ont été testées. Une valeur extrême supérieure $Z_{trafic}= 1$, supposant que la surface de la route est totalement impactée par le trafic. Une valeur extrême inférieure $Z_{trafic}= 0$, correspond à une route sans trafic. La valeur

$Z_{trafic} = 0.67$ correspond à notre cas d'étude. Deux autres valeurs intermédiaires, $Z_{trafic} = 0.25$, $Z_{trafic} = 0.5$ et $Z_{trafic} = 0.75$, ont aussi été testées. Ils correspondent aux cas d'une route à quatre voies avec respectivement une seule, deux et trois voies circulées. Les résultats sont illustrés par la Figure 49.

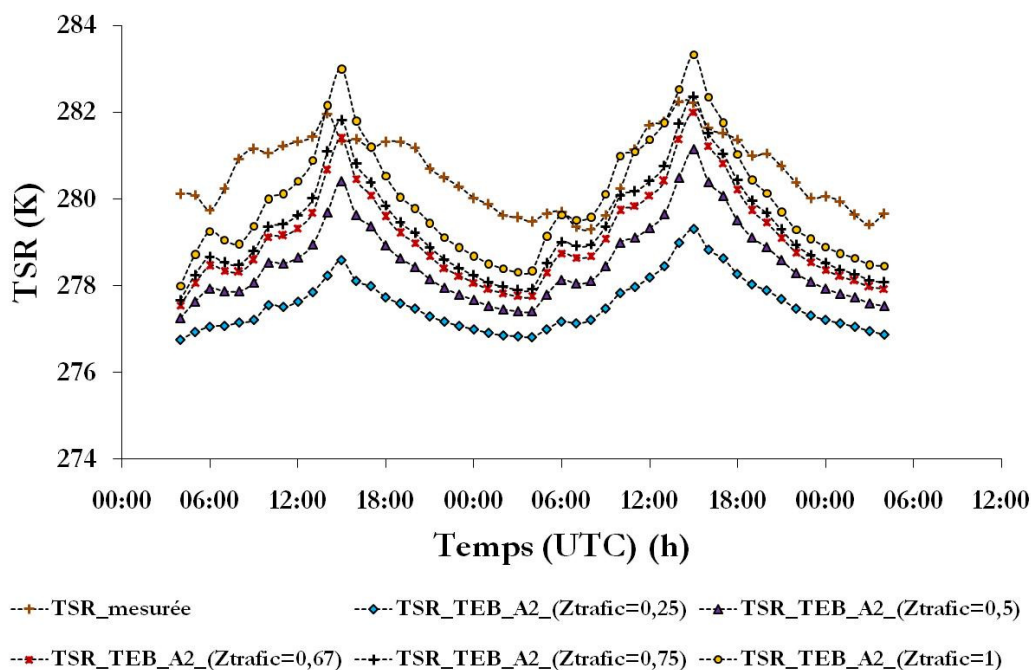


Figure 49. Impact de l'étendue de la zone d'impact du trafic Z_{trafic} sur la modélisation de la TSR, pour la première expérience du 20 au 21 novembre 2014

Les résultats de cette figure montrent que la variation de Z_{trafic} a un effet significatif sur la modélisation de la **TSR**. En effet, plus l'étendue de Z_{trafic} est importante, plus la TSR croît. L'augmentation de l'étendue ne signifie pas l'étalement de la zone d'impact spécifique au véhicule mais reflète l'augmentation de la densité du trafic. En effet, l'augmentation de Z_{trafic} signifie que le trafic couvre une fraction importante de la zone circulée de la route. Dès lors, si l'étendue de Z_{trafic} augmente, la densité du trafic augmente en conséquence, et les apports thermiques du trafic deviendront importants, justifiant l'augmentation de la **TSR** en fonction de Z_{trafic} .

La validation de ce test est très délicate, en raison de la difficulté de réaliser des mesures de terrain pour les différentes situations de Z_{trafic} . Cependant, on peut s'appuyer sur les données des mesures de la **TSR** réalisées avec la caméra thermique infrarouge $TSR_{circulée}$ lors de l'expérience des mesures de la **TSR** en milieu urbain (cf. chapitre 2, Figure 28). Ces mesures représentent la **TSR** d'une zone totalement impactée par le trafic. Dès lors, on peut considérer

que ces mesures représente le cas de $Z_{trafic} = 1$. L'analyse comparée de ces résultats avec la modélisation de la TSR issue du modèle TEB sont illustrés par Figure 50. $Z_{trafic} = 0$ correspond aux mesures du radiomètre infrarouge en zone non circulée pour laquelle la modélisation donne encore des écarts.

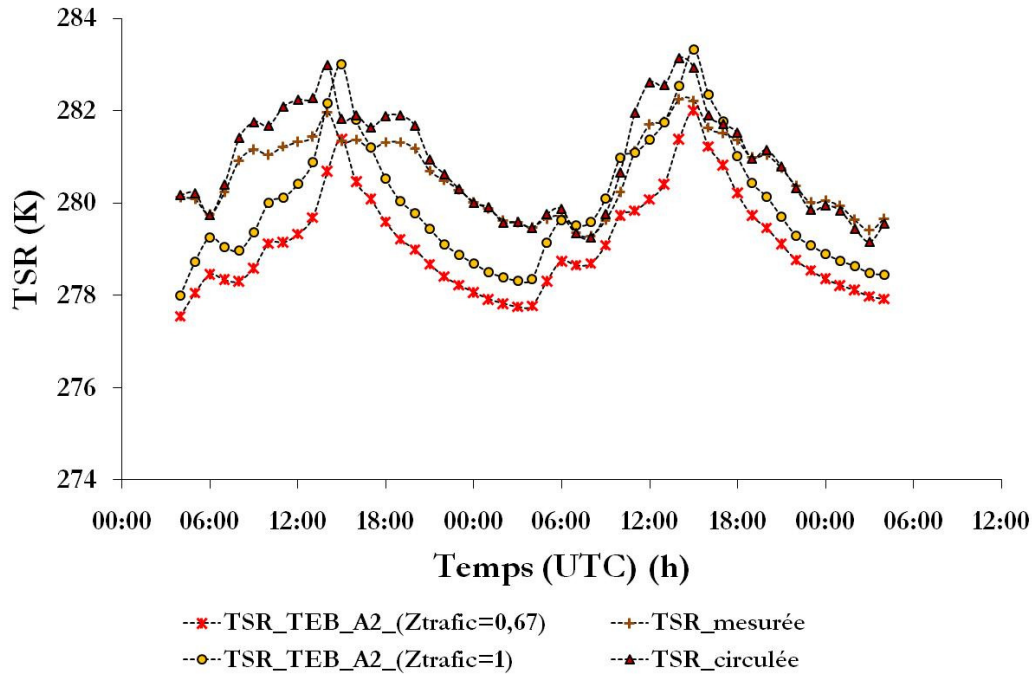


Figure 50. Comparaison de la TSR mesurée et celle modélisée avec TEB en fonction de Z_{trafic} pour la première expérience du 20 au 21 novembre 2014

On se limite à la présentation des résultats pour la première expérience. Cette figure compare les résultats de deux configurations. Une première configuration reflétant la paramétrisation initiale de l'approche A2 avec $Z_{trafic} = 0.67$. Les résultats de cette configuration sont comparés avec les données de la $TSR_{mesurée}$. La seconde configuration représente le cas où $Z_{trafic} = 1$, et ces résultats sont comparés avec les données de la $TSR_{circulée}$. L'analyse comparée des résultats de ces deux types de configurations montrent que l'écart de température entre les mesures de terrain et celle modélisée par TEB est de l'ordre de 0.5 à 1.5°C. Il est plus significatif le soir où les apports thermiques du trafic sont faibles. De plus, cet écart est le même pour les deux types de configuration. Ceci permet de déduire que TEB prend en considération la variation de Z_{trafic} . Ces résultats permettent de déduire que la détermination de la zone d'impact du trafic est nécessaire pour sa paramétrisation dans la modélisation du bilan énergétique de surface de la route.

Z_{trafic} n'intervient pas dans la paramétrisation des flux turbulents de canyon urbain.

Une vérification des résultats de T_{air} est nécessaire et les résultats de la modélisation de cette vérification sont illustrés par la Figure 51 suivante.

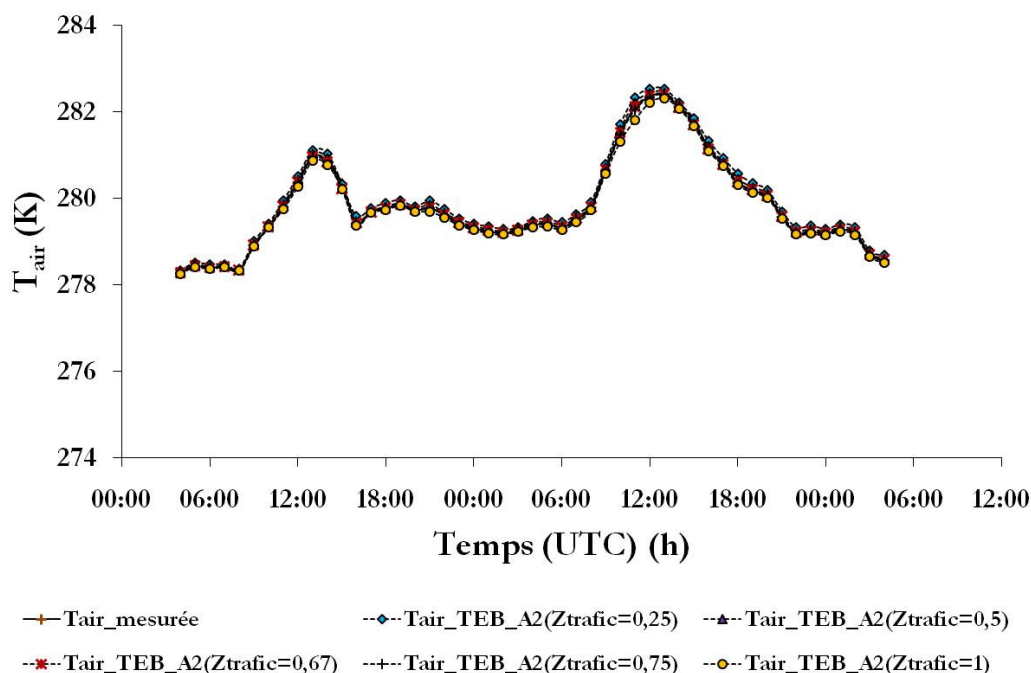


Figure 51. Impact de l'étendu de la zone d'impact du trafic $Z_{traffic}$ sur la modélisation de la T_{air} , pour la première expérience du 20 au 21 novembre 2014

L'analyse de ces résultats montre que la modification de $Z_{traffic}$ n'influence pas la modélisation de T_{air} . Ceci confirme son indépendance vis à vis de ce paramètre. De plus, ces résultats indiquent que la modification de bilan énergétique de surface de la route n'a pas une influence significative sur la modélisation de T_{air} . Ceci justifie, dans une certaine limite, les résultats de la TSR obtenus avec la CI et l'approche A1 où une forte modification au niveau de flux de canyon urbain n'implique qu'une légère modification au niveau des résultats de la TSR .

3.2.3 Influence de la configuration de S_m , E_{ex} et S_{va} sur la modélisation de la TSR et de la T_{air}

Selon l'approche A2 de paramétrisation du trafic dans le modèle TEB, on a supposé que E_{comb} , E_{ex} et S_{va} influencent les densités de flux turbulents de chaleur sensible et latente du canyon urbain. Ceci est décrit par les équations 4.40 et 4.41. Cependant, en raison de la proximité de système d'échappement et du moteur de la surface de route, on a souhaité évaluer la sensibilité de la TSR et de T_{air} à la configuration des ces densités de flux. À cet égard, différentes configurations ont été conduites en se basant sur les équations suivantes :

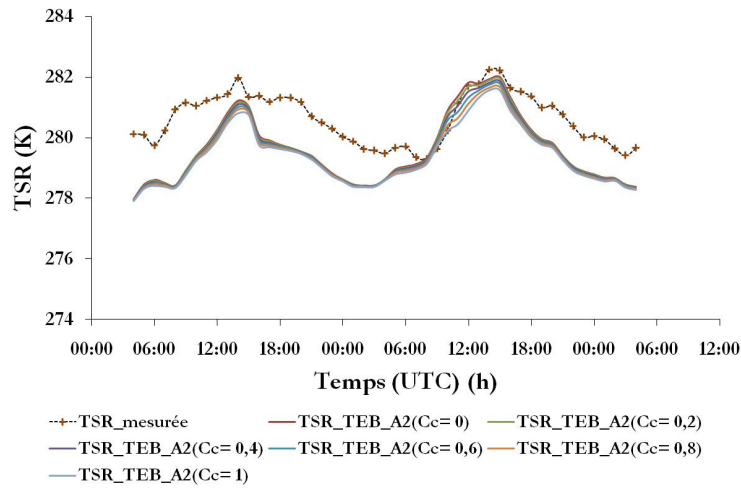
$$\begin{aligned}
C_1 \frac{\partial TSR}{\partial t} = & \frac{1}{d_1} \left[(1 - Z_{trafic}) [R_n + Q_H + Q_{LE} + \Delta Q_{S\,1,2}] \right. \\
& + Z_{trafic} [R_n^* + Q_H^* + Q_{LE}^* + \Delta Q_{S\,1,2} + C_{masque} Z_{pneu} S_t \\
& \left. + C_c [(Z_{moteur} E_{comb} + Z_{ex} E_{ex}) + Z_{radiatif} S_{va}] \right]
\end{aligned} \tag{3.43}$$

$$\begin{aligned}
Q_{H_top} = & Q_H + 2 \frac{h_{bât}}{W_{canyon}} Q_{H_murs} \\
& + \frac{1}{f_{route}} (1 - C_c) [0.92 (Z_{moteur} E_{comb} + Z_{ex} E_{ex}) + Z_{radiatif} S_{va}]
\end{aligned} \tag{3.44}$$

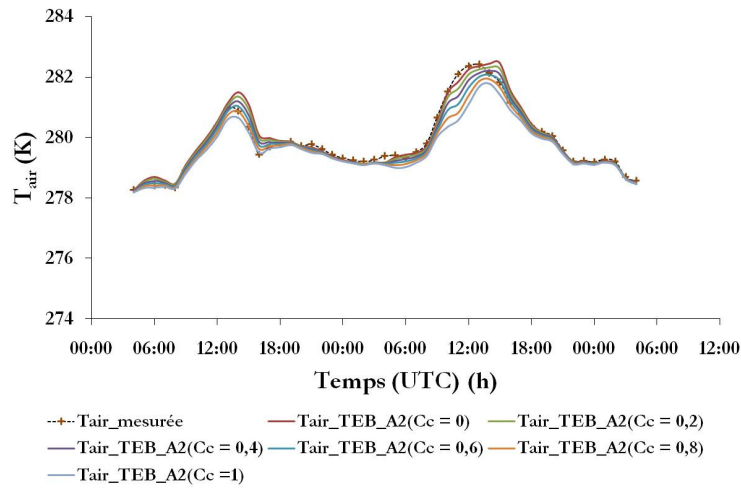
$$Q_{E_top} = Q_{LE} + \frac{1}{f_{route}} (1 - C_c) [0.08 (Z_{moteur} E_{comb} + Z_{ex} E_{ex})] \tag{3.45}$$

Les modifications par rapport à la configuration initiale de l'approche A2 reposent sur le paramètre C_c . Il représente la contribution des densités de flux de chaleurs S_m , E_{ex} et S_{va} à la modélisation du bilan énergétique de surface et aux densités de flux turbulents du canyon urbain. Six modélisations ont été conduites avec $C_c=0$, $C_c=0.2$, $C_c=0.4$, $C_c=0.6$, $C_c=0.8$ et $C_c=1$. Le choix de ces valeurs a été fait arbitrairement, l'objectif est d'étudier les limites de la configuration de ces densités de flux ainsi que les limites de leurs influences sur la modélisation de la TSR et de T_{air} . La valeur $C_c=0$ correspond à la configuration initiale de l'approche A2 (équations 4.30, 4.40 et 4.41). Les résultats sont illustrés sur la Figure 52.

Les résultats montrent que la variation de la configuration de ces flux de chaleurs sensibles générés par le moteur S_m , par le système d'échappement E_{ex} et induit pas le passage du véhicule S_{va} , ne présente pas une influence significative sur la modélisation de la TSR . Cependant, elle perturbe légèrement celle de T_{air} . Cette perturbation est remarquable surtout pendant les heures de pointe, où la densité du trafic est importante. On constate que les apports thermiques de ces flux à la température d'air sont plus importants lorsqu'ils sont additionnés en faveur de la densité de flux turbulents du canyon urbain. En outre, les résultats de ce test de sensibilité confirment que la meilleure configuration d'intégration de ces flux (S_m , E_{ex} et S_{va}), pour la modélisation de la TSR et de la T_{air} , est celle choisie par la paramétrisation de l'approche A2, où ils sont attribués entièrement aux densités de flux turbulents du canyon urbain.



(a)



(b)

Figure 52. Variation des résultats de la modélisation de (a) la TSR et (b) de T_{air} en fonction de la configuration des flux S_m , E_{ex} et S_{va} dans le modèle TEB, pour la première expérience du 20 au 21 novembre 2014

Ainsi les résultats de ces différents tests confirment le choix de la paramétrisation détaillée du trafic dans le modèle TEB. Cette configuration a amélioré la modélisation de la **TSR**, sans affecter celle de T_{air} . Cette amélioration est liée aux effets cumulatifs des apports thermiques associés aux différents processus physiques du trafic.

Les résultats de l'étude expérimentale par thermographie infrarouge ont indiqué une hétérogénéité spatiale de l'étendue spatiale de chacun des processus physiques associés au trafic. De plus, ils ont montré que les impacts thermiques du trafic les plus importants sont liés à la densité de flux de chaleur due aux frottements des pneumatiques ainsi qu'à la densité de flux radiatif émise par la partie inférieure du véhicule. Dans la littérature, on a trouvé également des études considérant que l'effet turbulent généré par le passage des véhicules

ainsi que la modification de la vitesse du vent sont les processus les plus significatifs des impacts thermiques du trafic. Ainsi, afin de répondre à cette problématique une étude de sensibilité a été mise en œuvre.

4 Étude de sensibilité du modèle TEB dans la configuration d'une paramétrisation détaillée des effets anthropiques du trafic

Cette étude de sensibilité comporte deux parties. Une première partie consistant à évaluer la contribution thermique de chacun des processus physiques liés au trafic à la modélisation de la *TSR*. Elle permet également d'identifier les processus les plus significatifs, responsables de l'amélioration de la *TSR* et de T_{air} . La seconde partie propose d'étudier la sensibilité de la *TSR* et de la T_{air} aux caractéristiques spécifiques du milieu urbain, et particulièrement à la géométrie du canyon urbain (hauteur et densité de bâtiments).

4.1 Sensibilité de la *TSR* et de T_{air} aux processus physiques liés au trafic automobile

Nous allons étudier dans un premier temps la contribution thermique de chacun des processus physiques liés au trafic et sur la base de ces résultats, nous identifierons et discuterons les processus physiques responsables à l'amélioration de la *TSR* et de T_{air} .

4.1.1 Contribution des processus physiques liés au trafic à l'amélioration de la *TSR*

Un choix et une adaptation de méthodologie d'évaluation ont été fixés pour chacun de ces processus pour les intégrer dans le modèle TEB. Les résultats de l'intégration du trafic dans TEB selon l'approche A2 ont montré que la prise en compte de tous ces processus améliorerait significativement la modélisation de la *TSR*. Néanmoins, dans la littérature, plusieurs auteurs (Shao et Lister, 1996 ; Jacobs et Raatz, 1996 ; Chapman et *al.*, 2001a) ont considéré que certains de ces processus sont plus significatifs que d'autres. Chapman et *al.* (Chapman et *al.*, 2001a) ont tenu compte uniquement des impacts du trafic sur la densité de flux radiatif reçu par la surface de la route ainsi que la modification des échanges turbulents entre la surface de la route et l'atmosphère environnante. De même, Jacobs et Raatz. (Jacobs et Raatz, 1996) intègrent le trafic par une augmentation des échanges turbulents entre la surface la route et l'atmosphère environnante. Dans le cadre de cette perspective, une étude de sensibilité a été

conduite afin d'évaluer la contribution thermique de chacun de ces processus à l'amélioration de la modélisation. À cet égard, chaque processus a été intégré à part. Les résultats de la modélisation de la **TSR** avec prise en compte de l'un des processus physiques du trafic issus de ce test de sensibilité ont été comparés avec les résultats de la **TSR** issus de la configuration de TEB sans trafic et les mesures de terrain. Ils sont illustrés par les figures suivantes.

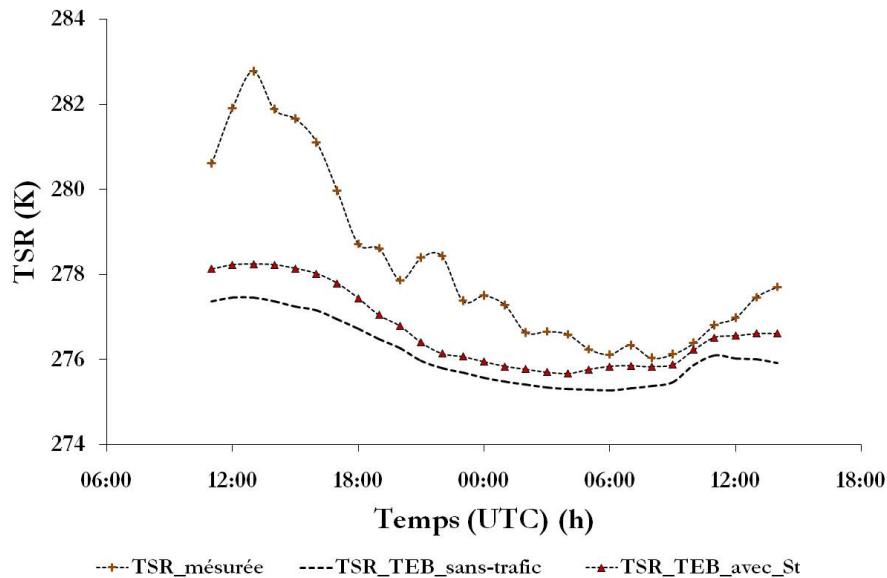
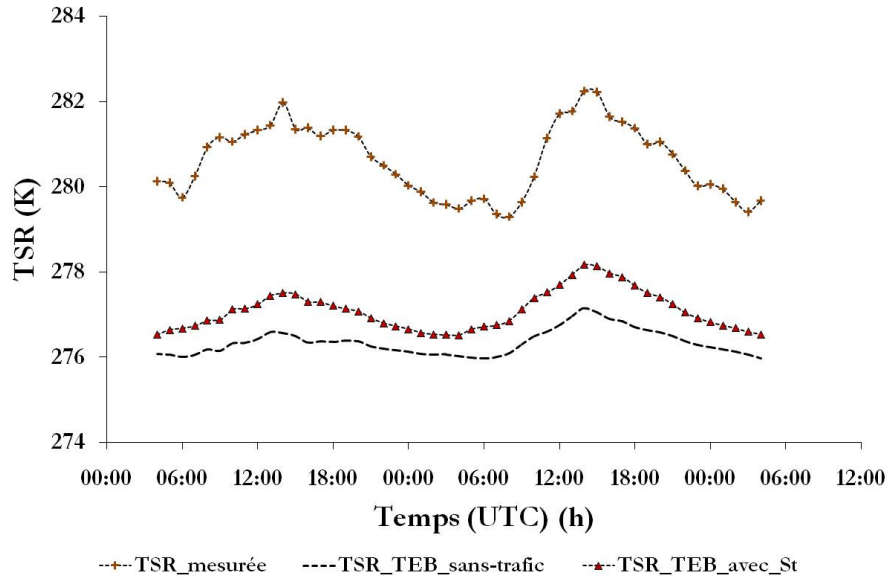
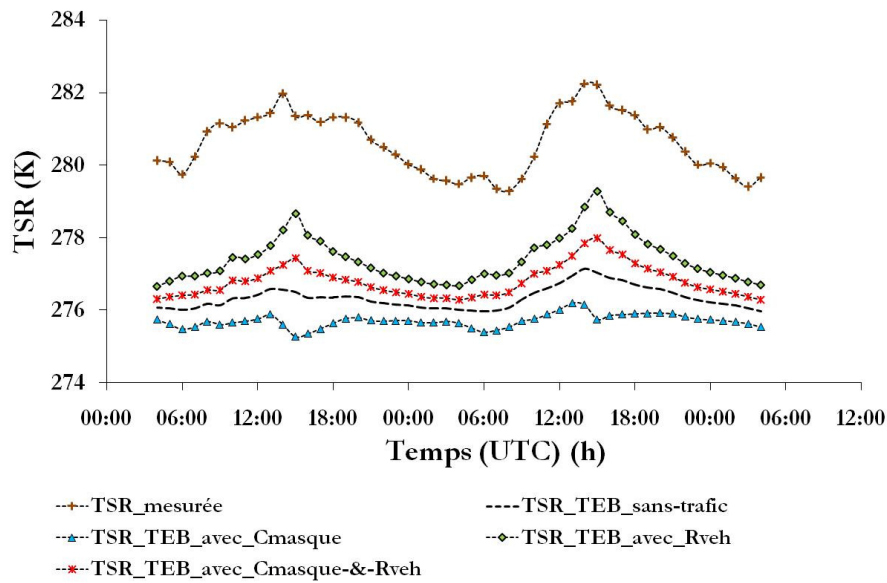


Figure 53. Apport énergétique de la densité de flux de chaleur S_t due aux frottements des pneumatiques à la modélisation de la TSR, (a) pour l'expérience du 20 au 21 novembre 2014, et (b) pour l'expérience du 16 au 17 décembre 2014

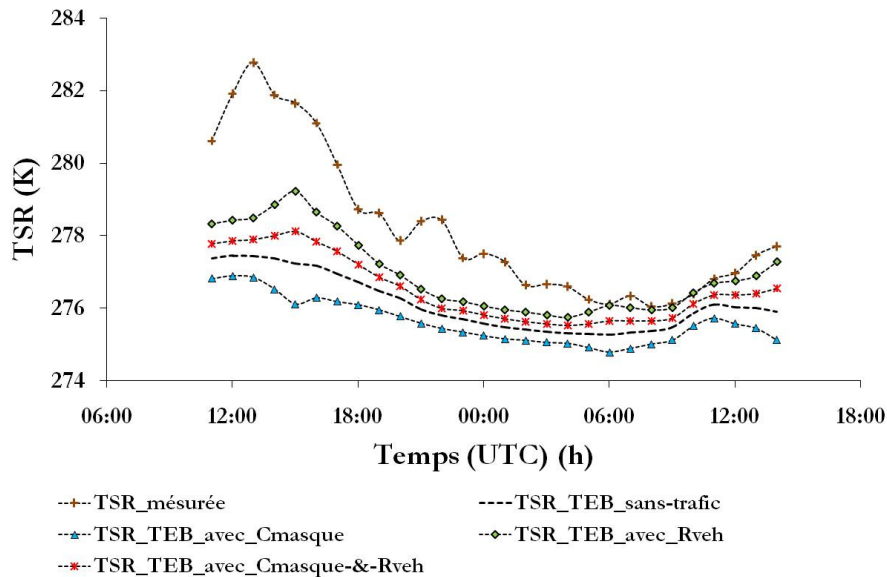
La Figure 53 représente les apports énergétiques du flux de chaleur due aux frottements des pneumatiques à la modélisation de la TSR. Les résultats de cette figure montrent que l'intégration de ce processus améliore la **TSR** de 1 à 1.5°C. De plus, ces apports sont plus significatifs au cours de la journée où la densité du trafic est importante, et faible la nuit où la densité du trafic est moindre. Ces résultats sont confirmés pour toutes les expériences.

Le trafic influence le bilan radiatif reçu par la surface de la route selon deux processus. D'un côté, il engendre un effet de masque intermittent empêchant une certaine densité de flux radiatif d'atteindre la surface de la route, décrite par le coefficient d'effet de masque C_{masque} . D'un autre côté, le trafic émet une densité de flux radiatif infrarouge de grande longueur d'onde qui s'additionne au bilan radiatif de la surface de la route. L'impact de ces deux processus ainsi que leurs effets cumulatifs est illustré par la Figure 54. **TSR_TEB_avec_** C_{masque} représente les résultats de la modélisation de la TSR avec la prise en compte uniquement de l'influence de l'effet de masque sur le bilan radiatif de surface. **TSR_TEB_avec_** R_{veh} représente les résultats de la modélisation de la TSR avec la prise en compte uniquement de la densité de flux radiatif émise par le véhicule. **TSR_TEB_avec_** C_{masque} -&- R_{veh} représente les résultats de la modélisation de la TSR avec l'effet cumulatif de ces deux processus (effet de masque et densité de flux radiatif). Les résultats indiquent que l'application de l'effet de masque uniquement engendre une forte perturbation sur le bilan radiatif de surface se traduisant par une baisse de 1 à 2°C de la **TSR**. Cette baisse est très remarquable surtout pendant les heures de pointe où on constate une modification significative du profil de la **TSR**. En effet, pendant les heures de pointe, la densité du trafic est très importante, ce qui signifie que le blocage intermittent l'est aussi. La perte en densité de flux radiatif reçu par la surface de la route est significative et explique cette modification du profil de la **TSR**. En parallèle avec ce processus, les véhicules émettent une densité de flux radiatif infrarouge. L'intégration de cette densité de flux, tout seul, dans la résolution du bilan radiatif de surface de la route engendre une augmentation de la **TSR** de l'ordre de 2°C. Cette augmentation est surtout constatée pendant les heures de pointe.

Ainsi, les résultats de ce test de sensibilité montrent que l'intégration séparée de l'effet de masque ou de la densité de flux radiatif émise par les véhicules engendre une perturbation significative au niveau du profil de la **TSR**.



(a)

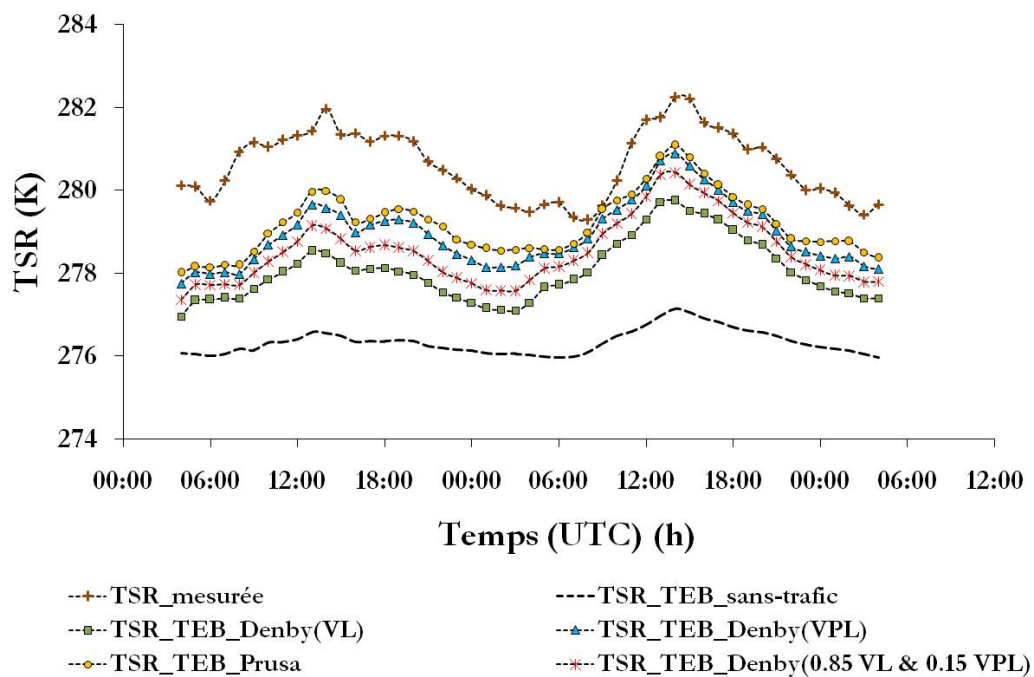


(b)

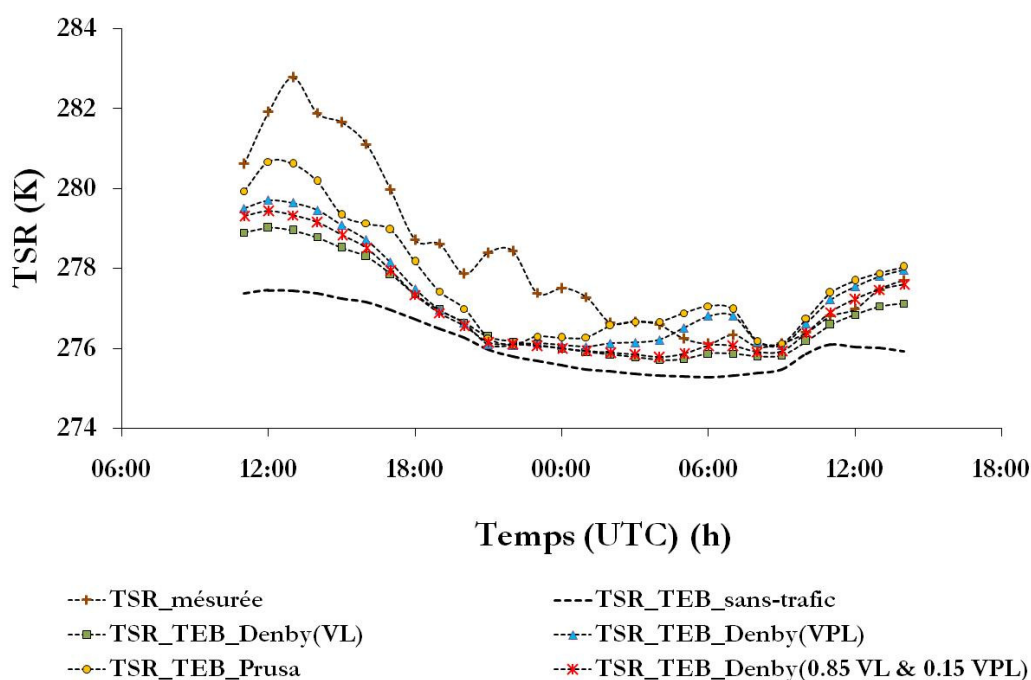
Figure 54. Impact de l'effet de masque C_{masque} et l'apport radiatif du trafic sur la TSR : amplitude de chaque processus ainsi que leurs effets combinés, (a) pour les expériences du 20 au 21 novembre 2014, et (b) du 16 au 17 décembre 2014

Les résultats de la Figure 54 indiquent que l'intégration de l'effet de masque et de la densité de flux radiatif infrarouge émise par la partie inférieure des véhicules en parallèle dans la résolution du bilan énergétique de surface de la route augmente la **TSR** de 1 à 1.5°C. Cette augmentation est d'autant plus significative que la densité du trafic est importante. Ainsi, on conclut que ces deux processus sont indissociables dans la résolution du bilan radiatif de surface de la route, contrairement aux propositions de Shao et Lister (Shao et Lister, 1996), Jacobs et Raatz (Jacobs et Raatz, 1996) et Chapman et *al.* (Chapman et *al.*, 2001a).

Dans la littérature, deux approches ont été identifiées afin d'évaluer l'impact du trafic sur la résistance aérodynamique de l'air. L'approche de Prusa et *al.* (Prusa et *al.*, 2002) repose sur l'addition d'une constante à la résistance aérodynamique de la route, représentative des impacts du trafic (équation 2.31). Celle de Denby et Sundvor (Denby et Sundvor, 2012) s'appuie sur un coefficient d'impact en fonction du type du véhicule (poids-lourds (VPL) et légers (VL)) et de la vitesse de circulation. Notre choix s'est basé sur celle de Denby en raison de son caractère explicite et de sa validation récente par le modèle NORTRIP (Denby et *al.*, 2013). Ces deux approches ont été intégrées séparément dans le modèle TEB et une analyse comparée de ses résultats a été élaborée. Les résultats sont illustrés par la figure suivante (Figure 55). $TSR_{TEB_Denby\ (VL)}$ et $TSR_{TEB_Denby\ (VPL)}$ y représentent les résultats de la modélisation de la TSR avec prise en compte de l'influence du trafic sur la résistance aérodynamique de la route selon l'approche définie par Denby et Sundvor (Denby et Sundvor, 2012) respectivement pour le cas des véhicules légers et des poids lourds. $TSR_{TEB_Denby\ (0.85\ VL\ \&\ 0.15\ VPL)}$ représente les résultats de la modélisation de la TSR avec cette même approche mais, adaptée à notre cas d'étude sur la rue Charles III. On a pris en considération le pourcentage des véhicules légers et poids lourds. TSR_{TEB_Prusa} représente les résultats de la modélisation de la TSR avec prise en compte de l'influence du trafic sur la résistance aérodynamique de la route selon l'approche définie par Prusa et *al.* (Prusa et *al.*, 2002).



(a)



(b)

Figure 55. Sensibilité de la TSR à la modification de la résistance aérodynamique de l'air et comparaison entre l'approche de Prusa et al. (2002) et celle de Denby et Sundvor (2012), (a) pour l'expérience du 20 au 21 novembre 2014, et (b) celle du 16 au 17 décembre 2014

Les résultats montrent que l'application de la méthode de Prusa et al. (Prusa et al., 2002) engendre une forte perturbation au niveau la résistance aérodynamique de la route se traduisant par une augmentation significative de la **TSR** de l'ordre de 2 à 3°C. Cette augmentation, dans le cas de la première expérience, est presque similaire aux impacts associés aux véhicules poids-lourds en appliquant l'approche de Denby et Sundvor (Denby et Sundvor, 2012). Cependant, dans le cas de la deuxième expérience, l'écart entre ces deux approches est beaucoup plus important. Il peut être expliqué par la variation de la stabilité atmosphérique entre les deux expériences. Ainsi, on peut en déduire que l'application de l'approche de Prusa et al. (Prusa et al., 2002) risque de surestimer les impacts du trafic sur la résistance aérodynamique de la route. Ceci justifie notre choix reposant sur l'approche explicite de Denby et Sundvor (Denby et Sundvor, 2012). Néanmoins, cette approche nécessite le volume des VPL et celui des VL pour déterminer l'impact cumulatif du trafic sur la résistance aérodynamique de la route. Dans notre cas d'étude, la rue Charles III est fréquentée par environ 15% de VPL et 85% de VL. Les résultats de la Figure 55 montrent que cette approche est sensible à la variation des pourcentages des VPL et VL. Les impacts du trafic sont beaucoup plus importants dans le cas d'une route à 100% VPL (représenté par la courbe de la **TSR_{TEB_Denby(VPL)}**) qu'une route à 100% VL (représenté par la courbe de la

$TSR_{TEB_Denby(VL)}$). La courbe de la $TSR_{TEB_Denby(0.85\ VL \ \& \ 0.15\ VPL)}$ représente l'amélioration apportée à la modélisation de la TSR en prenant en compte les pourcentages des VPL et VL pour notre cas de la rue Charles III. Cette amélioration est de l'ordre de 1.5 à 2°C, et change d'une expérience à une autre. Elle est plus significative dans le cas de la première expérience que pour la deuxième expérience et est attribuée à la variation de la stabilité atmosphérique entre les deux expériences.

La Figure 56 représente la contribution énergétique de la densité de flux de chaleur sensible due à l'augmentation de la vitesse du vent suite au passage des véhicules S_{va} . La Figure 57 représente la contribution thermique des densités de flux de chaleur dégagées par le moteur S_m et le système d'échappement E_{ex} .

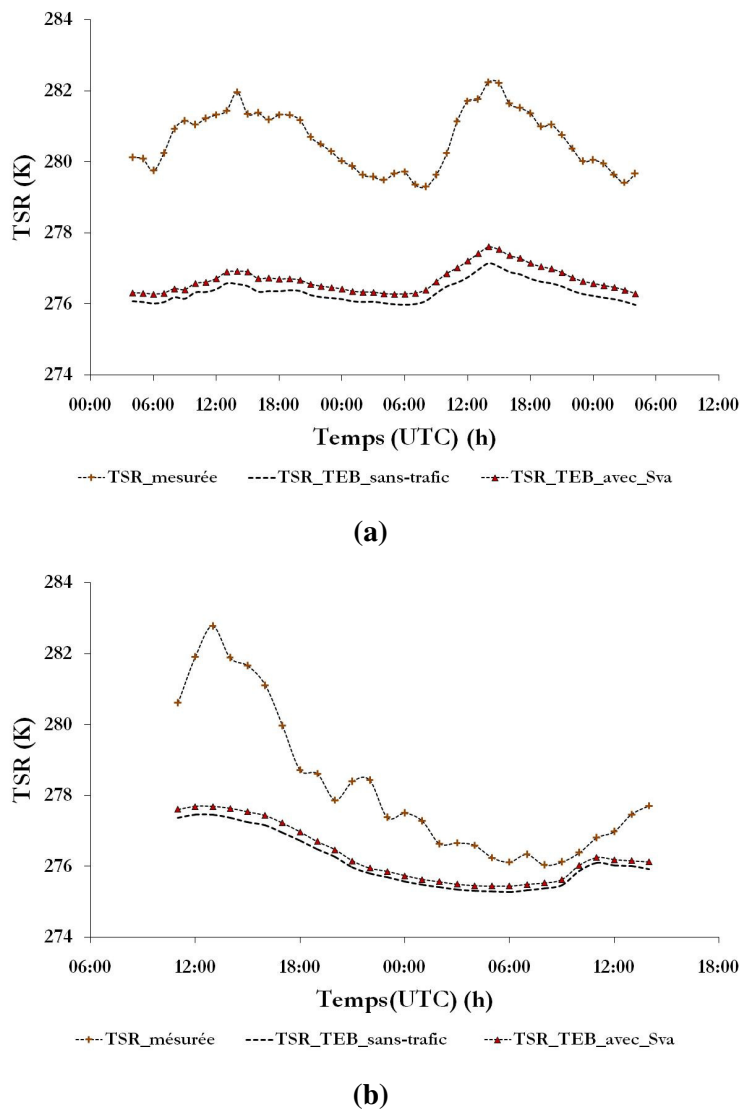
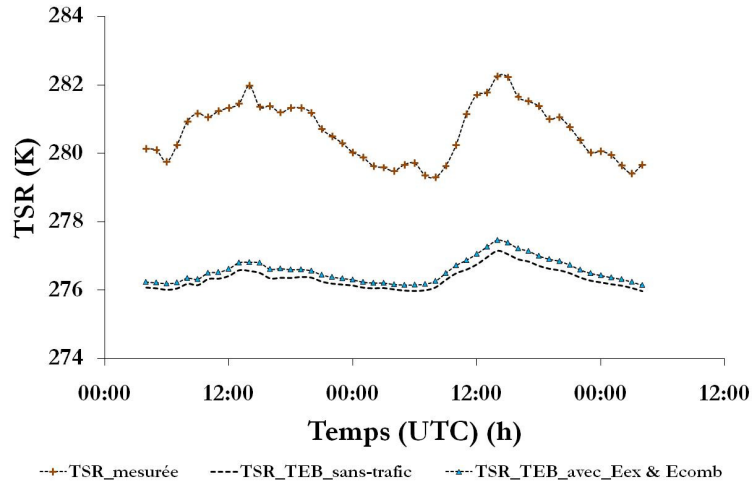
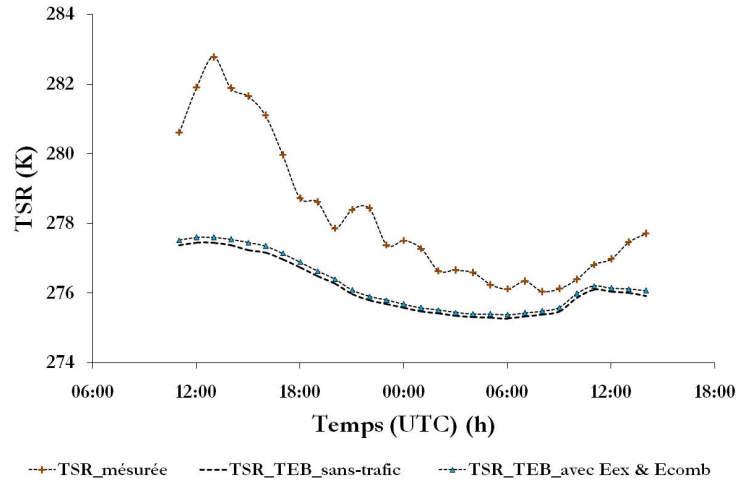


Figure 56. Apport énergétique de la densité de flux de chaleur sensible S_{va} due à l'augmentation de la vitesse du vent induit par le passage des véhicules, (a) pour les expériences du 20 au 21 novembre 2014, et (b) du 16 au 17 décembre 2014



(a)



(b)

Figure 57. Apport énergétique de la densité de flux de chaleur dégagé par le moteur E_{comb} et par le système d'échappement E_{ex} à la TSR, (a) pour les expériences du 20 au 21 novembre 2014, et (b) du 16 au 17 décembre 2014

Les résultats montrent que ces différentes densités de flux contribuent peu à l'amélioration de la **TSR**. Cependant, cela ne signifie pas que leurs contributions soient négligeables. Dans la paramétrisation de l'approche A2, ces densités de flux sont additionnées aux densités de flux turbulents du canyon (Q_{H_top} , et Q_{E_top}) (équations 3.40 et 3.41). Ceci permet de déduire que la contribution thermique de ces différentes densités de flux peut être visible et significative au niveau de la T_{air} . Ceci est illustré par la Figure 58.

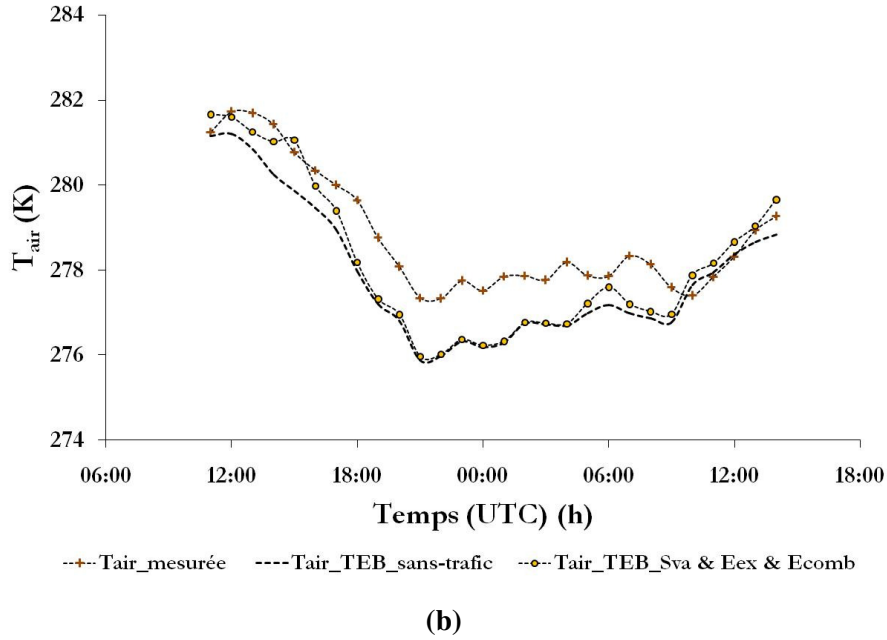
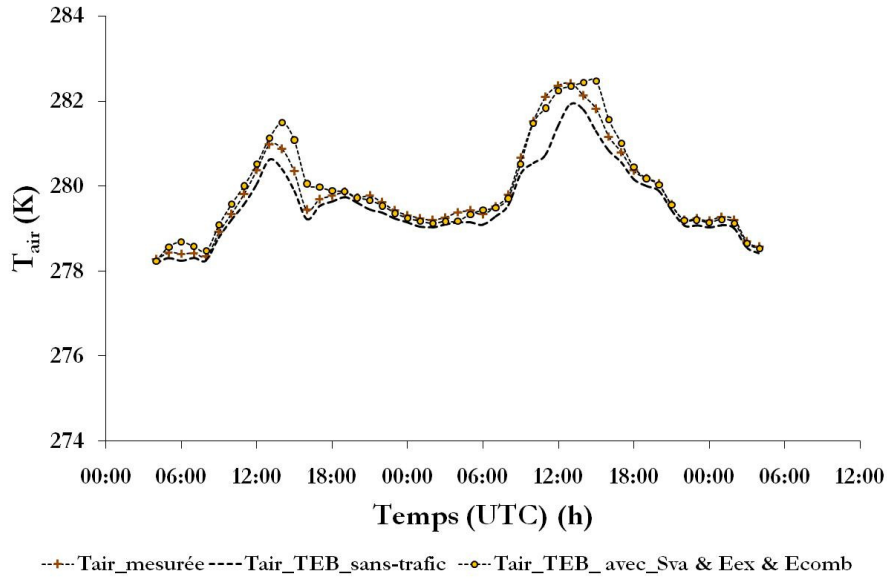


Figure 58. Apport énergétique de l'effet cumulatif des densités de flux de chaleur sensible S_{va} , du système d'échappement E_{ex} et du moteur S_m à la modélisation de la T_{air} , (a) pour les expériences du 20 au 21 novembre 2014, et (b) du 16 au 17 décembre 2014

Sur cette figure $T_{air_TEB_avec_Sva \& E_{ex} \& S_m}$ représente la modélisation de T_{air} avec la prise en compte des densités de flux de chaleur S_{va} , E_{ex} et E_{comb} . Les flux sont additionnées aux flux turbulents du canyon urbain. Leurs paramétrisations dans TEB est décrites par les équations 3.40 et 3.41. Les résultats confirment que ces densités de flux de chaleurs (S_{va} , E_{ex} , E_{comb}) contribuent à l'amélioration de la modélisation de la T_{air} . Ceci est remarquable surtout durant la journée, où la densité du trafic est significative. On constate que l'écart entre la T_{air} modélisé par TEB avec prise en compte de ces densités de flux et celle mesurée est très faible.

Ainsi, les résultats de ce test de sensibilité par rapport à T_{air} montrent que bien que la contribution thermique de ces différents flux de chaleurs sensible liés au trafic ne sont pas significatifs par rapport à la TSR , on ne peut cependant pas les négliger afin de ne pas modifier la modélisation de T_{air} .

Les résultats de cette étude de sensibilité ont montré que chacun des processus physiques associés au trafic a une contribution propre à l'amélioration de la TSR . L'analyse comparée selon le profil de la TSR indique que les processus les plus significatifs améliorant sa modélisation sont l'effet turbulent (impact sur la résistance aérodynamique de l'air), les frottements des pneumatiques et l'impact sur le bilan radiatif (effet de masque et flux radiatif infrarouge émis par le véhicule). Le moteur, le système d'échappement et la densité de flux de chaleur sensible due à l'augmentation de la vitesse du vent induit par le passage du véhicule participent également à cette amélioration mais d'une façon plus marginale par rapport aux autres processus.

4.1.2 Variation de la contribution thermique des processus physiques associés au trafic en fonction des conditions météorologiques

Les résultats de l'étude de sensibilité précédente ont montré aussi que la contribution thermique de ces différents processus varie d'une expérience à une autre. Cette variation peut être due à la variation des conditions météorologiques entre les expériences. L'objectif est d'abord d'identifier la variation de la contribution thermique de chacun des processus physiques du trafic en fonction des conditions météorologiques de l'expérience. Par la suite, il s'agit d'apprécier comment ces conditions météorologiques influencent la contribution de chaque processus par rapport aux apports cumulatifs globaux du trafic.

Afin d'évaluer la contribution thermique de chacun des processus physiques du trafic, on a défini le paramètre **Contrib**_{processus-traffic}. Il représente le pourcentage de contribution de chaque processus physique du trafic par rapport aux apports globaux cumulatifs du trafic.

$$Contrib_{processus-traffic} = 100 \left[\frac{(TSR_{TEB_processus} - TSR_{TEB_sans-traffic})}{(TSR_{TEB_A2} - TSR_{TEB_sans-traffic})} \right] \quad 3.46$$

$TSR_{TEB_processus}$ est la TSR modélisée avec TEB avec intégration de chacun des processus physiques du trafic. En se basant sur cette équation, le pourcentage de la contribution de chacun des processus physiques du trafic a été calculé et est illustré par la Figure 59 et la

Figure 60. Ils présentent respectivement les résultats de l'expérience du 20 au 21 novembre 2014 et celle du 16 au 17 décembre 2014.

Les résultats montrent qu'à l'exception des contributions du moteur et du système d'échappement ($Contrib_{Eex \& Ecomb}$) et de la densité de flux de chaleur sensible S_{va} ($Contrib_{Sva}$) presque quasi-constantes et pour les deux expériences, la contribution des autres processus varie en fonction du temps. Cette variation est liée à la fois à la variation de la densité du trafic dans la journée et aussi à la variation des conditions météorologiques.

De plus, ces résultats indiquent que l'ampleur de la contribution des processus varie d'une expérience à une autre. On constate que pour la première expérience, le processus le plus significatif à l'amélioration de la TSR est l'effet turbulent causé par la modification de la résistance aérodynamique de la route, suivi par la densité de flux radiatif et par l'effet des frottements pneumatique. Cependant, pour la deuxième expérience, le processus le plus significatif est la densité de flux radiatif et l'effet turbulent et des frottements pneumatiques ont presque les mêmes contributions avec des légères fluctuations entre ces deux processus. Cette variation de contribution des processus entre les deux expériences peut être reliée soit à la variation de la densité du trafic entre les deux expériences soit aux conditions météorologiques qui sont différents.

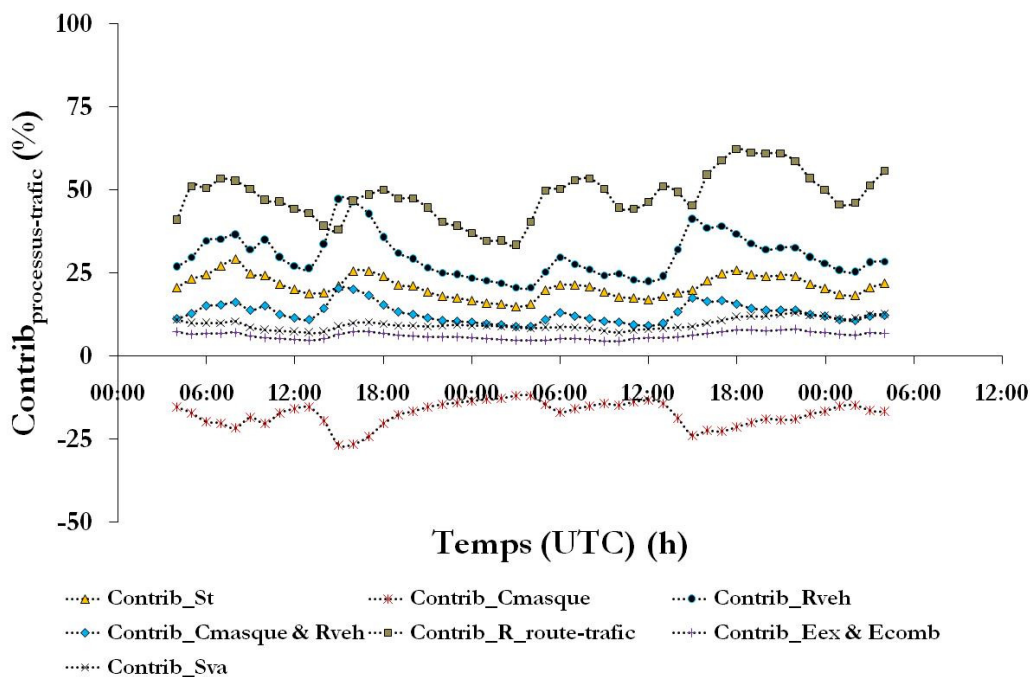


Figure 59. Pourcentage de contribution de chacun des processus physiques associés au trafic pour l'expérience du 20 au 21 novembre 2014

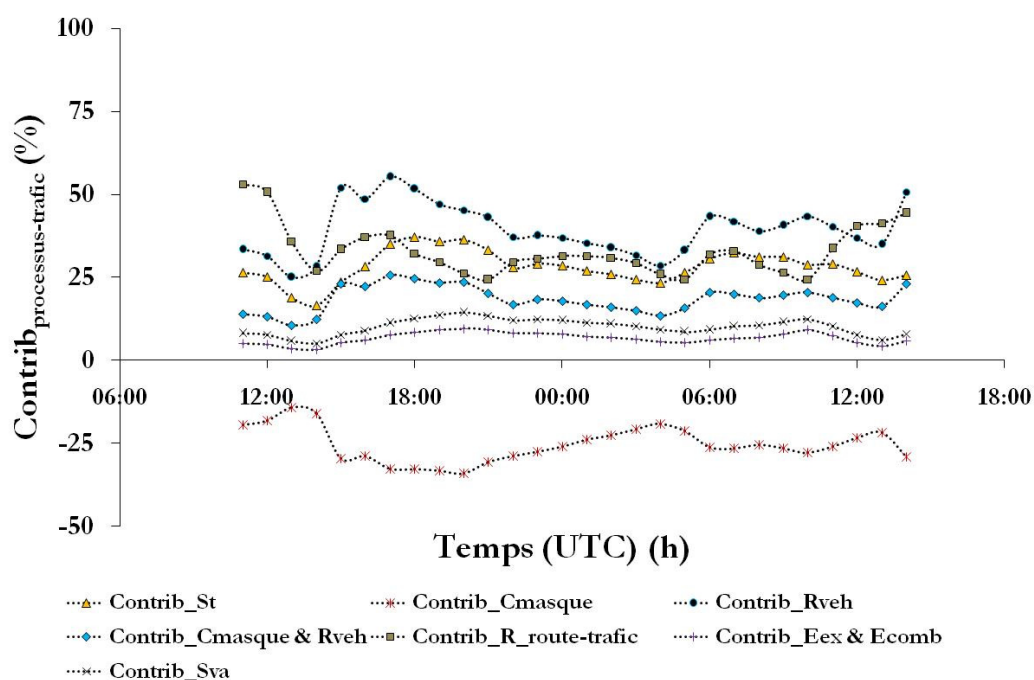


Figure 60. Pourcentage de contribution de chacun des processus physiques associés au trafic pour l'expérience du 16 au 17 décembre 2014

La Figure 61 présente les variations de la densité du trafic pour ces deux expériences. Celles-ci sont presque identiques. Ainsi, la variation des contributions des processus physiques associés au trafic peut être reliée à la variation des conditions météorologiques.

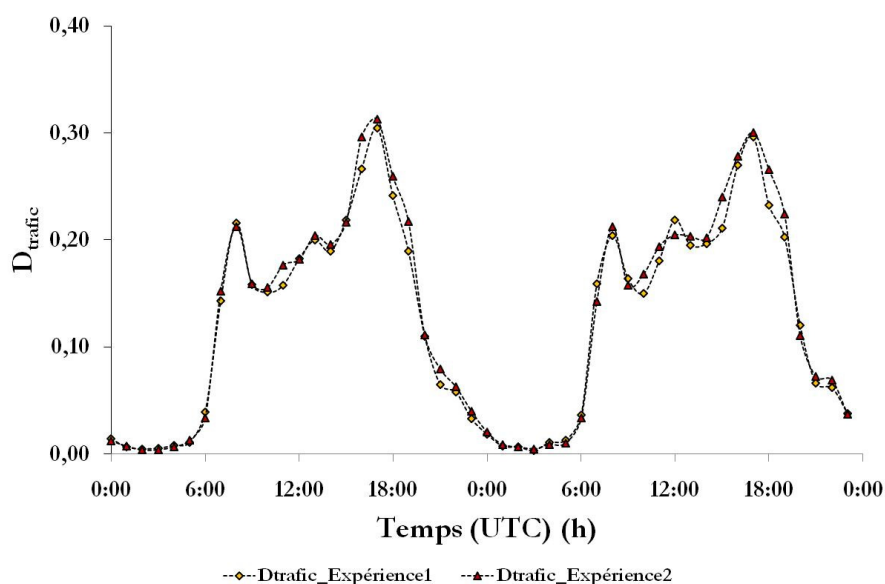


Figure 61. Variation de la densité du trafic D_{traffic} entre les deux expériences du 20 au 21 novembre 2014, et du 2 du 16 au 17 décembre 2014

Cette étude de sensibilité confirme que les processus les plus significatifs à l'amélioration de la **TSR** sont l'effet turbulent, la densité de flux radiatif émis par le véhicule ainsi que l'effet

dû aux frottements des pneumatiques. De plus, elle a montré que la contribution de ces processus varie en fonction de la densité du trafic et également en fonction des conditions météorologiques. Bien que la contribution thermique des autres processus est moins significative ils devraient être pris en considération dans la paramétrisation, car comme nous l'avons déjà montré précédemment, ils contribuent aussi à l'amélioration de la *TSR* et au maintien d'une bonne modélisation de T_{air} .

4.2 Influence de la géométrie du canyon urbain sur la modélisation de la *TSR* et de T_{air}

Dans la partie étude bibliographique, nous avons montré que le canyon urbain influence la *TSR* par sa surface d'échange, par le facteur de vue du ciel, par sa rugosité, par le comportement thermique de ses matériaux constitutifs, et par la réflexion des rayonnements solaires et terrestres (piégeage radiatif).

Les facteurs de vue du ciel, de la route et des murs sont calculés par le modèle TEB en se basant sur les dimensions de la géométrie du canyon urbain $h_{bât}$ et W_{canyon} , et sont définis par les équations 3.16 et 3.17. Ils interviennent dans la détermination des coefficients d'interaction radiatifs $PLW_{x_to_y}$ précédemment définis par les équations 3.11 à 3.15. Ces coefficients évaluent les échanges radiatifs entre les différentes composantes constitutives du canyon urbain. De même, le coefficient de rugosité est calculé en se basant sur $h_{bât}$ et sur la densité des bâtiments du canyon urbain $a_{bât}$. On déduit ainsi que la paramétrisation des processus physiques décrivant la spécificité du canyon urbain est associée à sa géométrie. Ainsi, la variation de $h_{bât}$ et/ou de $a_{bât}$ est susceptible de modifier les caractéristiques énergétiques du canyon urbain.

Notre intérêt porte essentiellement sur l'identification de l'influence de la géométrie urbaine sur la modélisation de la *TSR* et de T_{air} . Plusieurs modélisations ont été réalisées. Elles consistent à faire varier $a_{bât}$ de 0 à 0.75 avec un pas de 0.25. La géométrie spécifique de la rue Charles III de Nancy (France) correspond à une valeur de 0.695. Les résultats de ces deux types de modélisation sont illustrés par la Figure 62.

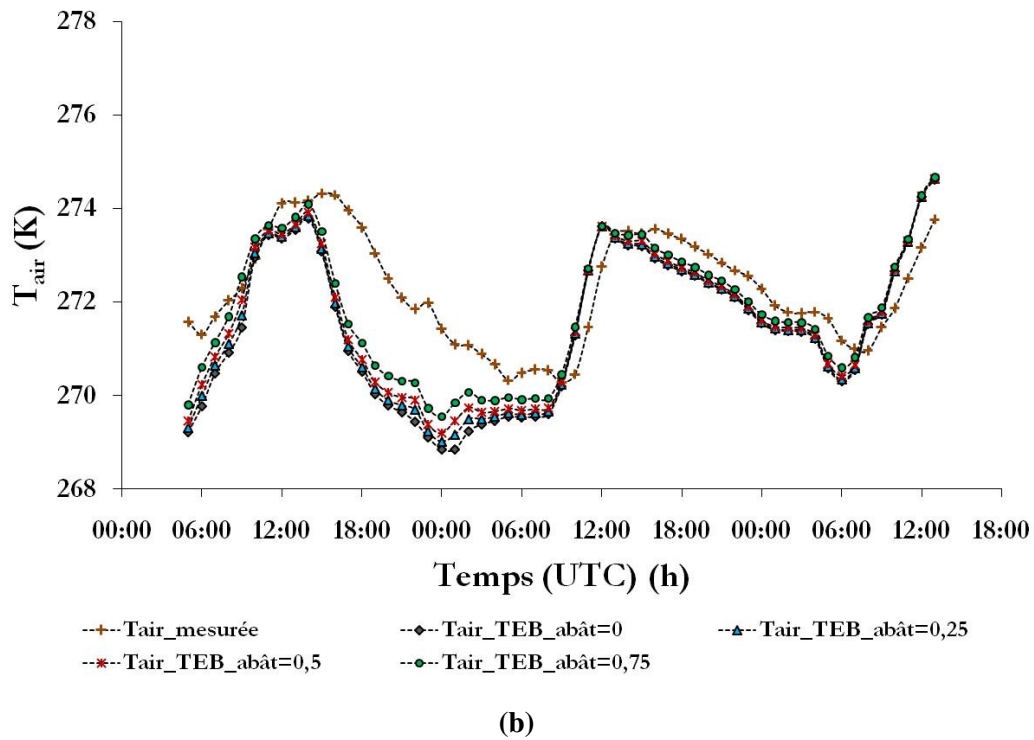
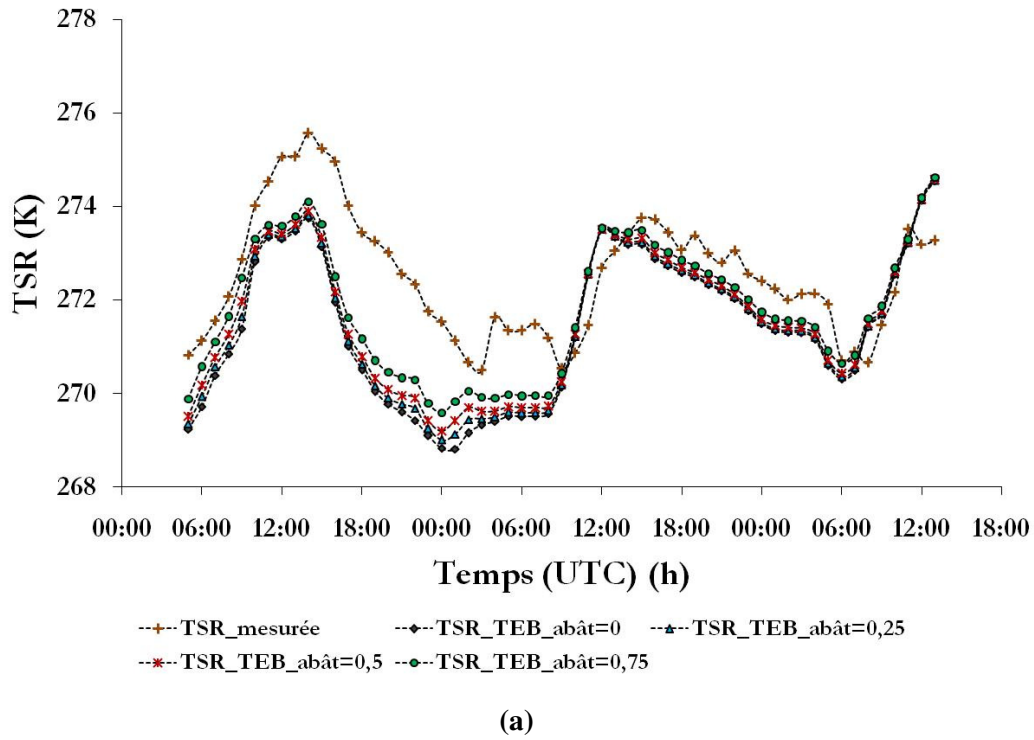


Figure 62. Influence des bâtiments sur la modélisation de (a) la TSR et (b) de T_{air} pour la troisième expérience du 04 au 06 février 2015

L'analyse comparée des résultats de la TSR sans et avec prise en compte de bâtiments, représentées respectivement sur la Figure 62 par $TSR_{TEB_A2_sans-bâtiments}$ et $TSR_{TEB_A2_avec-bâtiments}$, montre que la prise en compte des bâtiments améliore la modélisation de la TSR. Ceci montre l'influence de la géométrie urbaine sur le bilan énergétique de la surface de la route et

sur T_{air} . De plus, on constate que pour la **TSR**, l'écart de température est plus important la nuit que pendant la journée. Il est de l'ordre de 0.5°C au cours de la journée et augmente à 1°C pendant la nuit. Ceci est principalement dû aux propriétés des matériaux qui composent les bâtiments, les voies de circulations et les infrastructures. En cas de présence de bâtiments, ces derniers emmagasinent d'importantes quantités de chaleur pendant la journée et les restituent dans l'atmosphère la nuit (Giguère, 2009). La différence de T_{air} entre les deux types de modélisations s'explique également par ce même phénomène. De plus, l'écart de température entre ces deux types de modélisations est plus marqué pour la deuxième expérience en raison de la variation des conditions météorologiques.

Ainsi, les résultats de ce test de sensibilité confirment deux hypothèses. La première est que la configuration urbaine influence la modélisation du bilan énergétique de surface de la route. La deuxième traduit que le choix d'une description détaillée des différents processus conduit à une meilleure modélisation.

5 Conclusion

Le trafic automobile influence la TSR selon différents processus physiques (Prusa et *al.*, 2002). Les résultats des études expérimentales, réalisées rue Charles III à Nancy (France), ont montré que l'effet cumulatif de ces différents processus accroît la **TSR** de l'ordre de 2 à 3°C. Différentes approches ont été décrites afin d'évaluer avec précision ces apports thermiques associés au trafic. Une approche, représentant la configuration initiale du trafic dans le modèle TEB, considère les apports thermiques globaux comme une constante additionnée aux densités de flux turbulents du canyon urbain. Une première approche voisine mais, en prenant en considération la variation ces apports thermiques en fonction de la densité du trafic, a été proposée. Une autre, enfin, repose sur un concept différent, et se base sur une paramétrisation détaillée des différents processus physiques associés au trafic. Ils sont alors intégrés dans la modélisation du bilan énergétique de surface de la route et des flux turbulents du canyon urbain.

L'analyse comparée des résultats de ces différentes approches a montré que, pour des conditions hivernales, la paramétrisation détaillée du trafic dans TEB a amélioré significativement la modélisation de la **TSR** tout en préservant celle de T_{air} . Ainsi, pour notre cas d'étude, on peut déduire que l'approche basée sur la paramétrisation détaillée des

processus physiques du trafic est davantage adaptée à la modélisation de la **TSR** dans des conditions hivernales que les autres configurations.

Le trafic était intégré dans TEB pour évaluer l'impact des apports thermiques d'origine anthropique sur le confort urbain dans des conditions estivales. L'étude comparative conduite entre ces deux types de paramétrisation du trafic (globale, détaillée) a permis aussi d'identifier une configuration plus appropriée pour les études aussi bien dans des conditions hivernales qu'estivales.

Les différents tests de sensibilité effectués sur la configuration de la paramétrisation détaillée du trafic dans TEB ainsi que sur ces différents processus physiques constitutifs ont justifié la validité de cette configuration pour notre cas d'étude, et ont donné des résultats en cohérence avec les mesures de terrain. De plus, ces tests de sensibilité ont identifié les processus physiques les plus significatifs responsables de l'amélioration de la **TSR**, à savoir l'effet turbulent causé par la modification de la résistance aérodynamique de la route suite au passage des véhicules, l'impact du trafic sur le bilan radiatif de surface de la route par l'effet de masque et par l'émission d'un flux radiatif infrarouge supplémentaire et les frottements des pneumatiques. Une synthèse est proposée dans le Tableau 16 L'influence des ces différents processus dépend à la fois de la densité du trafic et des conditions météorologiques. Les autres processus du trafic participent aussi à l'amélioration de la modélisation de la **TSR** mais se doivent d'être pris en considération dans la paramétrisation du trafic dans TEB.

L'objectif principal de notre étude consiste à améliorer la prévision de l'état de surface de la route dans des conditions de circulation hivernale. Aussi, la hauteur de la lame d'eau présente en surface de la route constitue un autre paramètre et intervient également dans l'état de surface. Son étude fait l'objet du chapitre suivant.

Tableau 16. Synthèse des résultats de la paramétrisation des flux anthropiques associés au trafic dans TEB, des améliorations apportées à la modélisation de la TSR et à celle de T_{air} et contribution à la viabilité hivernale en milieu urbain

	Configuration initiale	Approche A1	Approche A2
Type de paramétrisation	Globale		Détaillée
Méthode d'intégration	Densité de flux constante additionnée aux densités de flux turbulents du canyon urbain	Densité de flux, variable en fonction des paramètres du trafic (et donc du temps), additionnée aux densités de flux turbulents du canyon urbain	Effet cumulatif des plusieurs densités de flux générées par les différents processus physiques du trafic, et additionnées à différents endroits du canyon urbain
Méthode d'évaluation	Énergie rejetée par le trafic automobile par jour, par rapport à la surface totale de la ville (Sailor et Lu, 2004)	Énergie rejeté par véhicule par pas de temps, reliée au profil horaire de la densité du trafic	Identification et évaluation des différents processus physiques du trafic : effet turbulent, effet de masque, flux radiatif, frottements des pneumatiques, chaleur et d'humidité dégagé par le moteur et le système d'échappement.
Processus influencés	Chaleur sensible du canyon urbain	Chaleur sensible et latente du canyon urbain	canyon urbain, Bilan radiatif de surface et du canyon urbain, Bilan énergétique de surface de la route, résistance aérodynamique de la

	TSR	T_{air}	TSR	T_{air}	TSR	T_{air}
Amélioration de la modélisation	<i>Fiabilité de la paramétrisation</i>					
	☹️☹️☹️	😊😊😊	☹️☹️☹️	☹️☹️☹️	😊😊😊	😊😊😊
	<i>Écart par rapport aux mesures de terrain</i>					
	4°C	0.5°C	4°C	1 à 2°C	0.5° à 1C	0.5°C
Commentaires sur l'approche	Elaborée et adaptée pour des conditions météorologiques estivales dans le cadre de l'évaluation du confort urbain et du bilan thermique globale en ville. Se prête moins à des conditions météorologiques hivernales, surtout pour l'étude de la TSR		Elle a permis d'étudier les limites de la configuration initiale du trafic dans TEB (une augmentation de la densité de flux en journée ne suffit pas à compenser l'écart, et perturbe la modélisation de Tair), d'apprécier la nécessité de la prise en compte de ses paramètres (densité, vitesse de circulation, etc.) dans l'évaluation de ses apports thermiques et de réfléchir à une paramétrisation plus adaptée		Approche a permis d'apprécier les différents processus physiques du trafic, d'intégrer une paramétrisation adaptée aux conditions climatiques hivernale et d'améliorer significativement la modélisation de la TSR tout en préservant celle de Tair.	
Apport à la viabilité hivernale (relatif aux résultats de la TSR)	Écart de température trop significatif ➡ Opérations d'entretien des routes non optimisées et inadaptées Impacts économiques et risques environnementaux actuels toujours présents à évaluer		Écart de température réduit, proche de l'incertitude des instruments de mesures ➡ Optimisation des décisions de la mise en œuvre des opérations d'entretiens et contribution à l'inflexion des impacts associés			

CHAPITRE 4

Impact de la lame d'eau présente en surface sur la *TSR*

Chapitre 4 : Impact de la lame d'eau présente en surface sur la *TSR*

L'État de Surface de la Route (ESR) est le résultat du déroulement d'interactions entre plusieurs processus physiques, énergétique, aérodynamique et hydrologique. Ainsi, une bonne évaluation des bilans d'eau et d'énergie à la surface de la route ainsi que des flux associés est nécessaire pour la modélisation de son état. Dans cette optique, la connaissance des processus intervenant à petite échelle permet également d'améliorer sa modélisation. Précédemment, on a montré que les processus physiques spécifiques au microclimat urbain influencent significativement la *TSR*. L'étude bibliographique ainsi que les résultats des expériences entreprises ont montré que le flux de chaleur d'origine anthropique associé au trafic automobile augmente la *TSR* de quelques degrés. De plus, la prise en compte de ce flux dans la modélisation du bilan énergétique de surface de la route a amélioré significativement la *TSR*.

Les bilans énergétiques et hydriques sont couplés par le biais d'un même processus, représenté par l'évapotranspiration dans le bilan hydrologique et par le flux de chaleur latente dans le bilan énergétique. Par conséquent, les modifications qui affectent les paramétrisations du bilan hydrique sont susceptibles de perturber le bilan d'énergie, et réciproquement. Dans cette perspective, on souhaite ici analyser l'influence de la lame d'eau présente en surface sur la modélisation de la *TSR*, et également identifier et évaluer l'impact des processus physiques d'origine anthropique sur cet état hydrique. À cet égard, le couplage entre les bilans énergétique et hydrologique est nécessaire, avec une description explicite des processus physiques affectant l'ESR (Andrieux et *al.*, 2006 ; Kane et Do, 2011 ; Denby et *al.*, 2013 ; Fujimoto et *al.*, 2014).

Les processus thermiques spécifiques au milieu urbain évoqués dans TEB sont complets (Masson, 2000 ; Masson et *al.*, 2013). Avoir également, dans ce modèle, une représentation réaliste du cycle hydrologique global urbain constitue un enjeu crucial et fait partie des étapes nécessaires pour mieux modéliser l'ESR.

Au cours de ces dernières années, le modèle TEB a connu différentes évolutions, afin d'évaluer différentes stratégies d'adaptation au changement climatique, en lien en particulier avec l'effet d'îlot de chaleur. Ainsi, une version végétalisée de TEB (TEB-Veg, Lemonsu et

al., 2012) compte un compartiment supplémentaire dans la rue canyon (jardin) en plus des compartiments existants (bâti et voirie). Cela permet de prendre en compte les effets thermiques et radiatifs de la végétation dans la rue et du bâti sur la végétation. Dans le cadre du projet VegDUD, le sol sous le bâti et la voirie, ainsi que certains processus hydrologiques spécifiques au milieu urbain ont été ajoutés à la version végétalisée de TEB (TEB-Hydro), permettant ainsi un cycle hydrologique urbain plus complet (Chancibault et *al.*, 2014).

Dans la première partie de ce chapitre, nous présenterons un état de l'art non exhaustif sur les différentes approches identifiées dans la littérature décrivant les interactions entre les bilans énergétique et hydrique ainsi que l'évolution de ces interactions avec les avancées. Ensuite nous décrirons le concept du bilan hydrique dans TEB et son évolution vers TEB-Hydro. Dans la troisième partie nous analyserons l'influence de la lame d'eau présente en surface sur la **TSR**. Enfin, les impacts des facteurs anthropiques tels que le trafic et l'adjonction de fondants routiers sur la lame d'eau présente en surface seront décrits et discutés. Les processus liés à ces deux facteurs seront décrits sous forme de perspectives dans la dernière partie de ce chapitre.

1 Évolution des interactions hydro-énergétiques en milieu urbain

Les processus physiques thermiques, aérodynamiques et hydrologiques impliqués dans le microclimat urbain ne peuvent être considérés indépendamment. Néanmoins, ces interactions sont souvent négligées ou simplifiées. Nous identifions ainsi trois grandes familles de modèles : hydrologiques, aérauliques et énergétiques. Tous ont beaucoup évolué, pour s'adapter aux nouvelles hypothèses d'aménagement urbain et représentent les interactions physiques soit en les intégrant directement dans les modèles existants, soit en réalisant des couplages entre modèles spécialisés. Dans le cadre de la présente étude, nous nous intéresserons à l'évolution des interactions entre les bilans énergétique et hydrique en milieu urbain.

Les approches « classiques » de modélisation hydrologique ont souvent été axées sur la représentation hydraulique des écoulements. L'objectif était de simuler des phénomènes exceptionnels tels que les crues urbaines, et/ou le dimensionnement des ouvrages d'assainissement (réseaux, bassins de rétention). Depuis une dizaine d'années, ces approches ont évolué au profit de modèles privilégiant une représentation plus détaillée du cycle de l'eau, en particulier du comportement hydrique du sol et de la surface urbaine. Cette évolution

est liée aux nouvelles orientations de la gestion des eaux pluviales en ville, favorisant leur infiltration, le stockage local et la restitution vers l'atmosphère par évapotranspiration, à travers les techniques alternatives d'aménagement urbain (noues, toitures végétalisées, matériaux poreux, création de surfaces en eau au cœur des quartiers). Celles-ci permettent non seulement de réduire les volumes d'eau de pluie ruisselés à l'exutoire, mais participent également à un rafraîchissement de l'atmosphère urbaine (Mitchell et *al.*, 2008 ; Nakayama et Fujita, 2010). Différentes approches de modélisation ont été développées pour affiner cette représentation détaillée du cycle de l'eau en milieu urbain, caractérisé par une forte hétérogénéité de matériaux et de fonctionnements hydriques associés (surfaces minérales, surfaces végétalisées, etc.).

Au départ, les modèles hydrologiques utilisés en milieu urbain s'appuyaient sur une paramétrisation sommaire des flux d'évapotranspiration, et séparaient le flux d'évaporation de la surface du sol de celui de transpiration par la végétation. Le flux d'évaporation réelle y est estimé comme une fraction de l'évapotranspiration potentielle (ETP), proportionnellement au stock d'eau contenu dans le réservoir de surface du sol (Mitchell et *al.*, 2001 ; Rodriguez, 2008). Cette paramétrisation est réalisée sans tenir compte du réchauffement potentiel des surfaces minérales urbaines sur le flux d'évaporation. Le flux de transpiration est estimé sur les parties non imperméabilisées à partir de la connaissance de l'humidité du sol et de l'ETP, selon des paramétrisations inspirées des travaux de modélisation portant sur l'hydrologie rurale (Mitchell et *al.*, 2001 ; Feddes et *al.*, 2001). Ces paramétrisations hydrologiques permettent de s'affranchir de l'utilisation des données et des paramètres microclimatiques (température, humidité, profils du vent, etc.).

Les approches « hydro-énergétiques » associent la simulation conjointe du bilan énergétique et du bilan hydrologique pour mieux représenter les flux hydriques à la surface. Dans une approche simplifiée, Xiao et *al.* (Xiao et *al.*, 2007) présentent un modèle hydrologique dans lequel l'ETP est estimée à partir d'une modification de l'équation de Penman (Monteith, 1965, 1985 ; Gavin et Agnew, 2003), en utilisant les données de rayonnement net, de température de l'air, de vitesse du vent à 2 m et de pression de vapeur saturante. L'évapotranspiration réelle est ensuite déduite de cette ETP de la même façon que dans les modèles cités précédemment. Ce modèle est particulièrement utilisé pour tester l'impact de techniques alternatives à l'échelle du quartier et peut aider les aménageurs à comparer leur efficacité vis-à-vis de la modification du bilan hydrique.

Dans des approches plus élaborées, les bilans hydrique et énergétique sont simulés de façon couplée. À titre d'exemple on peut citer le modèle WEP (Water and Energy transfer Process) (Jea et *al.*, 2001), NICE-URBAN (Nakayama et Fujita, 2010), et également TEB-Hydro (Masson, 2000 ; Masson et *al.* 2013 ; Chancibault et *al.*, 2014). Cette approche innovante de modélisation couplée permet de simuler l'effet des nouvelles techniques urbaines des points de vue hydrique et énergétique. En effet, son application, évaluée à une échelle réduite, montre que l'utilisation de matériaux poreux stockant l'eau (chaussées et/ou enrobés drainants) à la place de matériaux plus classiques (enrobés bitumineux ou béton) permet, tant qu'ils conservent une teneur en eau assez élevée, de diminuer non seulement leur température de surface, mais aussi la température à leur aplomb de quelques degrés par rapport à des matériaux classiques (Feddes et *al.*, 2001 ; Mitchell et *al.*, 2008; Nakayama et Fujita, 2010). Comme précédemment, ce type d'analyse n'est pas possible avec les approches de modélisation hydrologique « classique ». L'évolution des outils de modélisation hydrologique permet ainsi d'évaluer l'interaction thermique ainsi que l'influence de la lame d'eau présente en surface sur la modélisation de la *TSR*.

2 Concept du bilan hydrique dans TEB : de TEB à TEB-Hydro

2.1 Spécificité du bilan hydrologique en milieu urbain

Le bilan hydrologique (ou bilan de masse) traduit la partition de l'ensemble des précipitations arrivant à la surface du sol entre le ruissellement de surface, l'évaporation, l'infiltration dans le sol et le stockage en surface. En revanche, dans les zones urbaines, les éléments anthropiques qui affectent le cycle hydrologique sont nombreux, et parmi eux on trouve les surfaces imperméabilisées et le réseau d'assainissement qui présentent les effets les plus significatifs (Dupont et *al.*, 2006 ; Rodriguez et *al.*, 2008). En effet, les modifications entraînées par ces aménagements ne provoquent pas l'apparition ou la disparition de processus physiques mais affectent le rôle et l'importance hydrologique de chacun d'entre eux. En effet, en raison de l'imperméabilisation de la surface urbaine, le ruissellement de surface aura un rôle plus important qu'en milieu naturel (Butler et Davies, 2004). Ceci est illustré par la Figure 63 présentant l'effet de l'imperméabilisation sur les eaux pluviales et le bilan hydrologique.

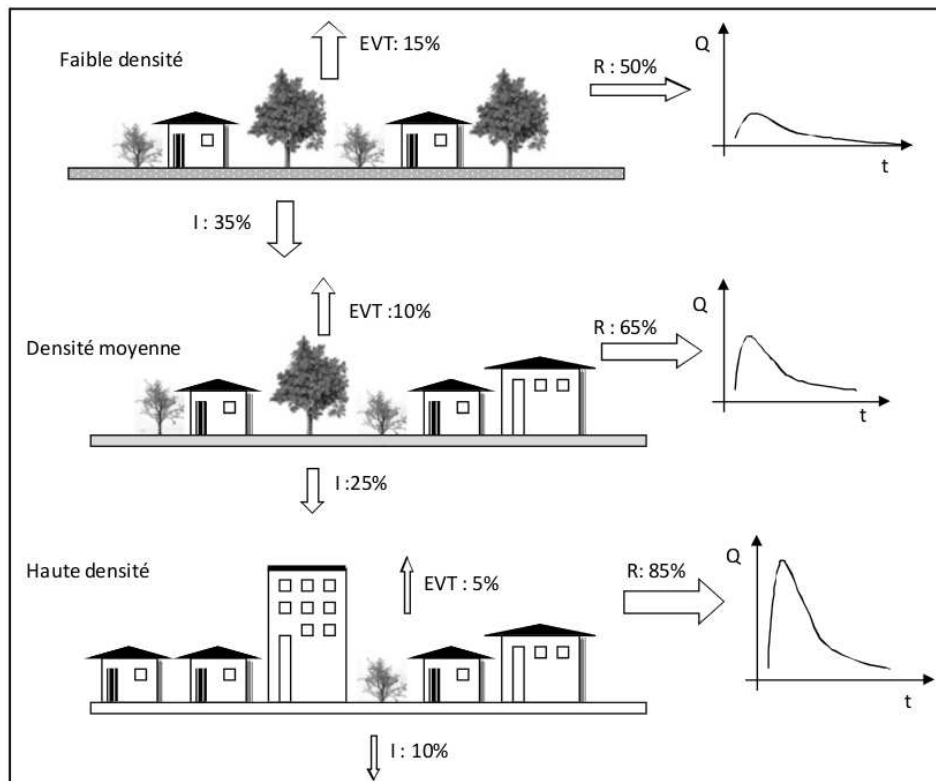


Figure 63. Effet de l'imperméabilisation sur les eaux pluviales et le bilan hydrologique entre différents milieux (rural (haut), périurbain (milieu) et urbain (bas)) définis par la densité de bâti (Butler et Davies, 2004).

Le taux de ruissellement R croît avec la densité des surfaces imperméabilisées. En revanche, l'infiltration I est beaucoup plus importante en milieu rural. On peut souligner également la réduction de l'évapotranspiration à cause de la diminution de la couverture végétale (Dow et DeWalle, 2000). Le rôle de ce processus est souvent négligé par l'hydrologie en milieu urbain et est supposé plus faible qu'en milieu naturel, de par l'imperméabilisation.

Cette forte imperméabilisation des sols entraîne une sollicitation de plus en plus significative du réseau d'assainissement (drainage), traduite par le transport de grands volumes d'eau pendant et/ou après les événements pluvieux. De plus, des travaux ont montré l'importance des infiltrations d'eau du sol dans les réseaux d'assainissement par leurs défauts d'étanchéité (Joannis, 1993). Ces infiltrations, qui contribuent directement au débit dans les réseaux d'assainissement, dépendent, entre autres, du niveau de saturation du sol. Les différents réseaux d'assainissement parcourant la ville y sont soumis (unitaire, ou séparatif (eaux usées et eau pluviale)). L'étude réalisée par Dupasquier (Dupasquier, 1999) a ainsi montré que l'eau drainée par le réseau d'eau pluviale représente 30% des précipitations et celle drainée par le réseau d'eaux usées (les infiltrations parasites qui sortent du système) est de l'ordre de 16% en

été et de 25% en hiver. Ainsi, on constate que le réseau du système d'assainissement modifie l'état hydrique du sol.

Toutes ces observations montrent que le bilan hydrologique en milieu urbain est complexe, et la prise en compte de tous ces processus est évidente afin de mieux représenter l'ESR. Dès lors, le modèle TEB (Masson, 2000) a beaucoup évolué afin de prendre en compte les différents processus évoqués précédemment, permettant d'avoir une meilleure évaluation du bilan hydrologique en milieu urbain.

2.2 Configuration initiale du bilan hydrologique dans TEB

Dans la version initiale du modèle TEB (Masson, 2000, Lemnsu et *al.*, 2002), les processus hydrologiques liés aux surfaces artificialisées (bâtis et voiries) sont modélisés de façon simple en se basant sur deux hypothèses. La première considère que les échanges en eau se limitent à la surface, et qu'il n'existe pas de sous-sol urbain d'un point de vue hydrologique. La seconde suppose que les surfaces « bâtis » et « voiries » sont parfaitement imperméables, et que l'intégralité du ruissellement de surface est un terme « puits » du modèle qui n'est pas conservé. Ainsi, dans le modèle TEB, les compartiments bâtis et voiries peuvent intercepter l'eau de pluie et possèdent chacun un réservoir de surface, dont l'équation d'évolution est décrite comme suit :

$$\frac{\Delta W_s^*}{\Delta t} = P^* - E^* - R_{off}^* \quad 4.1$$

W_s^* est le réservoir de surface (mm), et le symbole * en exposant fait référence soit aux bâtis, soit aux voiries. P^* est le taux de précipitation intercepté par la surface (mm/s). E^* est le flux d'évaporation (mm/s) et R_{off}^* le ruissellement de surface (mm/s). Ces paramètres sont donc particulièrement importants car l'ESR se définit à partir des hauteurs d'eau en surface (sec en absence d'eau, humide à partir d'une épaisseur du film d'eau de 0,01 mm, mouillé à partir d'une épaisseur du film d'eau de 0,2 mm, et ruisselant à partir d'une épaisseur du film d'eau de 2 mm). Ces épaisseurs sont données au-dessus du capteur qui effectue la mesure (au sens de la norme européenne EN 15518-3), surface de rugosité plus faible que celle de voiries. Cependant, la partie relative au ruissellement sur les voiries constitue celle sur laquelle le focus est réalisé. En effet, la perte en eau et donc en fondants routiers éventuellement présents s'effectue à ce niveau, et la modification de la température de transition de phase de cette eau dépendra de sa concentration en fondants routiers.

L'évaporation peut s'établir dès que l'eau est disponible dans le réservoir, alors que le ruissellement de surface intervient uniquement lorsque le contenu en eau du réservoir dépasse sa capacité maximale de stockage $W_{s,max}^*$ (mm), paramètre d'entrée du modèle. Selon cette configuration, toute l'eau excédentaire quitte alors le système. Dans le cas des voiries, ce paramètre peut s'ajuster en fonction de la nature du revêtement de la route.

2.3 De TEB à TEB-Hydro

Pour satisfaire au mieux les nécessités des aménagements urbains, de multiples améliorations ont été intégrées dans le modèle TEB (Hamdi et Masson, 2008 ; Masson et Seity, 2009 ; Pigeon et *al.*, 2012 ; Lemonsu et *al.*, 2012 ; Bueno et *al.*, 2012, 2013). Ces développements supplémentaires ont été ajoutés sous forme de modules. Ils permettent à l'utilisateur qui le souhaite de calculer des paramètres additionnels et de prendre en compte des processus spécifiques.

Dans le cadre du projet VegDUD, des améliorations ont été intégrées dans TEB afin de mieux prendre en compte les interactions entre la végétation et la rue canyon. Cette nouvelle version, dénommée TEB-Veg (Lemonsu et *al.*, 2012), intègre explicitement les jardins dans la rue canyon pour mieux prendre en compte les interactions énergétiques entre trois compartiments différents (bâti, voiries et jardin). En effet, la version originale du modèle TEB (Masson, 2000) n'était appliquée que pour les surfaces bâties. TEB était simplement couplé avec le modèle ISBA (Noilhan et Planton, 1989 ; Boone, 2000 ; Decharme et *al.*, 2011) pour la modélisation de la végétation des zones résidentielles. Néanmoins, les flux de surface de la zone étudiée étaient calculés indépendamment par chaque schéma de surface avant d'être agrégés au prorata de la fraction occupée par chaque type d'occupation des sols. Cela ne permettait pas de décrire les interactions entre les bâtis et la végétation.

Avec le modèle TEB-Veg, les processus ayant lieu au sein du jardin sont gérés avec le modèle ISBA-DF (Boone, 2000) mais, tout en prenant en compte des interactions thermiques entre la végétation et le bâti. La végétation est traitée en tenant compte des conditions atmosphériques à l'intérieur de la rue canyon et de l'effet d'ombrage des bâtiments. Parallèlement, les variables microclimatiques et les bilans radiatifs et thermiques à l'intérieur du canyon sont calculés en tenant compte de la contribution de la végétation. Cette nouvelle version de TEB permet ainsi d'étudier les solutions d'adaptation au changement climatique basées sur l'introduction de la végétation en milieu urbain.

Récemment, en continuité avec ces travaux et dans le cadre d'une collaboration entre le CNRM-Game de Météo-France et l'IFSTTAR dans le cadre des projets Ville Numérique (Projet DRI, 2010-2013) et VegDud (Projet ANR, 2010-2013), la configuration initiale du bilan hydrologique de TEB a été améliorée. Cette nouvelle version, dénommée TEB-Hydro (Chancibault et *al.*, 2014), est développée au sein du module TEB-Veg en introduisant des processus hydriques visant à mieux représenter le cycle hydrologique en milieu urbain. Les phénomènes de surface ont été complétés en discrétisant les couches de sol, en incluant le processus d'infiltration de l'eau dans la voirie, en intégrant le réseau d'assainissement et en prenant en considération les infiltrations parasites de ce réseau, et en homogénéisant également le contenu en eau dans le sol entre les différents compartiments d'une même maille. Dans ce qui suit, nous présenterons un état de l'art non exhaustif au travers de quelques unes des différentes améliorations intégrées au modèle TEB-Hydro.

2.3.1 Discrétisation des couches du sous-sol

La configuration initiale de TEB considère que les échanges en eaux se limitent aux échanges en surface, et qu'il n'existe pas de sous-sol urbain d'un point de vue hydrologique (Figure 64a). La version TEB-Veg a permis l'introduction du sol sous le compartiment jardin. Le même sol a donc été ajouté sous les compartiments bâtis et voiries.

Sous le compartiment jardin, le sol est déjà pris en compte à l'aide du schéma ISBA (Lemonsu et *al.*, 2012) qui résout les processus thermiques et hydriques. Compte tenu de la structure verticale très complexe du sous-sol en milieu urbain, le modèle TEB-Hydro s'est basé sur la version ISBA-DF (Boone, 2000), permettant une discrétisation très fine de la colonne de sol, qui résout la diffusion verticale de façon explicite. Dans les compartiments voirie et bâti, le sol et les processus hydriques et thermiques sont désormais résolus selon les mêmes procédures mises en place dans ISBA-DF.

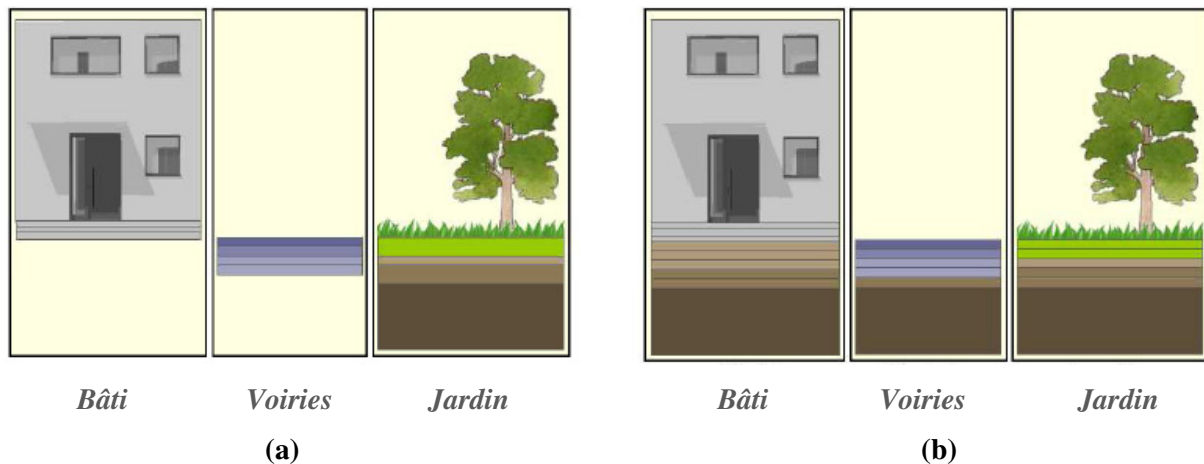


Figure 64. Discretisation du sol telle que prescrite par l'utilisateur pour la voirie est fonction du type de végétation pour les jardins (a) et telle qu'homogénéisée par le modèle (b)

Pour rendre cohérent le fonctionnement de TEB-Hydro, une discrétisation automatique et homogène du sol a été développée. La discrétisation finale du sol est contrainte par celle prescrite initialement par l'utilisateur pour le compartiment voiries pour les premières couches de sol, puis par celle du compartiment jardin en dessous (Figure 64b), et étendue ensuite sous le compartiment bâti.

Si les caractéristiques hydrodynamiques des différentes couches constituant le sol sous les voiries et les bâtiments sont connues, il est alors possible de les imposer. Cependant, en milieu urbain, différents matériaux peuvent être utilisés, pour une route ou une autre. Il est difficile de les connaître, en particulier leurs épaisseurs, ainsi que leurs différentes caractéristiques aussi bien thermiques qu'hydriques. De plus, au sein d'une même ville, une hétérogénéité existe aussi. C'est pourquoi, il a été prévu de pouvoir déterminer ces paramètres, à partir d'une texture donnée des premières couches de sol sous voiries et sous bâti, permettant d'obtenir des valeurs cohérentes des paramètres hydriques avec la bibliographie. Ces paramètres sont le contenu en eau du sol à la saturation W_{SAT} , le contenu en eau du sol à la capacité au champ W_{FC} , le contenu en eau du sol au point de flétrissement W_{WILT} , la conductivité hydraulique à saturation K_{SAT} , le coefficient de rétention de l'eau liquide (-) et le potentiel hydrique à saturation Ψ_{SAT} .

2.3.2 Prise en compte de l'infiltration dans la voirie

Selon la seconde hypothèse indiquée par Masson (Masson, 2000), la configuration initiale du modèle TEB suppose que les surfaces des compartiments bâtis et voiries sont parfaitement imperméables et l'intégralité du ruissellement de surface rejoint le réseau d'assainissement. Néanmoins, les observations ont montré que les voiries sont perméables, et une certaine

quantité d'eau s'infiltré à travers la structure de la chaussée. Cette quantité dépend des caractéristiques et de la nature de matériels constitutifs (Bentarzi et *al.*, 2010). Ce processus d'infiltration a été ainsi pris en compte par le modèle TEB-Hydro.

Berthier (Berthier, 1999) a indiqué dans son étude que le taux de raccordement des surfaces imperméables en ville est de l'ordre de 85%. Cette donnée est justifiée également par les données des services collectifs d'eau et d'assainissement en France indiquant que le taux de raccordement des toits des bâtiments aux réseaux d'assainissement varie d'une ville à une autre, et n'est pas total. De même, TEB-Hydro a pris en considération ce facteur et a additionné le flux de ces eaux excédentaires au bilan hydrique de surface de la route.

Ainsi, l'équation d'évolution des contenus en eau en surface du compartiment voiries (équation 4.1) a donc été modifiée pour tenir compte de ces deux processus. On aboutit à l'équation suivante :

$$\frac{\Delta W_s^{route}}{\Delta t} = P^{route} - E^{route} - R_{off}^{route} - I^{route} \quad 4.2$$

P^{route} , E^{route} désignent respectivement le taux de précipitation intercepté par la surface de la route et le flux d'évaporation (mm/s). R_{off}^{route} est le ruissellement de la surface de la route (mm/s). I^{route} (mm/s) est le taux d'infiltration à travers la voirie défini par les équations suivantes :

$$I^{route} = K^{route} \quad \text{si } W_s^{route} > K^{route} \Delta t \quad 4.3$$

$$I^{route} = \frac{W_s^{route}}{\Delta t} \quad \text{sinon} \quad 4.4$$

K^{route} (mm/s) est le taux d'infiltration à travers la voirie (à spécifier par l'utilisateur aussi ou à caler). C_{sew} est le taux de raccordement des surfaces imperméabilisées au réseau d'assainissement. Il est à caler ou à déterminer à partir des données issues de la bibliographie. Le calcul de ruissellement sur les voiries R_{off}^{route} n'est pas modifié, et est exprimé par les équations suivantes, modulé comme pour les toitures par le taux de raccordement des surfaces imperméabilisées :

$$R_{off}^{route} = \frac{(W_s^{route} - W_{s,max}^{route})}{\Delta t} \quad \text{si } W_s^{route} > W_{s,max}^{route} \quad 4.5$$

$$R_{off}^{route} = 0 \quad \text{sinon} \quad 4.6$$

2.3.3 Prise en compte des infiltrations parasites du réseau d'assainissement

Le réseau d'assainissement transfère l'eau ruisselée en surface vers un exutoire. Le réseau draine aussi l'eau du sol, le long de la tranchée dans laquelle il est posé, mais aussi par infiltration dans les conduites à cause des défauts d'étanchéité (Dupasquier, 1999). Différentes approches ont été identifiées et testées pour évaluer ces infiltrations parasites dans le réseau. Par la suite, celle de Furusho et *al.* (Furusho, 2011) a été retenue. Elle considère que les infiltrations parasites n'ont lieu que lorsque le contenu en eau de la couche du sol où se trouve le réseau dépasse une valeur seuil égale à la capacité au champ (Furusho et *al.*, 2014) ou au point de flétrissement (Chancibault et *al.*, 2014). Ainsi le taux d'infiltration parasite dans le réseau est décrit par la relation suivante :

$$INF_{sew} = K_{sat} I_p^{sew} \frac{L_{sew}^{maille}}{L_{sew}^{max}} \frac{W_{res}}{W_{sat}} \quad \text{si } W_{res} > W_{seuil} \quad 4.7$$

INF_{sew} désigne le taux d'infiltration parasite dans les réseaux (m^3/s), K_{sat} la conductivité hydraulique à saturation de la couche de sol où se trouve le réseau d'assainissement (m/s), I_p^{sew} un paramètre sans dimension à caler représentant notamment la qualité de l'étanchéité des réseaux, L_{sew}^{maille} et L_{sew}^{max} la longueur de réseau respectivement, dans la maille de TEB-Hydro en cours de traitement et dans la maille où cette longueur est maximale sur l'ensemble de la zone d'étude (m). W_{res} est le contenu en eau du sol (m^3/m^3) dans la couche du sol où se situe le réseau d'assainissement, W_{sat} le contenu en eau du sol à saturation (m^3/m^3) et W_{seuil} est le contenu en eau du sol seuil. Lorsque le contenu en eau du sol, où se trouve la canalisation, est inférieur à W_{seuil} , aucune infiltration parasite n'est considérée ($INF_{sew}=0$).

2.3.4 Homogénéisation des contenus en eau du sol

La configuration sélectionnée nécessite de mettre en œuvre une homogénéisation des contenus en eau du sol entre ces différents compartiments (jardin, voiries et bâti). Les contenus en eau sont calculés d'abord indépendamment par compartiment en supposant, néanmoins, l'existence d'échanges latéraux entre ces compartiments. Afin d'en tenir compte

au sein d'une maille du modèle, les contenus en eau du sol des différentes couches sont ensuite homogénéisés à l'échelle de la maille par un procédé similaire à celui utilisé pour homogénéiser les températures des couches de sol (Boone, 2000 ; Decharme et *al.*, 2011). Ainsi, un rappel à la moyenne est implémenté pour chaque couche de la maille, et le contenu moyen en eau pour chacune de ces couches et pour chaque compartiment (bâti, voiries, jardin) est exprimé par l'équation suivante :

$$\frac{dW^{comp}}{dt} = (W_{ind}^{comp} - W_{moy}) \frac{K_{moy}^{sat}}{L} \quad 4.8$$

W^{comp} est le contenu en eau du sol (m^3/m^3) du compartiment, W_{ind}^{comp} le contenu en eau du sol calculé pour le compartiment avant homogénéisation (m^3/m^3), W_{moy} le contenu en eau du sol moyen entre les compartiments (m^3/m^3), K_{moy}^{sat} la conductivité hydraulique moyenne à saturation (m/s) et L la distance caractéristique pour le transfert latéral.

Les spécificités de TEB-Hydro en font un modèle adapté pour répondre aux objectifs de notre travail. En effet, outre la représentation complète et détaillée des différents processus hydriques intervenant à la surface de la route et en sous sol, il prend également en compte les interactions thermiques entre les bilans hydrologiques et énergétiques. Dès lors, les impacts thermiques de la lame d'eau en surface sur la TSR peuvent être évalués.

3 Modélisation de la lame d'eau présente en surface de la route et de la TSR avec le modèle TEB-Hydro

L'objectif de ce travail est d'améliorer la modélisation de l'état de surface de la route (ESR). En conditions hivernales, l'ESR se définit à travers la **TSR** et la hauteur de la lame d'eau présente à la surface de la route. Cette dernière influence l'état de surface de deux façons. D'une part, elle contribue à la baisse de la **TSR** (Feddes et *al.*, 2001 ; Mitchell et *al.*, 2008; Nakayama et Fujita, 2010), et d'autre part, dans des conditions de **TSR** négatives, elle est susceptible d'engendrer l'apparition de phénomènes glissants (givre, verglas, etc.). Ainsi, une meilleure prévision de la lame d'eau présente en surface de la route peut contribuer à l'amélioration de la modélisation de l'ESR.

Dans un premier temps, nous comparerons la capacité des modèles TEB et TEB-Hydro à représenter la lame d'eau présente à la surface de la route. Dans un second temps, nous analyserons l'impact thermique de cette lame d'eau sur la modélisation de la **TSR**.

Une analyse préliminaire sera effectuée en se basant sur les données issues de la station météorologique d'Essey-lès-Nancy. Comme cette station ne possède de mesures ni de la hauteur de la lame d'eau, ni de la **TSR**, l'analyse se limitera à l'évaluation de la différence des résultats de modélisation de ces deux paramètres avec et sans prise en compte des améliorations apportées par le modèle TEB-Hydro. L'objectif est d'apprécier la contribution des différentes améliorations intégrées au sein de ce modèle à la modélisation des bilans énergétique et hydrologique de la surface de la route.

Comme nous l'avons déjà indiqué précédemment, les améliorations hydriques ont été intégrées dans TEB sous forme d'un module optionnel HYDRO qui peut être ou ne pas être activé. Afin d'apprécier la contribution thermique et hydrologique des processus spécifiques à TEB-Hydro, deux modélisations ont été effectuées. Une première a été conduite avec l'option HYDRO activée, et une seconde où elle ne l'est pas. La modélisation a été effectuée sur une période de trois ans (01/01/2011-31/12/2013) et les données utilisées pour faire fonctionner TEB-Hydro sont la température de l'air T_{air} (°C), l'humidité relative (%), la vitesse du vent (m/s), la pression atmosphérique (Pa), la hauteur des précipitations (mm), le rayonnement global (W/m²) et le rayonnement atmosphérique (W/m²). Une attention particulière est portée sur la période hivernale.

En ce qui concerne TEB-Hydro, les paramètres nécessaires sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 17. Paramètres spécifiques au modèle TEB-Hydro, cas particulier de la rue Charles III à Nancy

Paramètres	Description	Valeur	Unité
L_{sew}^{maille}	Longueur de réseau d'eaux usées	1485	(m)
D_{sew}	Profondeur moyenne des réseaux	1.5	(m)
$W_{s,max}^{toit}$	Capacité maximale d'interception des toitures	0.5	(mm)
$W_{s,max}^{route}$	Capacité maximale d'interception de la voirie	1.0	(mm)
I_p^{sew}	Paramètre indiquant l'étanchéité des réseaux	0.05	(mm)
C_{sew}	Fraction de raccordement des surfaces imperméabilisées aux réseaux d'assainissements	0.8	(%)
L_{sew}^{max}	Longueur caractéristique d'abattement de la nappe	30	(m)

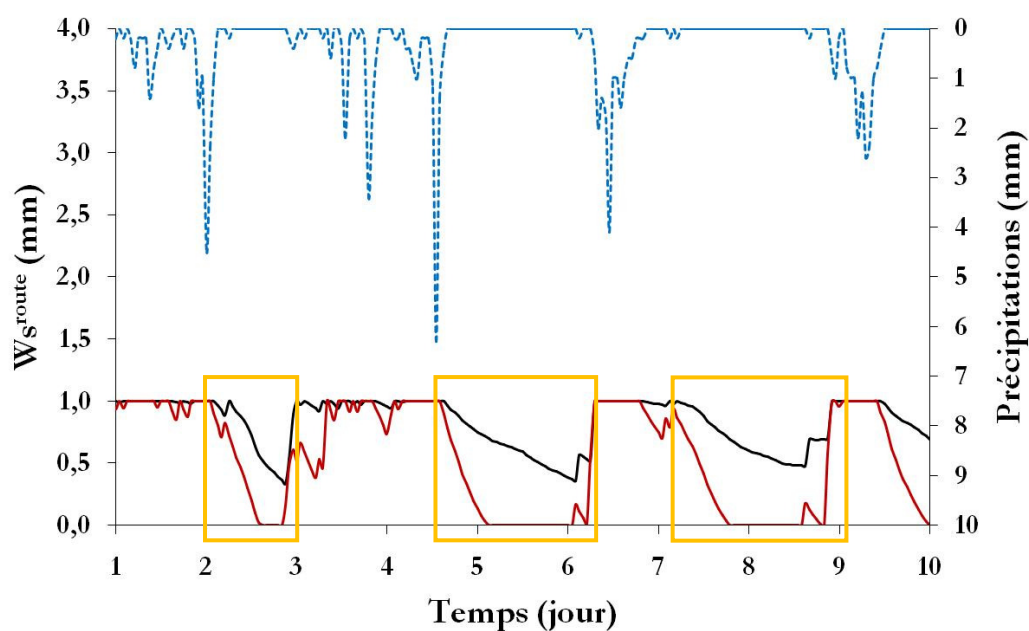
L'ensemble des données concernant le dimensionnement du réseau d'assainissement ainsi que la qualité de son étanchéité sont issus de la base de données des services eau et assainissement du Grand-Nancy. $W_{s,max}^{route}$ dépend de la texture de la chaussée, de sa rugosité, de sa pente et de sa qualité (présence de flaques d'eau ou pas). Dans notre cas d'étude, $W_{s,max}^{route}$ est fixée pour les deux modèles TEB et TEB-Hydro, et est égale à 1 mm, cohérent avec la hauteur d'eau donnée dans la norme pour le capteur qui mesure cette hauteur. $W_{s,max}^{toit}$ n'influence pas le bilan hydrologique de la surface de la route, on lui a attribué une valeur arbitraire de 0.5 mm, nécessaire pour l'initialisation du modèle.

3.1 Appréciation des améliorations apportées par TEB-Hydro sur la modélisation de la lame d'eau en situation hivernale

Dans le modèle TEB, la lame d'eau présente en surface de la route est représentée par le réservoir de surface et les quantités d'eau ruisselées. En effet, pour une hauteur d'eau inférieure à un certain seuil $W_{s,max}^{route}$ (capacité maximale de rétention de la voirie), l'évolution de la lame d'eau présente en surface est exprimée par le réservoir de surface W_s^{route} , sinon, au-delà de cette valeur, l'évolution de la lame d'eau sera exprimée par les ruissellements de surface R_{off}^{route} . Ainsi, W_s^{route} et R_{off}^{route} servent à la définition de l'état hydrique de surface de la route, comme indiqué précédemment, mais également à l'évaluation ultérieure des pertes en fondants routiers appliquées, et liées au ruissellement, d'où l'intérêt spécifique pour R_{off}^{route} .

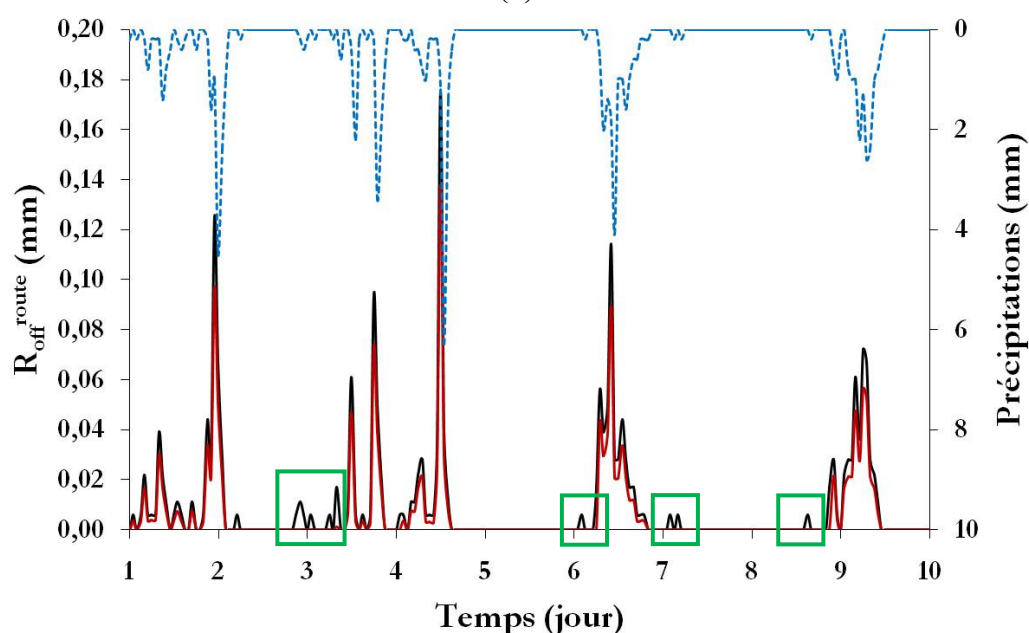
Dans notre cas d'étude sur la rue Charles III, C_{sew} est égal à 1, ce qui signifie que toutes les surfaces imperméabilisées de cette rue sont branchées au réseau d'assainissement, et qu'il n'y a pas d'eau excédentaire qui influence le bilan hydrologique de surface de la route. Ainsi, selon les équations 4.1 et 4.2, la différence entre le bilan hydrologique de surface décrit par TEB et celui décrit par TEB-Hydro est la prise en compte du processus d'infiltration d'eau dans la voirie I^{route} .

La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présente les résultats de la modélisation de la lame d'eau présente en surface de la route avec TEB et avec TEB-Hydro, pour la période du 01/12/2011 au 10/12/2011.



— Ws-route-TEB — Ws-route-TEB-Hydro - - - Précipitations

(a)



— Roff-route_TEB — Roff-route_TEB-Hydro - - - Précipitations

(b)

Figure 65. Variation de la modélisation du réservoir de surface W_s^{route} (a) et du ruissellement R_{off}^{route} (b) selon la configuration initiale de TEB et selon TEB-Hydro, pour la période du 01/12/2011 au 10/12/2011

L'analyse préliminaire des résultats de la Figure 65 indique que la prise en compte de processus d'infiltration d'eau dans la voirie a modifié significativement les résultats de la modélisation de l'état hydrique de surface de la route. Ceci est illustré par la Figure 65a qui représente l'évolution du réservoir de surface W_s^{route} en fonction des précipitations, et

également par la Figure 65b qui représente celle de ruissellement R_{off}^{route} . Les résultats de la Figure 65a montrent que W_s^{route} modélisé par TEB-Hydro est plus faible que celui modélisé par TEB, notamment après les précipitations. Ceci est attribué au processus d'infiltration qui évacue une certaine quantité d'eau vers le sol. L'influence de ce processus d'infiltration sur W_s^{route} se manifeste de deux manières. D'une part, les quantités d'eaux infiltrées dans le sol réduisent le volume d'eau résiduelle dans le réservoir de surface. Ce dernier, selon les précipitations, peut ne pas atteindre le seuil $W_{s,max}^{route}$ et le ruissellement R_{off}^{route} ne se déclenche pas. Ceci explique l'absence de ruissellements modélisés par TEB-Hydro pour les zones encadrées en vert sur la Figure 65b. D'autre part, ce processus d'infiltration, en fin de précipitations ou en situation de faible pluviométrie, favorise l'évacuation d'eau vers le sol et accélère l'assèchement de la surface de la route (zones encadrées en jaune sur la Figure 65a). On constate qu'avec la configuration initiale du modèle TEB, le réservoir de surface s'assèche très lentement par rapport à la configuration de TEB-Hydro. Ceci risque de donner des prévisions inexactes, ou du moins plus pessimistes sur l'état hydrique de surface de la route, avec des décisions inappropriées vis à vis de la situation réelle, engendrant par conséquent des interventions inadaptées des services d'exploitation hivernale. En outre, cela modifie des résultats du ruissellement susceptible de modifier également des simulations des quantités de fondants routiers évacuées et/ou résiduelles sur la route.

Ces résultats confirment l'importance de la prise en compte de processus d'infiltration d'eau dans la voirie. Ils justifient également l'hypothèse qu'une description détaillée des différents processus physiques intervenant dans la détermination du bilan hydrologique de surface de la route est susceptible d'améliorer la modélisation de son état.

Ces résultats ont été confirmés également sur d'autres périodes de simulations. La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** représente celle du mois de décembre 2012.

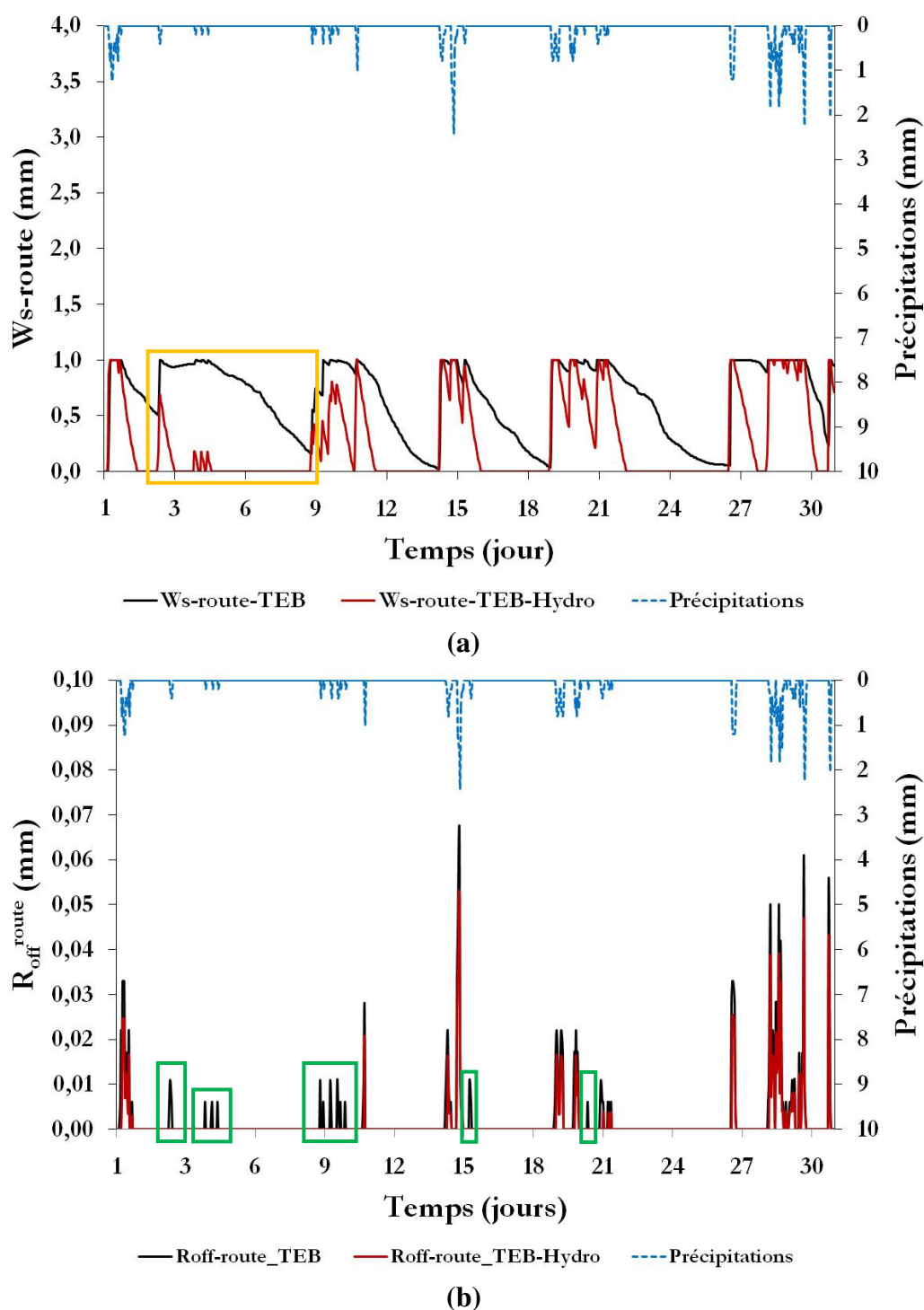


Figure 66. Variation de la modélisation du réservoir de surface W_s^{route} (a) et du ruissellement R_{off}^{route} (b) selon la configuration initiale de TEB et selon TEB-Hydro, pour le mois de décembre 2012

Les résultats de cette seconde évaluation confirment les interprétations évoquées auparavant concernant l'importance de la prise en compte de processus d'infiltration dans l'évaluation de l'état hydrique de surface de la route et montrent également l'importance du couplage hydro-énergétique dans la détermination de son état. En effet, pour la période de 3 au 9 décembre 2012 (zone encadrée en jaune sur la Figure 66a), la modélisation de W_s^{route} avec TEB montre

que celle-ci s'assèche très lentement et reste en état mouillé sur une longue période (6 jours), en comparaison avec celui modélisé par TEB-Hydro. Ceci peut être expliqué d'une part par l'absence de processus d'infiltration qui permet d'évacuer une certaine quantité d'eau dans le sol et d'autre part, par la modélisation sans trafic du flux de chaleur latente de la surface de la route $Q_{E-route}$ qui peut contribuer également à l'assèchement de la surface de la route. Le flux de chaleur latente $Q_{E-route}$ modélisé avec TEB et avec TEB-Hydro est illustré par la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

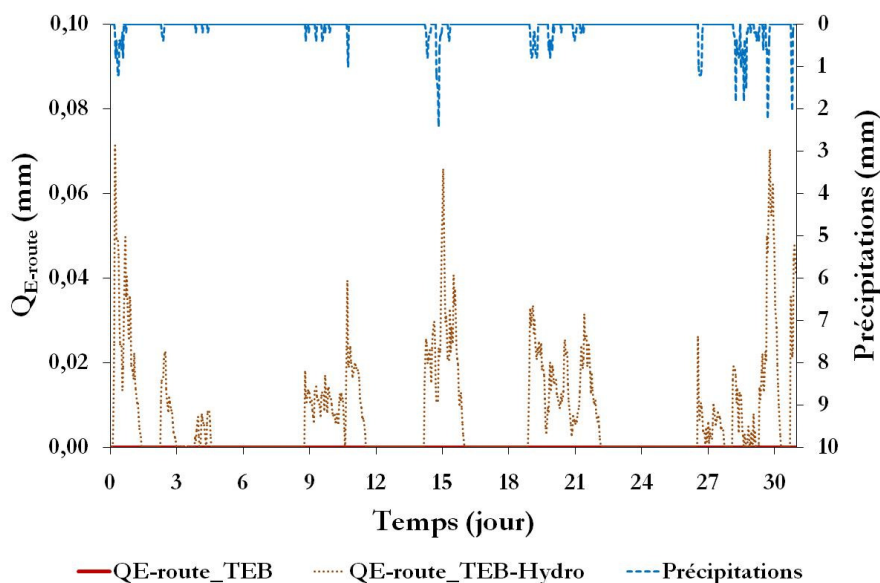


Figure 67. Flux de chaleur latente de la surface de la route $Q_{E-route}$ traduit en mm d'eau évaporée, modélisé par TEB et par TEB-Hydro, pour le mois de décembre 2012

Les résultats de cette figure montrent l'absence de variations du flux de chaleur latente avec le modèle TEB, contrairement à celles avec TEB-Hydro qui couple le bilan énergétique de surface de la route et le bilan hydrique pour la simulation de ce flux. L'absence de ce flux de chaleur latente dans la modélisation de W_s^{route} peut expliquer l'assèchement très lent de la route par le modèle TEB. Cependant, la coexistence, dans le modèle TEB-Hydro, de processus d'infiltration et d'évaporation d'eau sous forme de flux de chaleur latente justifie également la baisse plus rapide de W_s^{route} .

Ces résultats confirment l'importance de la prise en compte de tous les processus physiques intervenants dans la modélisation de l'état hydrique de surface de la route et particulièrement celui le processus d'infiltration d'eau dans la voirie. Ils confirment également la nécessité du couplage hydro-énergétique pour mieux modéliser l'ESR. Ainsi, une meilleure description de l'état hydrique de surface de la route permettra d'une coté de mieux modéliser la TSR et

d'une autre coté d'avoir une simulation réaliste des quantités d'eau ruisselées et ainsi évaluer avec plus de précision les quantités de fondants routiers résiduelles sur la surface de la route. Par conséquent, on déterminera avec davantage de précision la température de transition de phase de l'eau présent en surface en fonction des ces quantités de fondant résiduel et en fonction de la *TSR*.

3.2 Appréciation des améliorations apportées par TEB-Hydro sur la modélisation de la *TSR* en hiver

La Figure 68 présente les résultats de la modélisation de la *TSR* avec et sans influence de la lame d'eau présente en surface, pour une période hivernale et pluvieuse du 01/11/2011 jusqu'au 10/11/2011. Le modèle TEB ne fait pas le couplage hydro-énergétique, dès lors *TSR_TEB* présente les résultats de la *TSR* sans l'influence de la lame d'eau. *TSR_TEB-Hydro* représente les résultats de la modélisation de la *TSR* avec prise en compte de l'influence de la lame d'eau. Les résultats indiquent que la présence d'eau en surface de la route influence la *TSR*, avec une baisse de l'ordre de 0.5 à 1°C. Son influence est d'autant plus significative que la hauteur de la lame d'eau est importante. Cette baisse de température est due d'une part à la présence d'eau en surface, rafraichissant l'air à leur aplomb, et d'autre part, à la perte d'énergie sous forme de flux de chaleur latente.

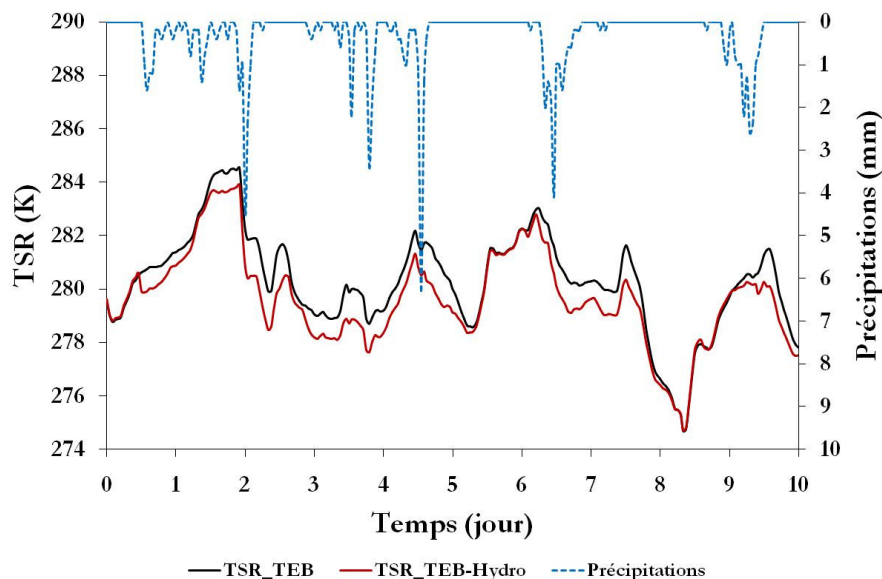


Figure 68. Variations de la *TSR* modélisée par TEB et TEB_Hydro et des précipitations en fonction du temps pour la période du 01-10/11/2011

Dès lors, on représente uniquement la variation de la *TSR_TEB-Hydro* en fonction la hauteur de la lame d'eau W_s^{route} , illustrée par la Figure 69.

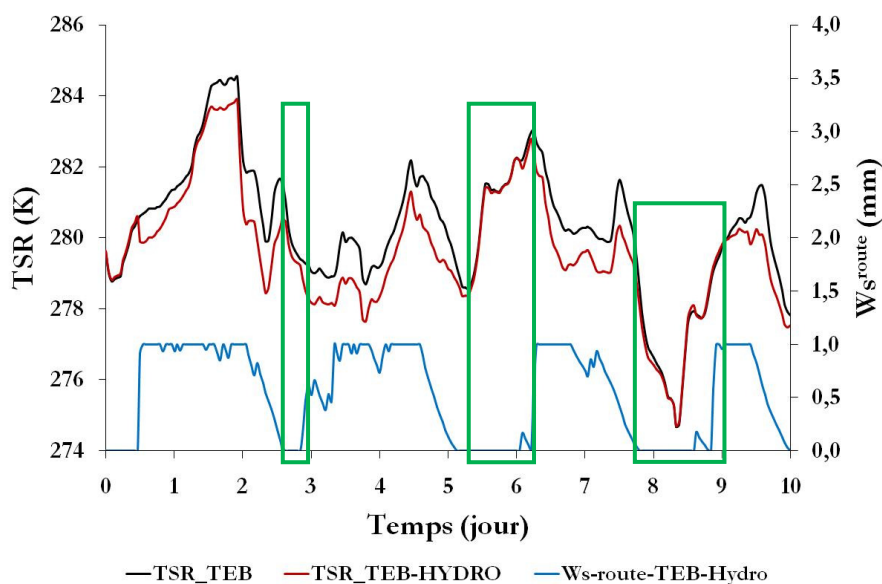


Figure 69. Variations de la TSR modélisée par TEB et TEB_Hydro et de W_s^{route} (lié à l'ESR) en fonction du temps pour la période du 01/12/2011 au 10/12/2011

Les résultats de cette figure confirment que la **TSR** baisse globalement quand la hauteur de la lame d'eau présente en surface diminue. En effet, la présence d'eau en surface de la route déclenche l'évaporation ce qui engendre une perte d'énergie sous forme de flux de chaleur latente et justifiant par conséquent la baisse de la **TSR**. Pendant les périodes où $W_s^{route} = 0 \text{ mm}$ (zone encadrée en vert sur la Figure 69) la **TSR** est identique avec les deux modélisations, montrant ainsi bien le couplage hydro-énergétique de TEB_Hydro.

Ces résultats ont été confirmés également sur d'autres périodes de modélisations. La Figure 70 représente celle du mois de décembre 2012, pour la modélisation de la **TSR** avec et sans prise en compte de l'influence thermique de la lame d'eau présente en surface, dans une configuration de faibles précipitations et des températures aux alentours de 0°C . L'intérêt est d'analyser la sensibilité de TEB-Hydro à ce type de configuration propice à la formation de verglas sur la route et dégradant ainsi les conditions de circulation. Les résultats montrent que même pour de faibles précipitations, le modèle TEB-Hydro modifie la **TSR** sous l'influence de l'état de mouillage de surface de la route. Cette influence dépend des quantités d'eau disponibles en surface pour le ruissellement et/ou pour l'évaporation.

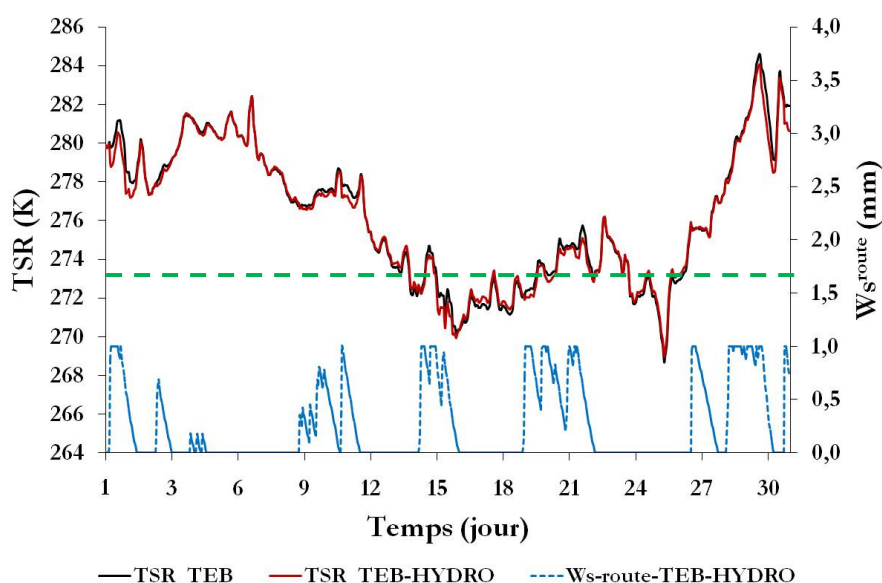


Figure 70. Variations de la *TSR* modélisée par *TEB* et *TEB_Hydro* et de W_s^{route} (lié à l'ESR) en fonction du temps pour le mois de décembre 2012

En outre, les résultats de cette figure indiquent que pour des *TSR* inférieure à 0°C, et ce juste après des précipitations, le "gel" de l'eau en surface a priori bloquera le processus d'infiltration au profit de celui de ruissellement, sauf si du fondant routier est présent et que la saumure présente en surface possède la bonne concentration.

De ces résultats préliminaires, on peut en conclure que la lame d'eau présente en surface diminue la *TSR* de l'ordre de 0.5 à 1°C. Ces résultats sont en cohérence avec ceux trouvés par Feddes et *al.* (Feddes et *al.*, 2001), Mitchell et *al.* (Mitchell et *al.*, 2008) et Nakayama et Fujita (Nakayama et Fujita, 2010) indiquant que l'eau contribue au rafraîchissement de quelques degrés de la *TSR*. Cette baisse de température est due à la perte d'énergie sous forme de flux de chaleur latente.

Bien que le concept du bilan hydrique dans TEB-Hydro soit relativement complet par rapport à la configuration initiale de TEB, on ne peut pas encore affirmer dans quelle proportion la modélisation de l'état de surface de la route est améliorée et ceci en raison de l'absence d'observations pour la validation des résultats. Afin d'accomplir cette étape de validation et d'évaluer la robustesse du modèle TEB-Hydro, il serait nécessaire de confronter ces résultats de simulations à des observations supplémentaires à la *TSR* (lame d'eau sur la voirie, lame d'eau ruisselée). Comme indiqué dans les chapitres précédents, le trafic automobile engendre une augmentation de cette *TSR*. Dès lors, l'analyse portera sur comment ce phénomène anthropique entrera en compétition avec les baisses induites par cette lame d'eau.

4 Prise en compte des influences anthropiques sur la lame d'eau en surface de la route

Dans une même perspective d'amélioration de la modélisation de l'ESR, on souhaite ici identifier et proposer une paramétrisation de certains processus anthropiques influençant le bilan hydrologique et thermique à la surface de la route. En effet, la lame d'eau présente en surface, outre les processus d'infiltration, d'évapotranspiration et de ruissellement, est également soumise à d'autres facteurs d'origine anthropique. En liaison avec la configuration urbaine et les conditions hivernales, le trafic et la présence de fondants routiers sont les deux facteurs susceptibles d'avoir une influence significative sur cette lame d'eau en surface. Le trafic modifie le bilan hydrologique, notamment par nébulisation. De son côté, le fondant routier modifie sa température de changement de phase liquide-solide. Dans ce qui suit, nous souhaitons proposer une paramétrisation physique décrivant ces processus et les prendre en compte dans une modélisation future de l'ESR.

4.1 Nébulisation des eaux de surface par le trafic automobile

Le passage d'un véhicule sur une route mouillée modifie le bilan hydrique de surface selon différents processus : modification de l'infiltration, transport d'une certaine quantité d'eau par la carrosserie du véhicule (Weir et *al.*, 1978 ; Sandberg, 1980), modification structurelle de la neige (Muzet et *al.*, 2000 ; Fujimoto et *al.*, 2009) et nébulisation par les roues du véhicule en mouvement (Möller, 2006 ; Denby et Sundvor, 2012 ; Denby et *al.*, 2013).

La nébulisation (Figure 71) se produit lors du passage des véhicules sur une surface mouillée. Une partie de l'eau présente est soulevée par les roues (entrée de la roue dans la lame d'eau, cavitation à l'arrière des roues) et est transformée en gouttelettes de différents diamètres qui forment une sorte de brouillard au voisinage immédiat du véhicule en mouvement.



Figure 71. Nébulisation des eaux de surface de la route par le véhicule

La quantité d'eau nébulisée par le trafic dépend tout d'abord de la hauteur de la lame d'eau disponible sur la route, du type du véhicule (léger ou poids lourd), de la vitesse de circulation ainsi que de la densité de trafic. Ce phénomène a été étudié par plusieurs auteurs (Weir et *al.*, 1978 ; Sandberg, 1980 ; Möller, 2006 ; Denby et Sundvor, 2012 ; Denby et *al.*, 2013). Dans le cadre de leur étude portant sur la modélisation de l'état de mouillage de la route, Denby et Sundvor (Denby et Sundvor, 2012) ont défini plusieurs paramètres afin de quantifier cette eau nébulisée par les véhicules. Un taux de nébulisation est déterminé expérimentalement pour chaque type de véhicule, et est exprimé par les relations suivantes :

$$f_{spray}^{VL}(V_{veh}) = f_{0,spray}^{VPL} \left(\frac{V_{veh}}{V_{ref,spray}} \right)^2 \quad 4.9$$

$$f_{spray}^{VPL}(V_{veh}) = f_{0,spray}^{VPL} \left(\frac{V_{veh}}{V_{ref,spray}} \right)^2 \quad 4.10$$

f_{spray}^{VL} et f_{spray}^{VPL} (sans unité) représentent les facteurs de nébulisation respectivement pour les véhicules légers et les poids lourds. $V_{ref,spray}$ (égale à 70 km/h) est la vitesse de circulation de référence avec laquelle Denby et Sundvor (Denby et Sundvor, 2012) ont réalisé l'expérience, et $f_{0,spray}^{VL}$ et $f_{0,spray}^{VPL}$ représentent les facteurs de nébulisation générés à cette vitesse de circulation de référence, respectivement pour les véhicules légers et les poids lourds. Ils sont définis par les relations suivantes :

$$f_{0,spray}^{VL} = 5 \cdot 10^{-3} \quad 4.11$$

$$f_{0,spray}^{VPL} = 6 f_{0,spray}^{VL} \quad 4.12$$

Ces valeurs ont été déterminées expérimentalement au niveau de la zone de roulement du véhicule. Pour la totalité de la surface de la route, Denby et *al.* (Denby et *al.*, 2013) ont choisi d'autres valeurs représentatives : $f_{0,spray}^{VL} = 10^{-4}$ et $f_{0,spray}^{VPL} = 6 \cdot 10^{-4}$.

Une fois ces paramètres définis, un taux de nébulisation total R_{spray} (s^{-1}) engendré par les différents types des véhicules a été déterminé (Denby et Sundvor, 2012). Ce taux est fonction du type et du nombre de véhicules N_{veh} (s^{-1}), du nombre de voies de circulation N_{voies} (sans unité) et de la vitesse de circulation des véhicules. Il est exprimé par :

$$R_{spray} = \sum_{v=le,pl}^{vehicle} \frac{N_{veh}}{N_{voies}} f_{spray}^v(V_{veh}) \quad 4.13$$

Dans le cadre de notre étude, afin de simplifier le calcul, on peut se baser sur une formulation plus simple et faisant référence aux mêmes paramètres de trafic (D_{trafic} , V_{veh}) que ceux utilisés dans les chapitres précédents. On suppose un pourcentage moyen représentatif de la densité des véhicules légers et des poids lourd représentés respectivement par D_{trafic}^{VL} et D_{trafic}^{VPL} . Dans le cas de la rue Charles III de Nancy (France), D_{trafic}^{VL} et D_{trafic}^{VPL} sont exprimés par :

$$D_{trafic}^{VL} = 0.85 D_{trafic} \quad 4.14$$

$$D_{trafic}^{VPL} = 0.15 D_{trafic} \quad 4.15$$

Ainsi R_{spray} devient :

$$R_{spray} = [D_{trafic}^{VL} f_{spray}^{VL}(V_{veh})] + [D_{trafic}^{VPL} f_{spray}^{VPL}(V_{veh})] \quad 4.16$$

La quantité d'eau nébulisée par le trafic $S_{veh,spray}$, peut alors être déterminée par la relation suivante :

$$S_{veh,spray} = R_{spray} W_s^{route} \quad 4.17$$

W_s^{route} (m) est la hauteur d'eau en surface de la route. Selon l'expérience faite par Denby et Sundvor (Denby et Sundvor, 2012), le processus de nébulisation généré par le trafic n'influence le bilan hydrique de surface de la route que si la hauteur de la lame d'eau dépasse un certain seuil $W_{s,min}^{route} = 0.001$ m. Ceci se traduit par :

$$S_{veh,spray} = R_{spray} W_s^{route} \quad \text{si } W_s^{route} > W_{s,min}^{route} \quad 4.18$$

$$S_{veh,spray} = 0 \quad \text{sinon} \quad 4.19$$

En intégrant ce processus dans le bilan hydrique de la surface de la route du modèle TEB-Hydro, l'équation 5.2 devient alors :

$$\frac{\Delta W_s^{route}}{\Delta t} = P^{route} - E^{route} - R_{off}^{route} - I^{route} - S_{veh,spray} \quad 4.20$$

Dès lors, on constate que le trafic affectera la lame d'eau dès que la voirie est considérée comme mouillée ou ruisselante. Cependant, le calcul est effectué de manière globale sur la voirie. Une partition de celle-ci, comme pour la partie thermique, pourrait être envisagée pour ensuite établir une moyenne pondérée de cette lame d'eau et accéder à un état de surface moyen.

4.2 Cas particulier de la présence de fondants routiers et influence sur la TSR

Comme nous l'avons déjà introduit dans le premier chapitre, un fondant routier est un produit solide ou liquide dont les caractéristiques physiques permettent de déplacer l'équilibre entre phases pour abaisser le point de congélation de l'eau. Son rôle en viabilité hivernale est d'empêcher la formation de verglas ou la tenue de la neige sur la surface circulée et de maintenir un niveau d'adhérence optimal pour les véhicules.

Les propriétés physico-chimiques des fondants routiers sont utilisées pour expliquer ces deux rôles. En effet, un fondant routier (généralement du NaCl) est un produit hydrosoluble. Le mélange constitué avec l'eau diminue la tension de vapeur d'eau, et déplace le point d'équilibre liquide-solide au profit de la phase liquide et abaisse la température de congélation du mélange (Kaufmann, 1960 ; Durickovic, 2008).

Cependant, quelle que soit la forme de son application (cristaux, saumures, mélange des deux), son efficacité d'action n'intervient que sous sa forme de saumure. L'eau nécessaire pour l'humidification de sel peut provenir des phénomènes glissants (eau en surfusion solidifiée, glace vive, neige sèche, etc.) qui existent sur la surface de la route. Le sel peut aussi s'humidifier en captant la vapeur d'eau présent dans l'atmosphère. Ce phénomène d'hydratation n'est pas instantané et peut ne pas se produire par manque d'eau (Kaufmann, 1960 ; Marchetti et *al.*, 2006a). L'efficacité du fondant est donc reliée à sa concentration et est dépendante de la quantité d'eau disponible en surface de la chaussée ou de l'hygrométrie de l'atmosphère.

Pour décrire cette transition de phase solide-liquide, on s'appuie sur la loi cryoscopique de Raoult. Ce phénomène s'explique par la notion de tension de vapeur, généralement différente en phase liquide de la celle de cette même substance en phase solide. Par conséquent, la coexistence de deux phases de la même substance engendre un échange moléculaire constant entre les deux phases liquide-solide. Cet échange est dû à ce gradient de tension de vapeur et tend à l'équilibrer. La température d'équilibre entre ces deux phases est appelée température de congélation. En viabilité hivernale, on parle plus souvent de température de protection, température à laquelle l'eau présente sur la chaussée passe en phase liquide.

La température de protection pour l'eau pure est de 0°C. En dessous de cette valeur, la tension de vapeur liquide est supérieure à celle du solide, et les molécules d'eau présentes à la surface de la chaussée passent vers l'état solide. Par contre, si la température de l'eau reste supérieure à 0°C, la phase liquide persiste. Dans le cas d'une saumure de NaCl, la température de congélation décroît au fur et à mesure que la concentration en sel augmente jusqu'à atteindre celle du point eutectique. À ce point, avec une proportion massique de 23.3% en sel, la solution ne gèlera qu'à une température inférieure à -21°C. Ainsi, l'application de fondants routiers sur les voiries influence significativement l'ESR, qui reste mouillé pour des valeurs négatives de la **TSR**. Il est donc indispensable de prendre en compte ce processus dans sa modélisation. Cette meilleure prévision de la **TSR** conduira à optimiser les opérations de salage et à protéger l'environnement des impacts nocifs dus à une utilisation inappropriée de fondants routiers (Durickovic et *al.*, 2013).

La température de congélation T_c (K) du mélange d'eau et de fondant routier obtenu après salage peut être déterminée avec l'équation cryoscopique d'abaissement du point de congélation :

$$T_c = K_c m i$$

4.21

K_c (kg.K/mol) est la constante cryoscopique de l'eau, et est égale à 1.86 kg.K/mol. i (sans unité) est la constante de Van Hoff, et exprime le rapport entre la quantité d'ions présents en solution et la quantité de molécules dissociées. Dans le cas du NaCl, i est égal à 2. La molalité de la solution m (mol/kg) correspond à la quantité de soluté (NaCl) contenue dans 1 kg de solvant (eau).

Tant que la saumure en surface est en phase solide ou liquide, la **TSR** s'obtient à l'aide du couplage hydro-énergétique. En revanche, à la température de transition de phase, elle est supposée être égale à la T_c , en supposant la lame d'eau de faible épaisseur et un transfert thermique total entre cette lame d'eau et la surface de la voirie. Il s'agit alors d'intégrer dans le bilan énergétique de la surface un changement de phase dont la température de transition solide-liquide change en fonction du temps, et mobilisant une enthalpie en fonction de la concentration en fondant routier de l'eau présente en surface.

De cette expression, il ressort que la température de congélation à la surface de la route est fonction de la quantité de fondants présents. Cette quantité dépend elle-même de plusieurs facteurs, principalement des conditions météorologiques (précipitations, vent) et du trafic routier. Ainsi, afin de mieux déterminer la température de protection de la chaussée, il est indispensable de connaître cette quantité résiduelle sur la chaussée. Ceci a fait l'objet des travaux de thèse de Durickovic (Durickovic, 2008) qui l'a étudiée par spectroscopie Raman. Néanmoins, dans le cadre de notre étude, on s'intéresse à définir une approche physique permettant de quantifier les pertes en fondants routiers et ainsi d'en déduire les quantités résiduelles sur la chaussée. Gustafsson et Blomqvist (Gustafsson et Blomqvist, 2004) proposent une description permettant de quantifier la perte de fondants routiers lorsqu'il s'agit de sel de chlorure. Ce modèle prend en considération l'influence du vent, de la quantité d'eau mobilisable sur la chaussée et du trafic routier. Ce modèle est traduit par la relation suivante :

$$EXP_{Cl} = F_{rs} S_{app} e^{-k PC_{eq} V_{cp}} Cl + Cl_{bf}$$

4.22

EXP_{Cl} (g/m²) représente la quantité de chlorure expulsée et récoltée hors de la chaussée. F_{rs} (sans unité) est un facteur d'état de surface, égal à 0.2 pour de la neige compactée ou de la glace mince, 1 pour un mélange neige-eau, et 3 pour une surface mouillée et/ou avec de la neige libre. S_{app} (g/m²) est la quantité de fondants routiers appliquée pendant l'opération de salage. k (sans unité) est le pourcentage auquel les bandes de roulement s'appauvrissent en

sel, fonction de la nature et de la rugosité de la chaussée. PC_{eq} (sans unité) est l'équivalent du cumul du nombre de véhicules particuliers, un camion est compté comme 5 véhicules particuliers et un camion avec remorque comme 7. V_{cp} (sans unité) est la composante perpendiculaire de vent par rapport à l'axe de la chaussée. Cl (sans unité) le nombre d'ions de chlore libérables par une molécule de fondant routier et Cl_{bf} (g/m²) représente la quantité de chlore naturellement présent dans l'environnement. Une autre description, prenant en compte le transport et le ruissellement a été proposée par Marchetti et *al.* (Marchetti et *al.*, 2008) mais n'a pas bénéficié d'une vérification expérimentale.

Sachant que la densité du trafic varie en fonction du temps, leur impact sur la quantité de fondants expulsée varie également. Dans le cadre de notre étude, en s'appuyant sur la paramétrisation adaptée au trafic précédemment utilisée dans la partie thermique (D_{trafic}^{VL} et D_{trafic}^{VPL}), la variation de PC_{eq} en fonction du temps peut s'écrire sous la forme suivante.

$$PC_{eq}(t) = D_{trafic}^{VL} + 5 \cdot D_{trafic}^{VPL} \quad 4.23$$

On suppose que les camions avec remorque ne circulent pas dans un milieu urbain et que les bus et les poids lourds sont compté chacun comme 5 véhicules légers (Gustafsson et Blomqvist, 2004). Cette formulation intègre le paramètre temps à travers la densité du trafic. Ainsi, à chaque pas de temps, on peut déterminer la quantité de fondants routiers expulsés et récoltée hors de la chaussée. Pour la première pas de temps $EXP_{Cl}(t_1)$, s'écrit sous la formulation suivante :

$$EXP_{Cl}(t_1) = F_{rs} S_{app} e^{-k PC_{eq}(t_1)} V_{cp} Cl + Cl_{bf} \quad 4.24$$

$PC_{eq}(t_1)$ est l'équivalent du cumul du nombre de véhicules particuliers au premier pas de temps. Ainsi, les quantités de fondants routiers résiduelles au premier pas de temps $S_{res}(t_1)$ (g/m²) peuvent être déterminées avec l'équation-bilan suivante :

$$S_{res}(t_1) = S_{app} - EXP_{Cl}(t_1) \quad 4.25$$

Cette quantité de fondant résiduelle poursuit sa décroissance jusqu'au prochain traitement appliqué, et dépend de la densité du trafic et des opérations de salage. Elle peut être déterminée à chaque pas de temps t_i par le biais des relations suivantes :

$$S_{res}(t_i) = [S_{res}(t_{i-1}) + S_{app_supp}] - EXP_{Cl}(t_i) \quad 4.26$$

$$EXP_{Cl}(t_i) = F_{rs} \textcolor{red}{EXP}_{Cl}(t_{i-1}) e^{-k \textcolor{red}{PC}_{eq}(t_i) V_{cp} Cl + Cl_{bf}} \quad 4.27$$

S_{app_supp} est la quantité de fondant routier supplémentaire appliquée s'il y a eu entre-temps d'autres opérations de salage (g/m²). Ainsi, en se basant sur les équations 4.21 et 4.26, la température de protection peut être ainsi déterminée.

5 Conclusion

L'état de surface de la route est le résultat des interactions de processus énergétiques et hydriques. Dans les précédents chapitres, on a montré qu'une meilleure paramétrisation des processus physiques thermiques contribuait à améliorer la modélisation de la **TSR**. De même, les résultats préliminaires de ce chapitre indiquent qu'une description détaillée de différents processus hydriques intervenant dans la modélisation du bilan hydrologique de surface de la route est susceptible d'influencer son état de mouillage. De plus, la lame d'eau présente en surface conduit à une baisse de la **TSR** de quelques degrés en compétition avec l'augmentation générée par la circulation des véhicules. Ainsi, le couplage hydro-énergétique semble indispensable pour améliorer cette modélisation de l'état de surface de la route.

Dans des conditions hivernales de circulation, d'autres processus influencent l'état de mouillage de surface, tels que le trafic et la présence de fondant routier. La prise en compte de ces deux processus est susceptible d'améliorer cette modélisation. Les approches physiques proposées et décrites dans ce chapitre pourraient constituer de telles améliorations dans TEB-Hydro, pour ainsi mieux apprécier leurs influences sur la lame d'eau présente en surface ainsi que sur la modélisation de la **TSR**. Elles nécessiteront cependant des validations expérimentales complémentaires pour évaluer la robustesse du modèle TEB-Hydro dans la modélisation ainsi élaborée de l'état de surface de la route.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

La viabilité hivernale des infrastructures est une nécessité pour maintenir la mobilité et la sécurité des biens et des personnes. Certains phénomènes météorologiques affectent également l'économie de la zone impactée. En effet, ces conditions dégradées, notamment en hiver, y ont un effet direct. Dès lors, disposer d'un outil de prévision approprié de l'état de surface de la route permet aux gestionnaires des réseaux et aux personnes en charge de la viabilité hivernale de prendre les décisions adaptées au bon moment et aux bons endroits. Cela contribue à en tirer des profits économiques et environnementaux importants, en particulier sur les choix des traitements par des fondants routiers ou aéroportuaires. Au cours des dernières années, les services en charge de la viabilité hivernale de tels réseaux de transport se sont appuyés sur des modèles numériques de prévision de l'état de surface des itinéraires (interurbains, péri-urbains, ou urbains) ou des pistes aéroportuaires. Ils constituaient des outils appropriés pour la fourniture d'informations prévisionnelles sur le lieu et la date d'occurrence d'un phénomène susceptible d'altérer la mobilité et la sécurité (persistance de neige au sol, verglas, etc.), et ainsi planifier et organiser des interventions (préventives, curatives, etc.). Cependant, comme toutes les prévisions fournies par ces modèles, celles-ci ont seulement un degré donné de fiabilité. Cette fiabilité dépend du choix du modèle, de certaines spécificités liées à la zone d'étude insuffisamment ou mal prises en compte, ou en raison d'une paramétrisation globale de phénomènes physiques non adaptée.

L'étude bibliographique a ainsi montré que de nombreux modèles existent et donnent satisfaction, notamment sur des configurations péri-urbaines ou interurbaines. Celle urbaine a été davantage étudiée sous l'angle du confort urbain lors de la saison estivale, notamment avec le modèle numérique Town Energy Balance (TEB), et le microclimat urbain associé a une influence significative sur le bilan énergétique en ville, et ainsi sur l'état de surface et la température de surface des zones circulées. Le choix de TEB s'est justifié par le caractère exhaustif des processus physiques intervenant dans la ville. D'autre part, il est également ressorti que de nombreux facteurs anthropiques présentaient une contribution énergétique significative. Leur paramétrisation nécessitait des approfondissements pour mieux identifier les facteurs d'influence et d'impact, et contribuer à l'amélioration de leur prévision. C'est dans ce double contexte de l'hiver et de la ville que cette thèse s'est déroulée.

Le trafic automobile est l'un des facteurs anthropiques ayant une influence significative sur le bilan énergétique en milieu urbain. La littérature et les études expérimentales entreprises dans le cadre de cette thèse indiquent que dans des conditions climatiques hivernales, le trafic induit une augmentation de la température de surface de l'ordre de quelques degrés. Ceci est dû aux effets cumulatifs des différents processus physiques impliqués. Plusieurs phénomènes physiques ont alors été identifiés et leur paramétrisation intégrée dans le modèle de prévision TEB. En particulier, le passage des véhicules augmente la turbulence de l'air et modifie la résistance aérodynamique à la surface de la zone circulée. De plus, le trafic modifie le bilan radiatif reçu par la surface de la route par un blocage intermittent des rayonnements solaires incidents et des rayonnements telluriques, et aussi par l'émission des rayonnements infrarouges de grandes longueurs d'onde par la partie inférieure du véhicule. Enfin, les flux de chaleur dus aux frottements des pneumatiques, ainsi que les flux de chaleur sensible et latente dégagés par le moteur et par le système d'échappement contribuent également à cette augmentation. Les résultats de l'étude expérimentale ont montré que ces apports énergétiques générés par le trafic dépendent de sa vitesse de circulation, de sa densité ainsi que de la fluidité de circulation et des conditions météorologiques.

La contribution énergétique du trafic existait déjà dans TEB mais uniquement selon une paramétrisation globale. Ces apports thermiques étaient considérés comme étant une constante additionnée au flux turbulent du canyon urbain. Cette configuration initiale a été élaborée pour évaluer l'influence des apports thermiques globaux d'origine anthropique sur le confort urbain, la consommation en énergie pour la climatisation des bâtiments et afin de simuler le bilan thermique global de la ville dans un cadre d'ICU. L'intégration du trafic dans TEB selon cette configuration a donné de bons résultats. Si l'analyse comparée des résultats de la modélisation de la température de surface et de la température d'air, dans des conditions hivernales, montre que cette paramétrisation globale a légèrement amélioré la modélisation de la température d'air, elle n'a pas apporté d'améliorations significatives au niveau des résultats de température de surface. Cette dernière était minorée, et l'écart avec les mesures expérimentales devenait substantiel.

L'intégration de ce paramètre dans l'évaluation des apports thermiques globaux générés par le trafic a été affinée avec la prise en compte des variations quotidiennes de la densité du trafic. L'évaluation était alors plus réaliste que celle adoptée par la configuration initiale. Néanmoins, cette nuance dans l'intégration du trafic n'a pas amélioré les résultats de la température de surface, ni fondamentalement modifié celle de la température d'air. Des tests

de sensibilité ont alors été effectués afin d'étudier les limites de cette approche. Ils ont montré que la variation de la densité du trafic n'apporte pas une amélioration significative au niveau des résultats de la température de surface. Par contre, elle perturbe énormément la modélisation de la température d'air. Ceci nous a conduit à réfléchir à une paramétrisation différente pour l'évaluation des apports thermiques du trafic dans le modèle TEB.

Dans la littérature, les études avaient pris en compte les impacts thermiques du trafic dans la modélisation de l'état de surface de la route. Certains processus avaient été identifiés comme significatifs. Dès lors, afin de mieux prendre en compte les flux anthropiques du trafic, une paramétrisation détaillée a été proposée. Une description physique de chacun des processus physiques associés a été entreprise. La vitesse de circulation, la densité et les conditions de circulation ont été également prises en compte. En outre, le passage du véhicule n'influence qu'une partie de la surface ouverte à la circulation. Aussi, une zone d'impact a été identifiée et délimitée, fonction des dimensions du véhicule. De même, les hétérogénéités spatiales liées aux impacts thermiques des différents processus physiques du trafic ont été identifiées et étudiées et un coefficient d'impact relatif à chacun de ces processus a été déterminé. L'originalité de cette paramétrisation repose sur la manière avec laquelle les apports thermiques générés par le trafic ont été intégrés dans le canyon urbain. Chacun des processus physiques liés celui-ci interagit avec sa composante propre (énergétique, radiatif, aérodynamique) dans le canyon urbain. L'intégration du trafic dans TEB selon cette paramétrisation a amélioré significativement la modélisation de la température de surface. En effet, la comparaison des résultats issue de TEB avec des mesures sur le terrain effectuées sur la rue Charles III à Nancy indiquent un écart moindre (de 0.5 à 1°C en moyenne). Cette meilleure modélisation suit les variations de la densité du trafic. Ceci est en cohérence avec les résultats trouvés dans la littérature. Ils ont été confirmés sur trois campagnes de mesures réalisées dans différentes conditions météorologiques hivernales. Ainsi, on peut en déduire que l'approche basée sur une paramétrisation détaillée des processus physiques du trafic est adaptée à la modélisation de la température de surface dans des conditions hivernales. L'analyse des résultats de la modélisation de la température d'air montrent que l'intégration du trafic dans TEB selon cette seconde paramétrisation préserve cette dernière. Les écarts observés avec les mesures sont les mêmes que pour la configuration initiale et la première approche. Comme auparavant, différents tests de sensibilité ont alors été effectués sur cette paramétrisation détaillée du trafic avec TEB. Ces tests de sensibilité ont identifié les processus physiques les plus significatifs et conduisant à l'amélioration de la **TSR**, à savoir

l'effet turbulent causé par la modification de la résistance aérodynamique de l'air proche de la route, la modification du bilan radiatif de surface de la route par le blocage intermittent du flux radiatif par les véhicules et l'émission d'un flux radiatif infrarouge supplémentaire et les frottements des pneumatiques. La contribution énergétique de chacun de ces processus dépend à la fois de la densité du trafic et des conditions météorologiques. Les autres processus du trafic participent de manière moindre à cette amélioration. Ils doivent néanmoins être pris en considération dans la paramétrisation du trafic dans TEB dans l'état actuel d'avancement des travaux et avant de disposer de plus amples données pour d'autres conditions météorologiques, mais aussi pour préserver une modélisation correcte de T_{air} .

Dans cette même optique d'amélioration de la modélisation de l'état de surface circulée en conditions hivernales, la présence d'une lame d'eau a été étudiée. Le cycle hydrologique global urbain évoqué par le module Hydro associé à TEB prend en compte les processus hydrologiques. Il permet ainsi d'analyser les interactions hydro-énergétiques à la surface de la route. On s'est appuyé sur ce module pour conduire une analyse préliminaire sur l'influence de la lame d'eau présente en surface sur la modélisation de la température de surface. Les résultats indiquent qu'une surface mouillée induit une baisse de quelques degrés de cette température. Elle est liée à la perte d'énergie sous forme de flux de chaleur latente d'évaporation de l'eau présente. Pour la situation de Nancy, cette baisse est de l'ordre de 0.5 à 1°C, fonction des quantités d'eau disponibles en surface. En raison de l'absence d'observations pour la validation des résultats, on ne peut encore affirmer si cette prise en compte améliore la modélisation de l'état de surface. D'autres travaux méritent d'être accomplis pour valider et évaluer la robustesse du modèle TEB-Hydro d'une part, et d'autre part d'apprécier l'influence réelle de la lame d'eau en surface sur la température de surface. Sa présence en surface de la route est de plus affectée par le trafic et la présence de fondants routiers. Une description physique de certains de ces processus a été proposée, ainsi qu'une paramétrisation associée pour une intégration au modèle TEB-Hydro. Elle permettrait de mieux représenter les différents processus physiques intervenant dans la détermination du cycle hydrologique en milieu urbain et constituerait une des étapes pour améliorer la modélisation de l'état de surface et de la température de surface.

Les recherches menées au cours de cette thèse ont conduit concrètement à une meilleure prise en compte de phénomènes physiques impliqués dans le bilan énergétique dans une configuration urbaine à l'aide du modèle TEB en conditions hivernales. Sa configuration initiale conduisait à des températures de surface inférieures de près de 4°C aux mesures

expérimentales. Dans un tel cas de figure, notamment aux alentours de 0°C, cette vision pessimiste de la température de surface conduit à la programmation et la mise en œuvre de traitements par des fondants routiers. Ceux-ci sont fonction de l'état présent des voiries, du moment de la journée ainsi que du trafic associé, des niveaux de service des itinéraires et des prévisions météorologiques pour les heures à venir. L'intérêt est de garantir une adhérence adaptée pour assurer la mobilité et la sécurité des usagers. La configuration urbaine comprend à la fois les voies circulées, les voies dédiées (bus notamment), et présente un linéaire significatif. Ces interventions mobilisent des moyens humains et matériels et ont un coût pour la collectivité et des impacts à la fois sur les infrastructures (corrosion par les fondants routiers notamment) et l'environnement (qualité des eaux, eutrophisation de la végétation, etc.). La mise en place de ces modifications dans le code numérique TEB avec la seconde approche basée sur une paramétrisation détaillée des flux anthropiques associés au trafic a corrigé cet écart pour le ramener à une différence proche de l'incertitude des instruments de mesures. Cette vision plus réaliste et optimiste est alors susceptible de modifier fondamentalement la prise de décision associée, et par conséquent de contribuer à infléchir les impacts associés par des décisions désormais mieux éclairées.

Références

- Aida, M.: Urban albedo as a function of the urban structure – a model experiment (Part I), *Boundary-Layer Meteor.*, **23**, 405-413, 1982.
- Aida, M. and Gotoh K.: Urban albedo as a function of the urban structure – a two-dimensional numerical simulation (Part II), *Boundary-Layer Meteor.*, **23**, 415-424, 1982.
- Andrieux, C., Guillevic, P., Marsac, P. and Do, M.T.: Modélisation de l'état hydrique des routes, *Journée des sciences de l'ingénieur*, Marne la Vallée, 5-6 Décembre, 2006.
- Bärring L., Mattson J. O. and Lindqvist S.: Canyon Geometry, Street Temperature and Urban Heat Island in Malmö, Sweden, *J. Climatol.*, **5**, 433-444, 1985.
- Bentarzi, Y., Ghenaim, A. Terfous, A., Wanko, A., Hlawka, F. and Poulet, J.-B.: New material for permeable and purifying pavement in the urban areas: estimation of hydrodynamic characteristics, *NOVATECH*, 2010.
- Berthier, E.: Contribution à une modélisation hydrologique à base physique en milieu urbain. Elaboration du modèle et première évaluation *PhD thesis*, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1999.
- Blackburn, R. R., Bauer, K. M., Amsler, D. E., Boselly, S. E., and McElroy, A. D.: Snow and Ice Control: Guidelines for Materials and Methods, *National Cooperative Highway Research Program. Report 526*, January 2004.
- Blundell, M. and Harty D.: Multibody Systems Approach to Vehicle Dynamics, Elsevier Butterworth-Heinemann, 541 pp., 2004.
- Boiselle L.: Guide de bonnes pratiques. Gestion éco-responsable des terrains, *Gouvernement du Québec*, 2010.
- Boone, A. : Modélisation des processus hydrologiques dans le schéma de surface ISBA : Inclusion d'un réservoir hydrologique, du gel et modélisation de la neige, *PhD thesis, Hydrology and Meteorology, University of Paul Sabatier*, Toulouse, France. 2000.
- Borgen, J., Gustavsson, T., and Londquist, S.: A description of a local climatological model used to predict temperature variation along stretches of road, *Meteor Mag.*, **121**, 157-165, 1992.

Borgen, J., Gustavsson, T., Karlsson, M. and Postgard, U.: The impact of screening on road surface temperature, *Meteorol Appl.*, **7**, 97-104, 2000.

Borgen J. and Gustavsson, T.: Site specific road surface temperature forecast improvements by use of radiation measurements, *Proceedings of the 11th SIRWEC Conference*, Sapporo Japan, 26-28 January, 2002.

Bouilloud, L: Modélisation des caractéristiques de surface d'une chaussée en condition hivernale en fonction des conditions météorologiques, PhD Thesis, Université de Toulouse III, 2006.

Bouilloud, L. and Martin, E.: A coupled model to simulate snow behavior on roads. *J. Appl. Meteorol. Clim.*, **45**, 500-516, 2006.

Browne, A. L., Wicker, D., and Segalman, D.: A general model for power loss in pneumatic tires, GM Research Laboratories, Engineering Mechanics Department, GMR-4005, 1980.

Brown, M., Grimmond, S., and Ratti, C.: Comparison of Methodologies for computing Sky View Factor in Urban Environments, *International Society of Environmental Hydraulics Conf.*, Tempe, Arizona, USA, 5-8 December, 2001.

Bueno, B., Pigeon, G., Norford, L., Zibouche, K. and Marchadier, C.: Development and evaluation of a building energy model integrated in the TEB scheme, *Geosci Model Dev.*, **5**, 433–448, 2012.

Bueno, B., Hidalgo, J., Pigeon, G., Norford, L. and Masson, V., Calculation of air Temperatures above the urban canopy layer from measurements at a rural operational weather station, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **52**, 472–483, 2013.

Butler, D., and Davies J-W.: Urban Drainage. *Spon Press*. 543p, 2004.

CCFA, Information presse, La croissance du parc automobile Français en 2013, *Le Comité des constructeurs français d'automobiles*, 2014.

Chancibault, K., Lemonsu, A., Brun, J.M., De Munck, C., Allard, A., Long, N., Bellec, A., Masson, V. and Andrieu, H.: Hydrologicalevaluation of urbangreening scenarios: application to the City of Nantes, in France, *Proceedings of the 13th ICUD*, Sarawak, Malaysia, 7-12 September, 2014.

- Chapman, L.: Improved one dimensional energy balance modeling, *Proceedings of the 10th SIRWEC Conference*, Davos Switzerland, 22-24 March, 2000.
- Chapman, L., Thornes, J. E., and Bradley, A.V.: Modeling of road surface temperatures from a geographical parameter database. Part 1: Statistical, *Meteorol Appl.*, **8**, 409-419, 2001a.
- Chapman, L., Thornes, J.E. and Bradley, A.V.: Modeling of road surface temperature from a geographical parameter database. Part 2: Numerical, *Meteorol Appl.*, **8**, 421-436, 2001b.
- Chapman, L., Thornes, J. E. and Bradley, A. V.: Rapid determination of canyon geometry parameters for use in surface radiation budgets, *Theoretical Appl. Climatol.*, **69**, 81-89, 2001c.
- Chapman, L., Thornes, J.E., Bradley, A.V.: Sky-view factor approximation using GPS receiver, *Int. J. Climatol.*, **22**, 615-621, 2002.
- Chapman, L., Thornes, J.E.: Road ice prediction using geomantic, *Proceedings of the 12th SIRWEC Conference*, Bingen, Allemagne, 16-18 June, 2004.
- Chatelet, A., Fernandez, P. and Lavigne, P. : Architecture climatique ; une contribution au développement durable, Tome 2, *Concepts et dispositifs*, Edition EDISUD, 159 pp. 1998.
- Colombert M.: Contribution to the analysis of the various means to take into account urban climate in urban planning, *PhD thesis, Engineering Science*, University of Paris-Est, France, 2008.
- Crevier, L. P. and Delage, Y.: METRo: A new model for road-condition forecasting in Canada, *J. Appl. Meteor.*, **40**, 2026–2037, 2001.
- Crutzen, P. J.: New directions: The growing urban heat and pollution « island » effect impact on chemistry and climate, *Atmospheric Environment*, **38**, 3539-3540, 2004.
- Decharme, B., Boone, A., Delire, C. and Noilhan, J.: Local evaluation of the Interaction between Soil Biosphere Atmosphere soil multilayer diffusion scheme using four pedotransfer functions, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **116**, 2156-2202, 2011.
- De Munck, C., Pigeon, G., Masson, V., Meunier, F., Bousquet, P., Tréméac, B., Merchat, M., Poeuf, P. and Marchadier, C.: How much can air conditioning increase air temperature for a city like Paris, France?, *International Journal of Climatology*, **33**, 210-227, 2013.

Denby B.R. and Sundvor, I.: NORTRIP Model development and documentation: Non-exhaust Road Traffic Induced Particle, 132p. 2012.

Denby B.R., Sundvor, I., Johansson, C., Pirjola, L., Ketznel, M., Norman, M., Kupiainen, K., Gustafsson, M., Blomqvist, G., Kauhaniemi, M. and Omstedt G.: A coupled road dust and surface moisture model to predict non-exhaust road traffic induced particle emissions (NORTRIP). Part 2: Surface moisture and salt impact modeling, *Atmospheric Environment*, **81**, 485-503, 2013.

Dettwiller, J.: L'évolution séculaire de la température à Paris, *La Météorologie*, **13**, 95-130, 1978.

DiSabatino, S., Kastner-Klein, P., Fedorovich, E., Ketznel, M., Berkowicz, R. and Britter, R.: The Modeling of Turbulence from Traffic in Urban Dispersion Models - Part I: Theoretical Considerations, *Environmental Fluid Mechanics*, **3**, 129-143, 2003.

DOVH: Dossier d'Organisation de la Viabilité Hivernale du réseau routier départemental, *Conseil général Seine et Marne*, hiver 2012-2013.

DOVH: Dossier d'Organisation de la Viabilité Hivernale du réseau routier départemental, *Conseil général Seine et Marne*, hiver 2013-2014.

Dow, C. and DeWalle D.: Trends in evaporation and bowen ratio on urbanizing watersheds in eastern United States, *Water Resources Research*, **36**, 1835-1843, 2000.

Dupont, S., Mestayer, P., Guilloteau, E., Berthier, E. and Andrieu, H.: Parameterization of the urban water budget with the submesoscale soil model, *J. Appl. Meteorol Clim.*, **45**, 624-648, 2006.

Dupasquier B.: Modélisation hydrologique et hydraulique des infiltrations d'eaux parasites dans les réseaux séparatifs d'eaux usées. *Ph. D. thesis*, Ecole Nationale du Genie Rural, des Eaux et Forêts, Paris, France, 1999.

Durickovic, I.: Etude par spectroscopie Raman de la salinité résiduelle issue de l'épandage de fondants routiers sur la chaussée, *PhD thesis, Physical science matarials*, University of Paul Verlaine-Metz, France, 2008.

- Durickovic, I., Marchetti, M., Suaire, S., Derombise, G.: Raman spectroscopic evaluation of the dissemination of road de-icers in the environment, *European Geosciences Union – General Assembly*, Vienne (Autriche), 7-12 April, 2013.
- Ebbott, T. G., Hohman, R. L., Jeusette, J. P. and Kerchman, V.: Tire Temperature and Rolling Resistance Prediction with Finite Element Analysis, *Tire Science and Technology, TSTCA*, **27**, 2- 21, 1999.
- Eliasson I.: Urban Nocturnal Temperatures, Street Geometry and Land Use, *Atmos. Environ.*, **30**, 379-392, 1996.
- Eliasson I.: The use of climate knowledge in urban planning, *Landscape and Urban Planning*, **48**: 31-44, 2000.
- Escourrou G. : Climat et environnement. Les facteurs locaux du climat. Paris, Masson, *Espace géographique. Tome 11 n°3*, 184 pp., 1982.
- Escourrou, G. : Le climat et la ville, Paris, *Éditions Nathan*, 1991.
- Feddes R., Hoff H., Bruin M., Dawson T., Rosnay, P., Dirmeyer, P., Jackson, R., Kabat, P., Kleidon, A. and Pitman, A.: Modelling root water uptake in hydrological and climate models, *Bulletin of the American Meteorological Society*, **82**, 2797-2809, 2001.
- Fujimoto, A., Watanabe, H., and Fukuhara, T.: Effects of tire frictional heat on snow covered road surface, *Proceedings of the 13th SIRWEC Conference*, Torino, Italy, 25-27 March, 2006a.
- Fujimoto, A, Watanabe, H, Fukuhara, T, Saito, T, Nemoto, M, Mochizuki, S and Kishii, T.: Heat and water vapor transfer between atmosphere and pavement surface under dry, wet, ice plate and packed snow state, *Journal of Snow Engineering of Japan*, **22**, 3, 14-22, 2006b.
- Fujimoto, A., Watanabe, H., and Fukuhara, T.: Modeling of vehicle heats and its influence on surface temperature of dry road, *Doboku Gakkai Ronbunshuu E.*, **63**, 202-213, 2007.
- Fujimoto, A., Watanabe, H., and Fukuhara, T.: Effects of vehicle heat on road surface temperature of dry condition, *Proceedings of the 14th SIRWEC Conference*, Standing International Road Weather Commission, Prague, Czech Republic, 14-16 May, 2008.
- Fujimoto, A., Watanabe, H. and Fukuhara, T.: Influence of vehicle heats on “black ice”, *Proceedings of 13th REAAA Conference*, Incheon Korea, 2009.

- Fujimoto, A., Saida, A., Fukuhara, T., and Futagami, T.: Heat transfer analysis on road surface temperature near a traffic light, *Proceedings of the 17th ITS World Congress*, Busan, South Korea, Intelligent Transportation Society, T_AP01138, 2010.
- Fujimoto, A., Watanabe, H., and Fukuhara, T.: A New Approach to Modeling Vehicle-Induced Heat and Its Thermal Effects on Road Surface Temperature, *J. Appl. Meteorol Clim.*, **51**, 1980-1993, 2012.
- Fujimoto, A., Tokunaga, R., Kiriishi, M., Kawabata, Y., Takahashi, N., Ishida, T. and Fukuhara, T.: A road surface freezing model using heat, water and salt balance and its validation by field experiments, *Cold Regions Science and Technology*, **106-107**, 1-10, 2014.
- Furusho, C.: Modélisation Hydrologique des Bassins Versant Périurbain, *PhD Thesis*, University of Nantes, France, 2011.
- Furusho, C., Chancibault, K. and Andrieu, H.: Analysis of the hydrological functioning of an urbanizing river basin, *Hydrological Processes*, **28**, 1809-1819, 2014.
- Gavin, H. and Agnew, C.T.: Evaluating the reliability of point estimates of wetland reference evaporation, *Hydrology and Earth System Sciences*, **7**, 3-10, 2003.
- Gaussorgues G., La thermographie infrarouge, *Techniques et Documentation (France)*, 386 p., 1981.
- Giguère M.: Mesure de lutte aux îlots de chaleur urbaine, *Institut National de santé publique de Québec*. 77 p., 2009.
- Goodman, S.: Heat Island, Urban Climatology and air Quality, 1999. Available at: weather.msfc.nasa.gov/urban/urban_heat_island/.html.
- Grimmond C.S.B. and Oké, TR.: Aerodynamic Properties of Urban Areas Derived from Analysis of Surface Form, *Journal of Applied Meteorology*, **38**, 1262-1292, 1991.
- Guibet J. C.: Carburant liquides, *Techniques de l'ingénieur*, BE 8545, 1998.
- Gustavsson T. and Bogren, J.: Infrared thermography in applied road climatological studies, *Int. J. Remote Sens.*, **19**, 1311-1328, 1991.
- Gustavsson, T. and Bogren, J.: Evaluation of a local climatological model – test carried out in the country of Halland, Sweden, *Metreorol. Mag.*, **122**, 257-266. 1993.

Gustavsson T., Bogren, J., and Greeb, C.: Road climate in cities: a study of Stockholm area, south-east Sweden, *Meteorol Appl.*, **8**, 481-490, 2001.

Gustafsson, M. and Blomqvist, G.: Patterns of residual salt on road surface – case study, *Proceedings of the 6th International Symposium on Snow Removal and Ice Control Technology*, Washington, U.S.A, 7-9 juin, 2004.

Hamdi, R. and Masson V.: Inclusion of a Drag Approach in the Town Energy Balance (TEB) Scheme: Offline 1D Evaluation in a Street Canyon, *J. Appl. Meteorol Clim.*, **47**, 2627–2644, 2008.

Handbook of Military Infrared Technology: Office of Naval Research Department of the Navy (Washington D.C., USA), 906 p., 1965.

Ichinose T., Shimodozono, K., and Hanaki, K.: Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo, *Atmospheric Environment*, **33**, 3897-3909, 1999.

Ishikawa N., Narita, H., and Kajiya, H.: Contribution of heat from traffic vehicle to snow melting on roads, *Transp. Res. Rec.*, **1672**, 28-33, 1999.

Jacobs, W., and Raatz, W.E.: Forecasting road surface temperature for specific site characteristics using an energy balance model, *Proceeding of the 8th SIRWEC Conference*, Birmingham, UK, 17-19 April, 1996.

Jea Y., Ni G., Kawahara Y. and Suetsugi T.: Development of WEP model and its application to an urban watershed, *Hydrological Processes*, **15**, 2175-2194, 2001.

Joannis C.: Les études diagnostic de réseaux d'assainissement. Analyse rétrospective et propositions, *Série environnement et génie urbain, Etudes et recherche des LPC*, 1993.

Kalthoff, N., Baumer, D., Corsmeier, U., Kohler, M. and Vogel, B.: Vehicle-induced turbulence near a motorway, *Atmospheric Environment*, **39**, 5737-5749, 2005.

Kane, M., and Do, M.-T.: Kinematic wave approach to model water depth on road surfaces during and after rainfall events, *International Journal of Pavement Engineering*, iFirst Article1-11, 2011.

Kaufmann, D. W.: Sodium Chloride, the Production and Properties of Salt and Brine, *Reinhold Publishing Corporation*, **Chapter 23**, 562-565, 1960.

Klysik K.: Spatial and seasonal distribution of anthropogenic heat emissions in Lodz Poland, *Atmospheric Environment*, **30**, 3397-3404, 1996.

Kršmanc, R., Šajn Slak, A., Čarman, S. and Ivačič, M.: Next Steps In Forecasting Road Surface Temperature And Developing Mdss, *ISEP*, 2011.

Lean, J. and Warrilow, D. A.: Simulation of the regional climatic impact of Amazon deforestation, *Nature*, 342, 411-413, 1989.

Lemonsu, A., Masson, V., and Noilhan, J.: Hydrological Validation of The TEB Scheme On A Suburban Basin, *EGS XXVII General Assembly*, Nice, 21-26 April, 2002.

Lemonsu, A.: Modélisation des processus de surface et de la couche limite en milieu urbain. *PhD thesis, Urban Meteorology*, University of Toulouse III, France, 2003.

Lemonsu, A., Bastin, S., Masson, V., and Drobinski, P.: Study of the stratification of the urban boundary layer of Marseille under sea-breeze condition, *Proceeding of the 5th Conference on Urban Environment*, Vancouver, Canada, 23-27, August, 2004.

Lemonsu, A., Bélair, S., Mailhot, J. and Leroyer, S.: Evaluation of the Town Energy Balance Model in Cold and Snowy Conditions during the Montreal Urban Snow Experiment 2005, *J. Appl. Meteorol Clim.*, 49, 346–362, 2010.

Lemonsu, A., Masson, V., Shashua-Bar, L., Erell E. and Pearlmutter, D.: Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modeling urban green areas, *Geosci. Model Dev.*, **5**, 1377–1393, 2012.

Lin, Y-J., and Hwang, S-J.: Temperature prediction of rolling tires by computer simulation, *Mathematics and Computers in Simulation*, 67, 235–249, 2004.

Marchetti M., Ibos L., Muzet, V., Pitre R., Boudenne A., Datcu S., Candau Y. and Livet J., Emissivity Measurements of Road Materials, *QIRT Journal*, **1**, 1-7, 2004.

Marchetti M., Livet, J., Poissonier, S. and Diop, I.: Effect of temperature and relative humidity, Congrès AIPCR, Sestrière Italie, 27-30 March, 2006a.

Marchetti M., Ibos L., Boudenne A., Datcu S., Candau Y., Dumoulin J., and Livet J.: Infrared Emissivity Device : Principle and Applications, *Measurement, Science and Technology*, **17**, 2950–2956, 2006b.

Marchetti, M., Duval, R., Livet, J., Maurice, F., Pecquenard, P., and Guillevic, P.: "Numerical Evolution of De-Icer Amount on Pavement Surface: Traffic and Weather Influences, *Snow Removal and Ice Control*, Indianapolis (USA), Transportation Research Circular, EC-126, **16**, 112-124, 2008.

Marchetti, M., Moutton, M., Ludwig, S. Ibos, L., Feuillet, V. and Dumoulin, J.: Implementation of an infrared thermography camera for road thermal mapping, *Proceedings of the 10th QIRT Conference*, Quebec, Canada, 27-30 July, 2010.

Marchetti, M., Moutton, M., Ludwig, S. Ibos, L., Feuillet, V. and Dumoulin, J.: Road networks winter risk estimation using onboard uncooled infrared camera for surface temperature measurements over two lanes, *International Journal of Geophysics*, **2011**, 8pp., 2011.

Masson V.: A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models, *Boundary-Layer Meteor.*, **94**, 357-397, 2000.

Masson, V., Grimmond, C.S.B. and Oke, Tr.: Evaluation of the Town Energy Balance (TEB) Scheme with Direct Measurements from Dry Districts in Two Cities, *Journal of Applied Meteorology*, **41**, 1011-1026, 2002.

Masson, V. and Seity, Y.: Including atmospheric layers in vegetation and urban offline surface schemes, *J. Appl. Meteorol Clim.*, **48**, 7, 1377–1397, 2009.

Masson V., Le Moigne P., Martin E., Faroux S., Alias A., Alkama R., Belamari S., Barbu A., Boone A., Bouysse F., Brousseau P., Brun E., Calvet J.-C., Carrer D., Decharme B., Delire C., Donier S., Essaouini K., Gibelin A.-L., Giordani H., Habets F., Jidane M., Kerdraon G., Kourzeneva E., Lafaysse M., Lafont S., Lebeaupin Brossier C., Lemonsu A., Mahfouf J.-F., Marguinaud P., Mokhtari M., Morin S., Pigeon G., Salgado R., Seity Y., Taillefer F., Tanguy G., Tulet P., Vincendon B., Vionnet V., Voldoir A.: The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variable and fluxes, . *Model Dev.*, **6**, 929-960, 2013.

Mitchell V.G., Mein R.G. and McMahon T.A.: Modeling the urban water cycle, *Environmental Modelling & Software*, **16**, 615-629, 2001.

Mitchell V.G., Cleugh H.A., Grimmond C.S.B., Xu J.: Linking urban water balance and energy balance models to analyze urban design options, *Hydrological Processes*, **22**, 2891-2900, 2008.

Mimura, Y., Yoshitake, I., Tsuji, K., Tanimoto, T. and hamada, S.: Influence of heating pipe on snow melting and mechanical properties. *Proceedings of the 12th SIRWEC Conference*, Bingen, Allemagne, 16-18 June, 2004.

Ministère de l'Écologie , du Développement durable, des transports et du logement, 2011. Available at : www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/vehiculesauxnormes.pdf.

Möller, S.: VTI-winter Model: Road Condition Model, *The Swedish National Road and Transport Research Institute, Linköping (VTI Report 529) (in Swedish)*, 2006.

Monteith, J.L.: Evaporation and environment, In G.E. Fogg (ed.) Symposium of the Society for Experimental Biology, *The State and Movement of Water in Living Organisms*, **19**, pp. 205-234, 1965.

Monteith, J.L.: Evaporation from land surfaces: Progress in analysis and prediction since 1948, *Advances in Evapotranspiration*, 4-12, 1985.

Muzet, V., Borel, S. and Lassoued, R.: Study of the snow pavement interface: GELCRO project, *Proceedings of the 10th SIRWEC Conference*, Davos, Suisse, 22-24 mars, 2000.

Nakayama T., Fujita T.: Cooling effect of water-holding pavements made of new materials on water and heat budgets in urban areas, *Landscape and Urban Planning*, **96**, 57-67, 2010.

Noilhan, J. and Planton, S.: A simple parameterization of land surface processes for meteorological models, *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 536-549, 1989.

Noilhan, J. and Mahfouf, J. F.: The ISBA land surface parameterization scheme, *Global and Planetary Change*, **13**, 145-159, 1996.

Nunez, M. Oke, T.R.: The energy balance of an urban canyon. *Journal of Applied climatology*, **16**, 1977.

Offerle, B., Grimmond, C. S. B. and Fortuniak, K.: Heat storage and anthropogenic heat flux in relation to the energy balance of a central European city centre, *Int. J. Climatol.*, **25**, 1405-1419, 2005.

- Oke, T.R.: Boundary Layer Climates, London: Methuen and Co Ltd, 372 pp., 1978.
- Oke, T.R.: Street design and urban canopy layer climate, *Energy and Buildings*, **11**, 103-113, 1988.
- Oke, T.R. Johnson, G.T. Steyn, D.G. and Watson, I.D.: Simulation of surface urban heat islands under 'ideal' conditions at night. Part 2: Diagnosis and causation, *Boundary Layer Meteorology*, **56**, 275-294, 1991.
- ONISR : L'accidentalité routière en 2013, *Observatoire national interministériel de la sécurité routière*, 2013.
- ONISR : L'accidentalité routière en 2014 : Bilan sommaire (estimations janvier 2015), *Observatoire national interministériel de la sécurité routière*, 2014.
- Parmenter B. S. and Thornes, J.E.: The use of a computer model to predict the formation of ice on road surfaces, *Transport and Road Research Laboratory*, Research Report, **71**, 1-19, 1986.
- Paumier J.-L., Pérus, A. and Isaka, H.: Facteurs météorologiques de la sécurité routière : Détermination et prévision des conditions de formation du verglas - Bilan de l'étude 1988, *Programme détaillé de l'étude 1989, annexe 5*, 1989.
- Paumier J.L. and Arnal, M.: Expérimentation Préviroute sur l'autoroute A75 dans le Cantal, *Revue générale des routes et des aérodromes*, **758**, 44-51, 1998.
- Petty, K. R. and Mahoney, W. P.: The U.S. Federal Highway Administration winter road Maintenance Decision Support System (MDSS): Recent enhancements and refinements, *Proceedings of the 14th Standing International Road Weather Conference*, Standing International Road Weather Commission, Prague, Czech Republic, 14-16 May, 2008.
- Pigeon, G., Durand, P. and Masson, V.: Evaluating parameterization of anthropogenic heat release in urban land surface scheme from field measurements and energy consumption inventory over Toulouse during Capitoul, *The 86th AMS Annual Meeting : Symposium on the urban environment*, Atlanta, Etats-Unis, 30 January-2 February, 2006.
- Pigeon G., Legain, D., Durand, P., and Masson, V.: Anthropogenic heat release in an old European agglomeration (Toulouse, France). *Int. J. Clim.*, **27**, 1969-1981, 2007.

Pigeon G., Moscicki, M.A., Voogt, J.A. and Masson, V. 2008: Simulation of fall and winter surface energy balance over a dense urban area using the TEB scheme, *Meteorol. Atmos. Phys.*, **102**, 159-171, 2008.

Pigeon, G., Zibouche K., and Bueno, B.: Development and evaluation of a comprehensive energy model in TEB, *Proceedings of the 8th ICUC Conference*, Dublin, IRL, 6-10 August, 2012.

Postgard, U. and Nunez, N.: Continuous measurements of sky-view factors along roads and their relationship to air and road surface temperature. *Unpublished PhD thesis, Road Climate variation Related to weather and Topography*, Postgard, University of Gothenburg, Sweden, 2000.

Prusa J.M., Segal, M. Temeyer, B.R. Gallus, W.A. and Takle, E.S.: Conceptual and scaling evaluation of vehicle traffic thermal effects on snow/ice-covered roads, *J. Appl. Meteor.*, **41**, 1225-1240, 2002.

Rayer, P.J.: The Meteorological Office forecast road surface temperature model, *Meteor Mag.*, **116**, 180-191, 1987.

Roberts, S. M., Oke, T. R., Grimmond, C. and Voogt, J. A.: Comparison of four methods to estimate urban heat storage, *J. Appl. Meteorol Clim.*, **45**, 1766–1781, 2006.

Robinson, D., Stone, A.: Solar radiation modeling in the urban context, *Solar Energy* **3**, **77**, 295–309, 2004.

Rodriguez, F., Andrieu H. and Morena, F.: A distributed hydrological model for urbanized areas, Model development and application to urban catchments *Journal of Hydrology*, **351**, 268-287, 2008.

Ringebach, N., Bilan radiatif et flux de chaleur en climatologie urbaine : mesures, modélisation et validation sur Strasbourg, *PhD thesis, Climate and Weather*, University of Strasbourg I, 2004,

Sass, B.H.: A numerical model for prediction of road surface temperature and ice, *J. Appl. Meteor.*, **31**, 1499-1506, 1992.

Sass, B.H.: A numerical forecasting system for the prediction of slippery roads, *J. Appl. Meteor.*, **36**, 801-817, 1997.

Sacré, C.: Le confort dans les espaces extérieurs : analyse microclimatique. Nantes: *PhD thesis, Climatology*, University of Nantes, France, 1983.

Sailor, D.J. and Lu, L.: A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas, *Atmospheric Environment*, **38**, 2737-2748, 2004.

Sandberg, U.: Efficiency of spray protectors, tests 1979, *VTI Report No 199A, National Road and Traffic research Institute*, Linköping, Sweden, 1980.

Sato T., Kosugi, K. Abe, O. Mochizuki, S. and Koseki, S.: Wind and air temperature distribution in the wake of a running vehicle, *Proceeding of the 12th SIRWEC Conference*, Bingen, Germany, 16-18 June, 2004.

Sétra : Anticipation des risques routiers hivernaux: Éléments de réflexions, *Services d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements*, 2006.

Sétra : Viabilité hivernale : Approche globale, *Services d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements*, 2010.

Sétra : L'impact de fondants routiers sur l'environnement: Etat de connaissance et piste d'actions, *Services d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements*, 2011.

Sétra : Viabilité hivernale : Fiches pratiques « aide mémoire », *Services d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements*, 2013.

Shao, J.: A winter road surface temperature model with comparison to others, *Unpublished PhD thesis*, University of Birmingham, UK, 1990.

Shao, J. and Lister, P.J.: The prediction of road surface state and simulation of the shading effect, *Boundary-Layer Meteorology*, **73**, 411-419, 1995a.

Shao, J. & Lister P. J.: Data filtering of thermal mapping of road surface temperature, *Meteorol. Appl.*, **2**, 131-135, 1995b.

Shao, J. and Lister, P.J.: An automated now casting model of road surface temperature and state for winter road maintenance. *J. Appl. Meteor.*, **35**, 1352-1361, 1996.

Shao, J. and Jones, S.A.: Area forecast model for winter road maintenance over a road network, *Proceeding of the 16th SIRWEC Conference*, Helsinki, 23-25 May, 2012.

Snow and Ice Databook : Rapport du comité technique de l'association mondiale de la route (AIPCR) sur la viabilité hivernale, 2006.

Snow and Ice Databook : Rapport du comité technique de l'association mondiale de la route (AIPCR) sur la viabilité hivernale, 2010.

Solazzo, E., Cai, X. M. and Vardoulakis, S.: Modeling wind flow and vehicle-induced turbulence in urban streets, *Atmospheric Environment*, **42**, 4918-4931, 2008.

Srirangam, S.K., Anupam, K., Scarpas, A. and Kösters, A.: Influence of Tire Temperature Increase on Friction Measurements: Laboratory Tests and Finite Element Modeling Aspects I. *Head, Program of Mechanics of Infrastructure Materials*, 2013.

Surgue J. G., Thornes, J.E., and Osborne, R.D.: Thermal mapping of road surface temperatures, *Phys. Technol.*, **13**, 212–213, 1983.

Svensson M. K.: Urban Climate in Relation to Land Use, Planning and Comfort, *Earth Science Centre, Göteborg University A79 paper 2*, 2002.

Svensson M. K.: Sky View Factor Analysis-Implications for Urban Air Temperature Differences, *Meteorol. Appl.*, **11**, 201-211, 2004.

Taha, H.: Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration and anthropogenic heat, *Energy and Buildings*, **25**, 99-103, 1997.

Takahashi, N., Asano, M., and Ishikawa, M.: Developing a method to predict road surface icing conditions applying a heat balance method, *Proceeding of Cold Region Technology Conference.*, **21**, 201-208, 2005.

Thornes, J.E.: The prediction of ice formation on motorways, *PhD thesis*, University of College, London, 1984.

Thornes, J. E.: Thermal mapping and road-weather information systems for highway engineers, *Highway Meteorology*, **Taylor and Francis**, London, 39-67, 1991.

Thornes, J.E., Cavan, G., Chapman, L.: The use of GIS and IceMiser to predict winter road surface temperatures in Poland, *Proceedings of the 12th SIRWEC Conference*, Bingen, Allemagne, 16-18 June, 2004.

Upmanis, H. and Chen, D.: Influence of geographical factors and meteorological variables on nocturnal urban– park temperature differences, A case study of summer 1995 in Göteborg, Sweden, *Climate Res.*, **13**, 125–139, 1995.

Vaa, T.: Implementation of a new sanding method in Norway, *Proceedings of the 6th International Symposium on Snow Removal and Ice Control Technology*, Washington, U.S.A, 7-9 June, 2004.

Vaa, T.: Implementation of the new sanding method in Norway, *Proceedings of the 12th International Winter Road Congress*, Torino, Italie, 27-30 March, 2006.

Watanabe, H., Fujimoto, A. and Fukuhara, T.: Modeling of heat supply to pavement from vehicle, *Proceedings of the 21th Cold Region Technology Conference*, Sapporo, Japan, *Amer. Soc. of Civil Engineers*, 195–200, 2005.

Weir D.H., Strange, J.F. and Heffley, R.K.: Reduction of Adverse Aerodynamic Effects of Large Trucks, U.S. *Department of Transportation, Federal Highway Administration*, Report No. FHWA-RD-79-84, 1978.

Wong, J. Y., *Theory of Ground Vehicles*, 3rd Ed., Wiley, 2001.

Xiao Q., McPherson E.G., Simpson, J. R., Ustin S.L.: Hydrologic processes at the urban residential scale, *Hydrological Processes*, **21**, 2174–2188, 2007.

Résumé

En viabilité hivernale, la prévision de l'état de surface des infrastructures s'avère indispensable, et permet une anticipation, une meilleure coordination et une efficacité d'intervention des services d'exploitation. La majorité des pays dispose de modèles de prévision de la température de surface d'infrastructures et des routes en particulier (TSR). La complexité de ces outils d'aide à la décision est croissante, pour servir au mieux les usagers et l'exploitant. Le microclimat urbain influence le bilan énergétique de surface selon différents processus : radiatifs, aérodynamiques et hydrologiques. Néanmoins, d'autres processus physiques anthropiques influencent cette TSR, tel que le trafic. Des travaux ont été menés par le passé concernant l'apport énergétique du trafic dans le bilan thermique de la ville. Celui-ci a fait l'objet d'études sur les périodes estivales et les îlots de chaleur urbains associés. Cependant, dans les cas de dégradations des conditions hivernales de circulation, ces apports énergétiques ont été intégrés de façon marginale dans la modélisation des paramètres de surface de la route. L'absence de cette contribution du trafic dans la modélisation du bilan énergétique de surface explique, dans une certaine limite, la prévision imparfaite de l'état de surface de la route. La bibliographie recense plusieurs études conduites afin d'identifier et de quantifier ces effets du trafic. Elles n'ont pas ou peu traité la perte ou le gain d'énergie causé par le passage des véhicules sur le bilan énergétique de surface, ou sur la modélisation de la TSR. Dans la présente étude, deux approches ont été proposées pour paramétrer le trafic dans le modèle numérique Town Energy Balance (TEB), l'une globale et la seconde détaillée. Leur analyse comparée indique que la seconde a significativement amélioré les résultats de la modélisation de la TSR. Les apports thermiques du trafic ont augmenté la TSR de 2 à 4°C pour la rapprocher des mesures expérimentales (écart de 0.5 à 1°C en moyenne). Elle est le résultat de l'effet cumulatif des différents processus physiques associés au trafic, et varie en fonction de ses paramètres (densité, vitesse de circulation, fluidité, etc.). Une étude de sensibilité a été menée afin d'apprécier les processus physiques responsables de l'amélioration de la TSR. Les résultats indiquent que l'effet turbulent, la densité de flux radiatif ainsi que la densité de flux due aux frottements des pneumatiques contribuent le plus à l'augmentation la TSR. Néanmoins la contribution énergétique de chacun de ces processus dépend à la fois des paramètres du trafic et des conditions météorologiques.

Cette étude a présenté également une analyse préliminaire de l'influence de la lame d'eau présente en surface sur la TSR. Cette dernière décroît en fonction de l'épaisseur de la lame d'eau. Les facteurs anthropiques tels que le trafic et l'adjonction de fondants routiers sur la lame d'eau présente en surface sont décrits et discutés, et une paramétrisation proposée en perspectives.

Mots clefs

Microclimat urbain, modélisation, état de surface, modèle numérique, trafic, paramétrisation, viabilité hivernale, lame d'eau, fondants routiers.

Abstract

In winter maintenance, forecasting the infrastructure surface status is mandatory, to allow anticipation, better coordination and efficiency of services. The majority of countries have forecast models of the infrastructure surface temperature and especially roads one (RST). The complexity of these decision tools is growing, to best serve the users and managers. The urban microclimate influences the surface energy balance according to various processes: radiative, aerodynamic and hydrologic. However, other anthropogenic physical processes influence this RST, such as traffic. Studies have been carried out in the past about the traffic heat input in the town heat balance. These were conducted on the summer periods and associated urban heat islands. However, in case of traffic in adverse winter conditions, these energy contributions were marginally integrated into the modeling of the road surface parameters. The absence of this traffic's contribution in the surface energy balance modeling explains, to a given limit, the imperfect forecasting of road surface status. The literature identifies several studies conducted to identify and to quantify these effects of traffic. They have insufficiently or not treated the loss or gain on energy caused by circulating vehicles on the surface energy balance, or on modeling the RST. In this study, two approaches have been proposed to parameterize the traffic in the Town Energy Balance (TEB) numerical model, this first one being overall and the second one detailed. Their comparative analysis indicates that the second significantly improved the results of the RST modeling. The traffic heat inputs increased RST by 2 to 4°C, results being then closer to experimental measurements (average difference of 0.5 to 1°C). It is the result of the cumulative effect of the various traffic physical processes, and varies according to its parameters (density, vehicle velocity, fluidity, etc.). A sensitivity analysis was conducted to assess the physical processes responsible for the improvement of the RST. The results indicate that the turbulent effect, the radiative heat flux and flux density due to tires friction represent the greatest contribution to RST increase. Nevertheless the energy contribution of each of these processes depends both traffic parameters and weather conditions.

This study also presented a preliminary analysis of the influence of a water layer over the surface on the RST. The latter decreases as a function of the thickness of the water layer. Anthropogenic factors such as traffic and the addition of de-icing products into the water layer present on the surface are described and discussed, and a parameterization proposed as a perspective.

Keywords

Urban microclimate, surface states, modeling, numerical model, traffic, parameterization, winter maintenance, water layer, de-icers.