

APPEL A PROJETS 2007 DE LA VILLE DE PARIS

PROGRAMME DE RECHERCHE SUR PARIS



Projet **EPICEA**

Etude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement climatique à
l'Echelle de l'Agglomération parisienne



Rapport sur le volet 2

*Annexe A : Note sur la préparation des données
physiographiques en entrée de SURFEX pour l'agglomération
parisienne*

Rédigé par C. de Munck et G. Pigeon
Centre National de Recherches Météorologiques
CNRM/GMME/TURBAU

Modifié par R. Kounkou-Arnaud
Météo-France
DIRIC/BEC

Décembre 2009

Mise à jour : 06/09/11

Table des matières

1 Préparation des données d'occupation du sol pour SURFEX.....	6
1.1 Contexte.....	6
1.2 Surface et fraction de surfaces aquatiques dans la maille.....	6
1.3 Surface et fraction de ville dans la maille (TEB).....	7
2 Préparation des données d'entrée pour TEB.....	9
2.1 Préalable.....	9
2.2 Types de matériaux dominant pour les toits.....	9
2.3 Surface et fraction de bâti dans la ville.....	10
2.4 Hauteur moyenne des bâtiments dans la maille.....	12
2.5 Calcul de la surface de murs des bâtiments.....	13
2.6 Surface et fraction de routes pour traitement dans ISBA.....	16
2.7 Types de matériau dominant pour les murs.....	17
2.8 Épaisseurs et caractéristiques radiatives et thermiques des murs.....	18
2.9 Caractéristiques radiatives et thermiques des toits.....	22
2.10 Caractéristiques radiatives et thermiques des routes.....	22
2.11 Ratio « surface de murs / surface urbaine au sol »	23
3 Préparation des données des espaces agricoles et naturels pour ISBA (appelé par TEB)	23
3.1 Surface et fraction d'espaces agricoles et naturels dans la maille (ISBA).....	23
3.2 Contexte.....	24
3.3 Répartition spatiale et fractions des types d'espaces agricoles et naturels.	25
3.4 Caractéristiques des types de végétation.....	26
3.5 Cas particulier du LAI pour la classe de végétation « forest ».....	27
4 Préparation des flux de chaleur liés au trafic automobile.....	27
4.1 Contexte.....	27
4.2 Calculs et corrections.....	27

Liste des tableaux

Tableau 1. Codes des types de matériaux dominant pour les toits.....	9
Tableau 2. Codes des types de matériaux dominant pour les murs.....	18
Tableau 3. Caractéristiques des murs.....	20
Tableau 4. Caractéristiques des toits par type de toit.....	22
Tableau 5. Caractéristiques des routes.....	23
Tableau 6. Classes de végétation ECOCLIMAP présentes dans Paris.....	25
Tableau 7. Règles de création des types de végétation pour Paris.....	26
Tableau 8. Corrections appliquées au Qtraffic calculé étape 3	30

Liste des figures

Figure 1. Fraction de surfaces aquatiques dans la maille pour l'agglomération parisienne.	7
Figure 2. Fraction de ville dans la maille (incluant la végétation urbaine).....	8
Figure 3. Fraction de ville dans la maille à laquelle on a soustrait la fraction de végétation urbaine.....	8
Figure 4. Types de toit présents sur l'agglomération parisienne.....	10
Figure 5. Fraction de bâti dans la maille.....	12
Figure 6. Hauteur moyenne des bâtiments dans la maille (en mètres).....	13
Figure 7. Comparaison entre les surfaces de murs calculées avec l'équation 5 (prof_bld = 14 m) et celles observées sur Paris intra-muros.....	14
Figure 8. Histogramme de la différence entre les surfaces de murs calculées avec l'équation 5 (prof_bld = 14 m) et celles observées sur Paris intra-muros.....	14
Figure 9. Comparaison entre les surfaces des murs calculées avec l'équation 5 (prof_bld = 11.40 m) et celles observées sur Paris intra-muros.....	15
Figure 10. Histogramme de la différence entre les surfaces de murs calculées avec l'équation 5 (prof_bld = 11,40 m) et celles observées sur Paris intra-muros.....	16
Figure 11. Fraction d'espaces agricoles et naturels dans la maille pour l'agglomération parisienne.....	24

1 Préparation des données d'occupation du sol pour SURFEX

1.1 Contexte

Les données fournies par l'APUR (Atelier Parisien d'Urbanisme) pour Paris ont été fournies pour 4 zones géographiques, respectivement appelées Paris stricto, Paris bord, grande couronne (GC) et petite couronne (PC). Avant leur intégration dans des simulations avec SURFEX, ces données ont été vérifiées et notamment les incompatibilités avec SURFEX. Par exemple, on ne peut pas définir une zone urbaine sans bâtiments dans TEB et il faut s'assurer que ce n'est pas le cas dans les données de l'APUR. Ce travail a été effectué dans le logiciel SIG GRASS (Version 6.4.). Les données de l'APUR ont ensuite été corrélées avec les données du CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) pour générer des grilles de caractéristiques radiatives et thermiques pour le bâti (albédo, émissivité, conductivité thermique, capacité calorifique et épaisseur).

Les données suivantes ont été retravaillées pour être cohérentes entre elles ou calculées :

- x les surface et fraction de ville dans la maille
- x les surface et fraction d'espaces agricoles et naturels dans la maille
- x les types de matériaux dominant pour les toits
- x les surface et fraction de bâti dans la ville
- x la hauteur moyenne des bâtiments dans la maille
- x la surface de murs des bâtiments
- x une surface de « routes » pour traitement dans ISBA (traitée comme un sol nu ayant les mêmes caractéristiques radiatives et thermiques qu'une route) lorsque des mailles présentaient des zones urbaines sans bâtiments
- x le rapport entre la surface des murs et la surface urbaine horizontale (variable WALL_O_HOR)
- x les types de matériaux dominant pour les murs
- x les caractéristiques radiatives et thermiques des murs
- x les caractéristiques radiatives et thermiques des toits
- x les caractéristiques radiatives et thermiques des routes

On rappelle que les données de l'APUR sont fournies par maille de 250 m*250 m, soit une surface de 62500 m².

1.2 Surface et fraction de surfaces aquatiques dans la maille

La « surface d'eau » est fournie par l'APUR sur tout le domaine.

Finalement, la fraction d'eau dans la maille (*paris_frac_water*) a été calculée comme suit :

RAPPORT METEO-FRANCE PROJET EPICEA VOLET 2	Référence : EPICEA-Rapport-Volet2.2_AnnexeA Date : 06/09/11	Page 6 sur 31
--	--	------------------

$$paris_frac_water = \frac{paris_surf_water}{62500}$$

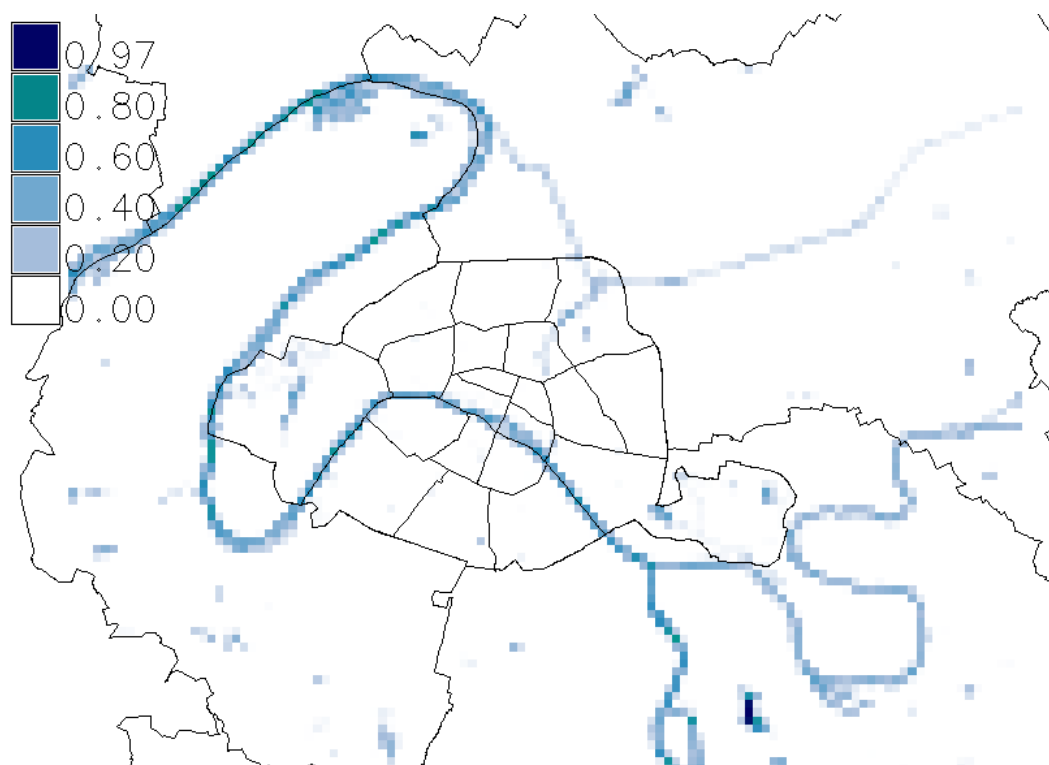


Figure 1. Fraction de surfaces aquatiques dans la maille pour l'agglomération parisienne

1.3 Surface et fraction de ville dans la maille (TEB)

Dans un premier temps, lorsque la surface de ville dans la maille n'est pas nulle, elle a été définie comme :

$$paris_surf_town = 62500 - paris_surf_water \quad (1)$$

En effet, il a été choisi de passer toute la végétation dans le schéma TEB-Veg en tant que végétation urbaine (type « garden »). Le modèle de végétation ISBA sera donc appelé directement par TEB.

Finalement, la fraction de ville dans la maille (*paris_frac_town*) a été calculée comme suit :

$$paris_frac_town = \frac{paris_surf_town}{62500} \quad (2)$$

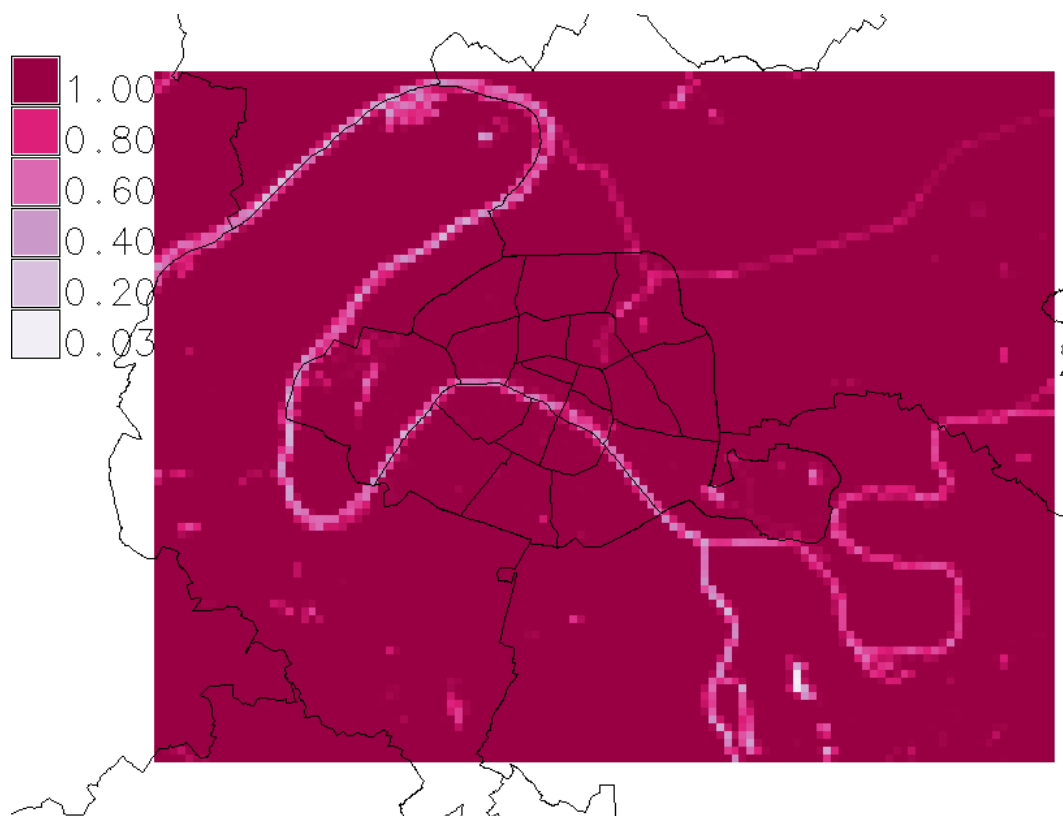


Figure 2. Fraction de ville dans la maille (incluant la végétation urbaine).

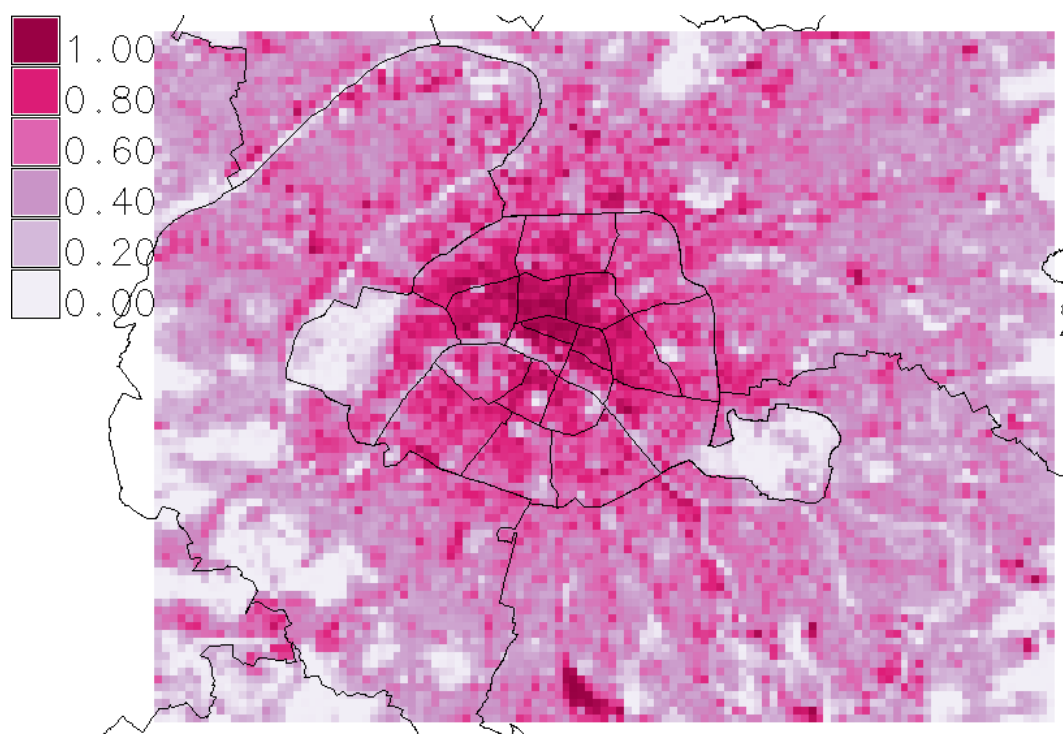


Figure 3. Fraction de ville dans la maille à laquelle on a soustrait la fraction de végétation urbaine.

2 Préparation des données d'entrée pour TEB

2.1 Préalable

Des inexactitudes et imprécisions ont été relevées dans les fichiers fournis par l'APUR. Il faut donc préalablement les corriger.

Il s'agit de vérifier la cohérence entre les valeurs de matériau de toit, surface de toit, hauteur de bâtiment, surface de mur et type de bâtiment afin que ces paramètres soient tous définis en même temps.

Correction des erreurs :

- x Cas où surface de toit < surface bâtie : on ajoute la différence entre les 2 à la route.
- x Cas où la hauteur des bâtiments est nulle alors que la surface bâtie est non nulle (moyenne des points voisins)
- x Cas où la hauteur des bâtiments est non nulle alors que la surface bâtie est nulle (hauteur imposée à « donnée manquante », pas de bâtiment)

2.2 Types de matériaux dominant pour les toits

Les types de matériaux dominant pour les toits, fournis par l'APUR sous forme de chaînes de caractères, ont été convertis en codes numériques (paramètre *Mat_T_code* et carte *Paris_tot_type_toit_code_def*) pour faciliter leur traitement dans GRASS (Tableau 1).

Tableau 1. Codes des types de matériaux dominant pour les toits

Matériau dominant pour les toits	Code
Donnée inexistante	*
Zinc	1
Tuile	2
Terrasse	3
Terrasse végétale	4
Ardoise	5

Par souci de cohérence avec les autres données et le fonctionnement de TEB, le type de matériaux de toit a été imposé à « inexistant » (« donnée inexistante », pas de calcul dans TEB) quand les valeurs de surfaces de toits étaient inexistantes. La Figure 2 présente la répartition géographique des types de toits sur Paris.

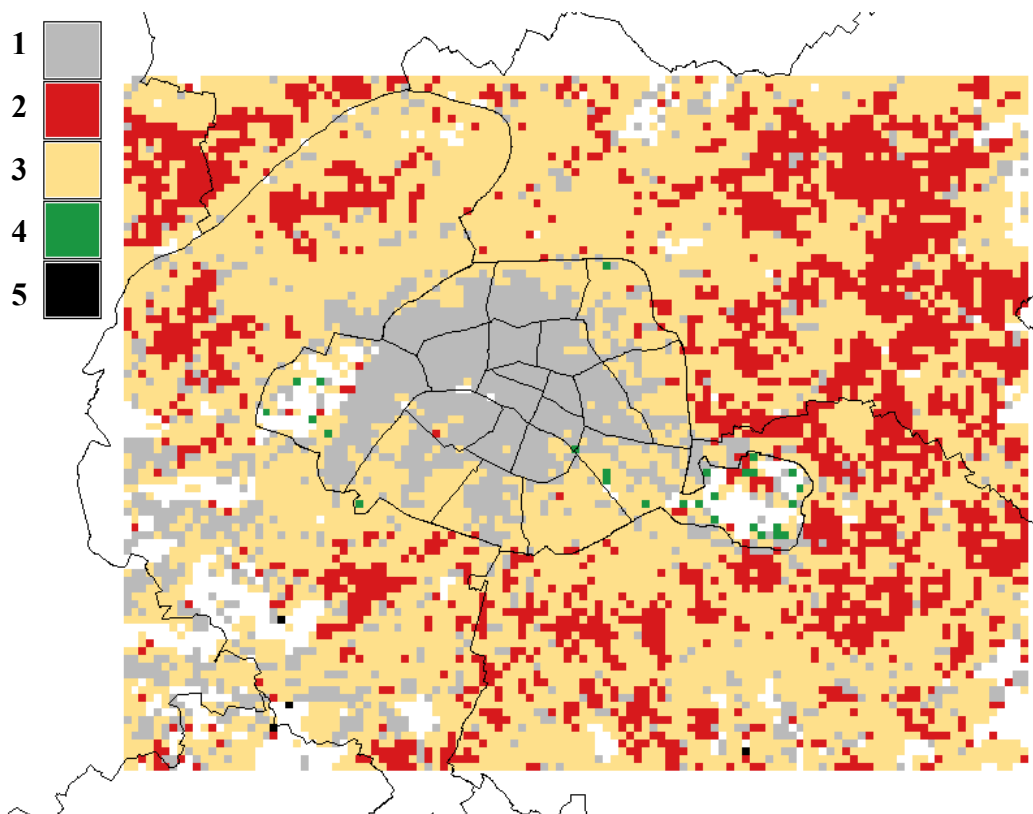


Figure 4. Types de toit présents sur l'agglomération parisienne.

2.3 Surface et fraction de bâti dans la ville

La surface moyenne de bâti dans la maille (*paris_surf_bld*) est représentée par l'emprise au sol des bâtiments ou surface de toit fournie par l'APUR. Ces données de surfaces de toits sont disponibles pour la totalité des zones géographiques.

Les contraintes suivantes ont été imposées aux données par soucis de cohérence avec les autres données et le fonctionnement de TEB :

- x la valeur de surface de bâti est considérée comme inexistante (« donnée manquante ») quand la surface de ville est nulle ou inférieure au seuil de surface de ville (196 m^2). Un seuil minimal de 196 m^2 pour la surface de ville hors végétation dans les mailles urbaines a été imposé pour limiter les calculs dans TEB aux surfaces de ville supérieures à une « unité de surface de ville » raisonnable. Cette « unité de surface de ville » a été définie comme contenant un bâtiment fictif de profondeur 14 m (estimation visuelle par l'APUR pour les zones en dehors de Paris intra-muros), de longueur 7 m (choix arbitraire), et une route de surface équivalente à celle du bâtiment (choix arbitraire). Toute surface de ville hors

RAPPORT METEO-FRANCE PROJET EPICEA VOLET 2	Référence : EPICEA-Rapport-Volet2.2_AnnexeA Date : 06/09/11	Page 10 sur 31
--	--	-------------------

végétation inférieure à cette surface de ville seuil a été ré-attribuée à la surface d'espaces agricoles et naturels dans la maille (voir partie 2.6).

- x la valeur de surface de bâti est considérée inexistante (« donnée manquante ») en dessous de seuils de surface de toits : quand la surface de ville est supérieure au seuil minimal de ville hors végétation mais que l'emprise au sol des bâtiments est inférieure à des seuils (définis ci-après), nous avons considéré que cette surface représentait des routes et elle a été affectée aux espaces agricoles et naturels en tant que sol nu. Ces seuils sont définis par type de toit : zinc, tuile, ardoise, terrasse, et terrasse végétale. La surface de ville hors végétation de ces mailles est alors affectée aux routes traitées par ISBA en tant que sol nu (voir partie 2.6) ;
- x la surface de bâti est bornée à 0.95 fois la surface de ville hors végétation pour allouer une fraction minimale de surface de routes dans la maille (par soucis de cohérence avec le fonctionnement de TEB). La portion de surface de ville hors végétation restante sera donc considérée comme de la route, mais les calculs y seront effectués par TEB.

Les seuils de surface de bâti ont été définis par la profondeur moyenne des bâtiments au carré divisée par 2 (en cohérence avec l'unité de surface de ville établie préalablement pour le calcul du seuil de surface de ville) selon 3 groupes :

- x toits en zinc de profondeur moyenne 11,4 m (valeur de surface de mur calculée pour Paris intra-muros, voir plus loin section 2.5) ;
- x toits en tuile ou en ardoise de profondeur moyenne 9 m (estimation visuelle d'après photographies aériennes, ces toits correspondent plutôt à des pavillons) ;
- x toits en terrasse de profondeur moyenne 14 m (estimation visuelle d'après photographies aériennes, catégorie présentant le plus d'hétérogénéité, ces toits peuvent correspondre à des immeubles de tailles variables ainsi qu'à des bâtiments industriels, commerciaux ou de bureaux).

Par conséquent les seuils de surfaces de toit (bâti) sont respectivement de 64.98 (toits en zinc), 40.5 (toits en tuile ou ardoise) et 98 m² (toits terrasse, végétalisée ou non).

Finalement, la fraction de bâti dans la ville (*paris_frac_bld*) a été calculée comme :

$$paris_frac_bld = \frac{paris_surf_bld}{paris_surf_town} \quad (4)$$

RAPPORT METEO-FRANCE PROJET EPICEA VOLET 2	Référence : EPICEA-Rapport-Volet2.2_AnnexeA Date : 06/09/11	Page 11 sur 31
--	--	-------------------

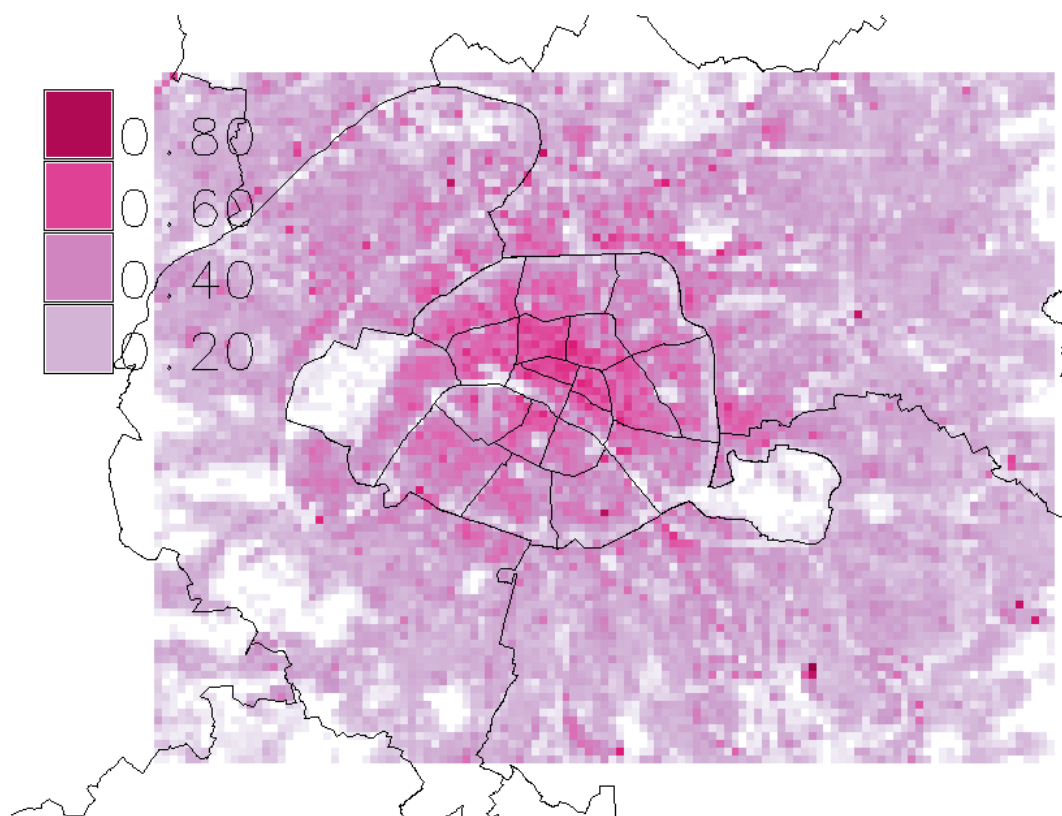


Figure 5. Fraction de bâti dans la maille.

2.4 Hauteur moyenne des bâtiments dans la maille

Pour assurer une cohérence avec les autres données ville, la hauteur moyenne des bâtiments dans la maille (*paris_bld_height*) n'existe que quand la fraction de ville « hors végétation » est définie (c'est-à-dire si la surface de toit est non nulle).

Par ailleurs, pour 5 points qui montraient des hauteurs de bâtiments nulles alors que la surface de ville « hors végétation » était non nulle, celles-ci ont été calculées comme la moyenne des hauteurs des bâtiments des points voisins (pour lesquels la fraction de ville était non nulle).

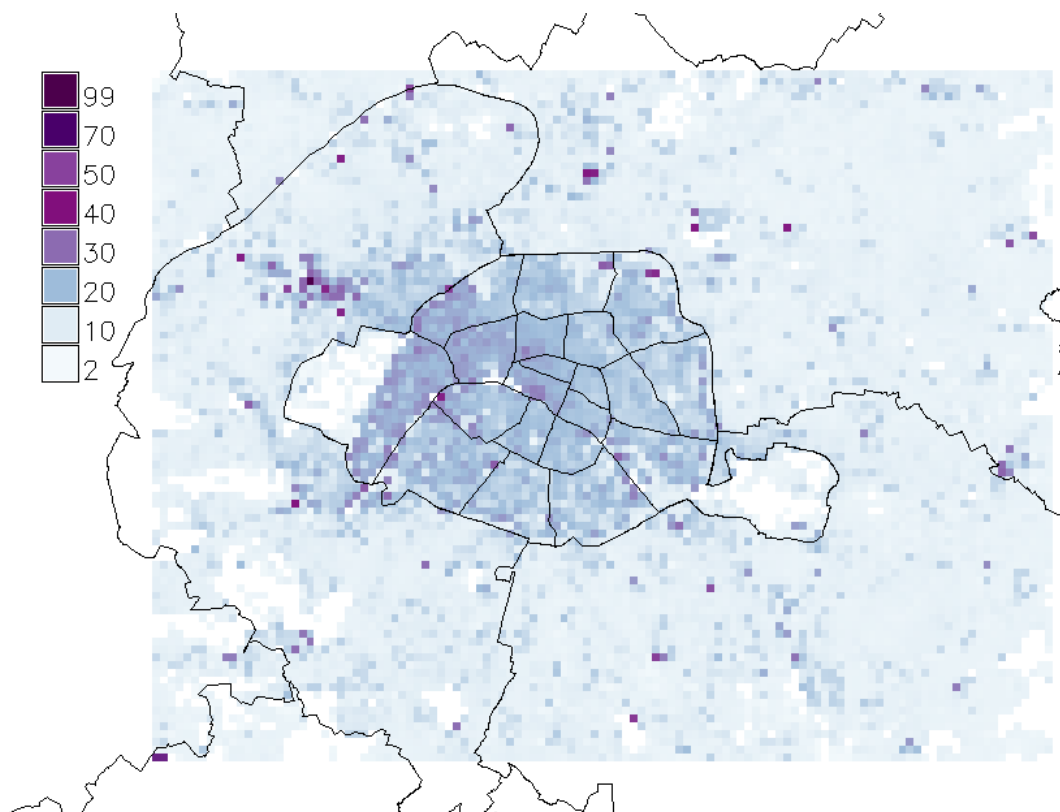


Figure 6. Hauteur moyenne des bâtiments dans la maille (en mètres).

2.5 Calcul de la surface de murs des bâtiments

La surface des murs dans la maille n'étant disponible (données APUR) que sur Paris intra-muros, l'APUR propose de calculer la surface de murs dans Paris bords, GC et PC à partir de l'équation suivante :

$$surf_m = 2 \times \left(\frac{surf_bld}{prof_bld} + prof_bld \right) \times H \quad (5)$$

où $surf_m$ représente la surface de murs dans la maille (m^2), $surf_bld$ la surface de bâti dans la maille (m^2), et H et $prof_bld$ respectivement la hauteur et la profondeur moyennes des bâtiments dans la maille (m). L'APUR recommandait une valeur de 14 m comme profondeur moyenne des bâtiments.

La comparaison des surfaces de murs calculées avec l'équation 5 avec les surfaces de murs observées sur Paris intra-muros a montré qu'avec une profondeur moyenne des bâtiments à 14 m, on sous-estime la surface de murs sur cette zone (Figures 7 et 8).

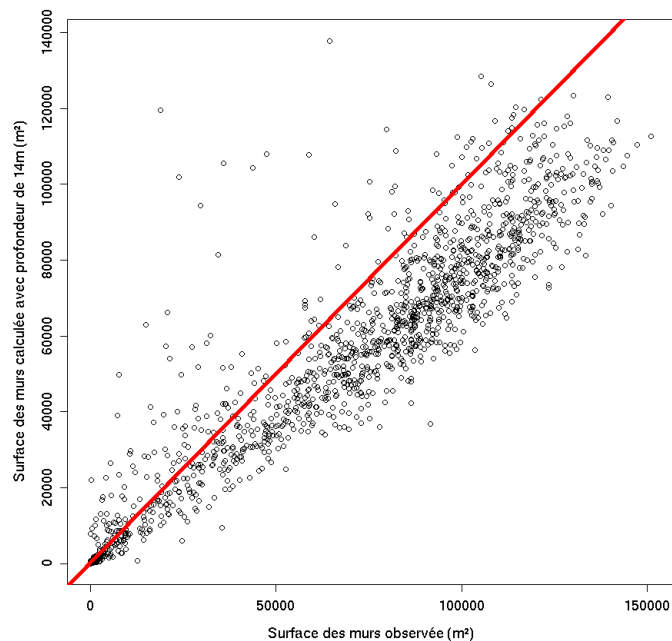


Figure 7. Comparaison entre les surfaces de murs calculées avec l'équation 5 ($prof_bld = 14$ m) et celles observées sur Paris intra-muros.

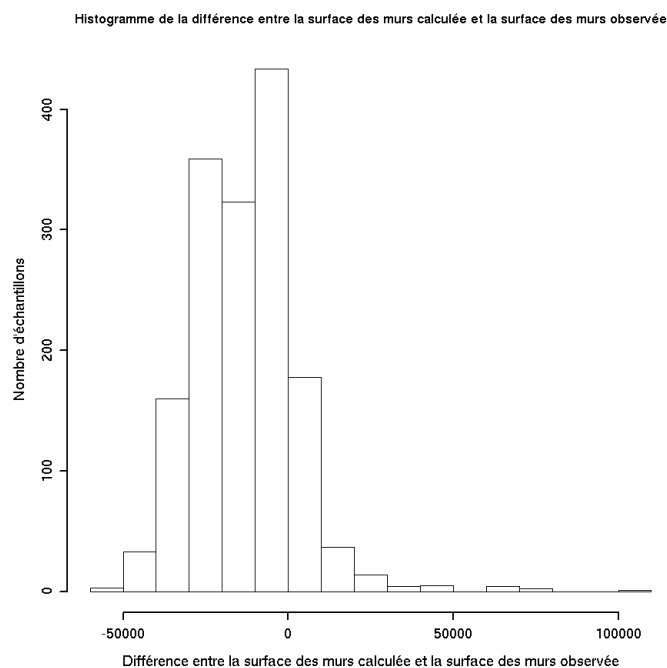


Figure 8. Histogramme de la différence entre les surfaces de murs calculées avec l'équation 5 ($prof_bld = 14$ m) et celles observées sur Paris intra-muros.

Une régression non linéaire a été effectuée pour calculer la profondeur moyenne des bâtiments si la

RAPPORT METEO-FRANCE PROJET EPICEA VOLET 2	Référence : EPICEA-Rapport-Volet2.2_AnnexeA Date : 06/09/11	Page 14 sur 31
--	--	-------------------

surface de murs observée dans la maille était décrite par l'équation 5 proposée par l'APUR. Le résultat est une profondeur de bâtiment de 11,40 m qui montre une meilleure corrélation entre surfaces de murs calculées et observées (Figures 9 et 10). Cette profondeur de bâtiment de 11,40 m peut être corrélée avec le type majoritaire de toits sur Paris intra-muros qui est en zinc.

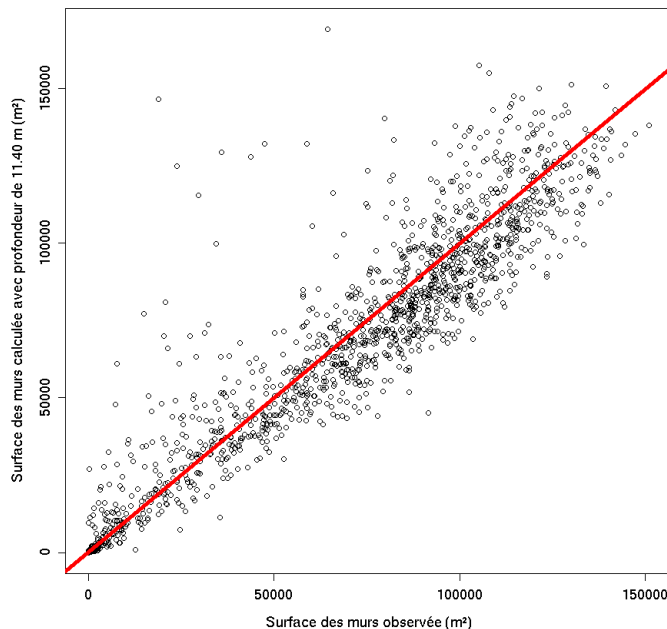


Figure 9. Comparaison entre les surfaces des murs calculées avec l'équation 5 ($prof_bld = 11.40$ m) et celles observées sur Paris intra-muros.

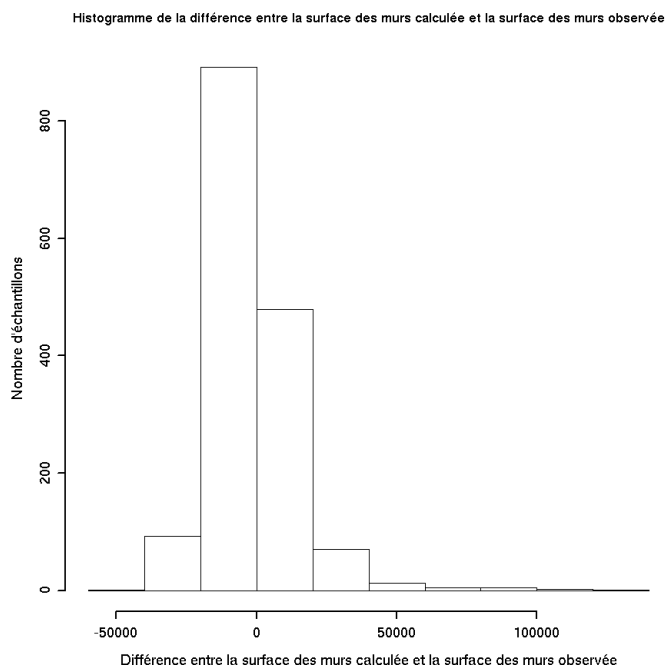


Figure 10. Histogramme de la différence entre les surfaces de murs calculées avec l'équation 5 ($prof_bld = 11,40$ m) et celles observées sur Paris intra-muros.

Finalement, en dehors de Paris intra-muros, l'équation 5 a été utilisée pour calculer la surface de murs en fonction du type de toit, de la même façon que les seuils de surface de bâti ont été définis (avec une profondeur de bâtiment qui dépend du type de toit, voir section sur les surfaces de bâti).

Les surfaces de mur dans tout le domaine sont soumises aux mêmes contraintes que les données ville précédentes, à savoir qu'elles ne sont définies que lorsque la surface de ville est non nulle.

Après forçage de ces conditions dans les données brutes de l'APUR, il restait 5 points dans Paris intra-muros avec des surfaces de mur nulles alors que les surfaces de ville étaient non nulles. Pour ces 5 points, les surfaces de murs ont été forcées avec les valeurs moyennes de leurs plus proches voisins.

2.6 Surface et fraction de routes pour traitement dans ISBA

Cette donnée est générée dans 2 cas :

- quand la surface de ville est inférieure à un seuil : un seuil minimal de 196 m^2 pour la surface de ville hors végétation dans les mailles urbaines a été imposé pour limiter les calculs dans TEB aux surfaces de ville supérieures à une « unité de surface de ville » raisonnable. Cette « unité de surface de ville » a été définie comme contenant un bâtiment fictif de profondeur 14 m (estimation visuelle par l'APUR pour les zones en dehors de Paris intra-muros), de longueur 7 m (choix arbitraire), et une route de surface équivalente à celle du bâtiment (choix arbitraire). Toute surface de ville inférieure à cette surface de ville seuil a été attribuée à la surface d'espaces agricoles et naturels dans la maille (végétation).
- quand la surface de ville hors végétation est initialement non nulle mais que les surfaces moyennes de bâtis dans la maille sont inférieures à leurs seuils respectifs par type de toit. Dans ces cas là, la valeur de surface de ville hors végétation est affectée à la surface d'espaces agricoles et naturels dans la maille (végétation) pour être traitée dans ISBA comme du sol nu ($paris_surf_road_isba$).

On obtient finalement la surface de routes dans la maille qui sera traitée dans ISBA ($paris_surf_road_isba$), qui est ajoutée dans ISBA au type de végétation correspondant à du sol nu (bare soil, voir section 3 sur la préparation des données d'espaces agricoles et naturels).

2.7 Types de matériau dominant pour les murs

A l'intérieur de Paris (Paris intra-muros), l'APUR a défini des classes pour les matériaux des murs, en fonction de leur date de construction. Il existe 13 classes APUR (1 à 11, 20 et 99), auxquelles on rajoute 2 classes (30 et 40) pour les murs des bâtiments qui se trouvent en dehors de Paris intra-muros (Tableau 2). Au total, il existe donc 15 classes de matériaux (paramètre $paris_wall_mat$).

RAPPORT METEO-FRANCE PROJET EPICEA VOLET 2	Référence : EPICEA-Rapport-Volet2.2_AnnexeA Date : 06/09/11	Page 16 sur 31
--	--	-------------------

Tableau 2. Codes des types de matériaux dominant pour les murs

Code de matériau dominant pour les murs	Code correspondant dans le fichier d'origine du CSTB	Description
1	SM1	Bâtiment construit avant 1800
2	SM2	Bâtiment construit entre 1800 et 1850
3	SM3	Bâtiment construit entre 1851 et 1890
4	SM4	Bâtiment construit entre 1891 et 1914
5	SM5	Bâtiment construit entre 1918 et 1939
6	SM6	Bâtiment construit entre 1945 et 1967
7	SM7	Bâtiment construit entre 1968 et 1974
8	SM8	Bâtiment construit entre 1975 et 1981
9	SM9	Bâtiment construit entre 1982 et 1989
10	SM10	Bâtiment construit entre 1990 et 1999
11	SM11	Bâtiment construit après l'an 2000
99	SM99	Bâtiments non datés
20	SM20	Classe non référencée par le CSTB. D'après l'étude de l'APUR, cela correspond à la classe de bâtiments construits entre 1851 et 1914 (classe 3 et 4 de même caractéristiques thermiques donc on retiendra ces mêmes caractéristiques thermiques pour la classe 20)
30	Code créé pour les matériaux de murs correspondant à l'habitat individuel (toit en tuile ou ardoise) en dehors de Paris intra-muros	Classe « individuel »
40	Code créé pour les matériaux de murs correspondant à l'habitat collectif (toit-terrasse ou en zinc) en dehors de Paris intra-muros	Classe « collectif »

Par soucis de cohérence avec les autres données ville et le fonctionnement de TEB, le type de matériaux de mur n'est défini que lorsque la surface de ville est non nulle.

Pour 2 points de maille pour lesquels aucune classe de mur n'était définie dans les fichiers de l'APUR alors qu'il existait une surface de murs, le code de matériau a été forcé à 99¹.

¹ il serait intéressant de vérifier s'il existe une corrélation entre type de toit dominant et type de mur dominant dans Paris stricto pour extraire une règle à appliquer en dehors de Paris pour les caractéristiques radiatives et thermiques des murs. Initialement, il a été choisi de retenir pour la classe de type de mur « 12 » la valeur moyenne des classes CSTB « SM6 » et « SM7 » en référence à l'urbanisation accélérée de Paris extra-muros lors des Trente Glorieuses (1945-1975).

2.8 *Épaisseurs et caractéristiques radiatives et thermiques des murs*

Les données fournies par le CSTB consistaient en des murs à 3 couches, avec une couche intérieure relativement épaisse pour les bâtiments conçus avant 1945 et pour les bâtiments non datés (qui ont par défaut les caractéristiques thermiques de la classe 5 de bâtiments – construits entre 1918 et 1935). Or pour bien modéliser dans TEB les flux de chaleur là où les gradients de température sont forts – i.e. entre l'air extérieur et la couche extérieure ou entre la couche intérieure et l'air intérieur, il faut des couches minces. Par conséquent, la couche intérieure fournie par le CSTB a été divisée en 2 couches de caractéristiques thermiques identiques mais :

- x d'épaisseurs différentes pour les murs anciens (de classe 1 à 5) et non datés (classe 99) : couche intérieure (couche 4) d'épaisseur égale à 0.05m et couche 3 calculée en fonction ;
- x d'épaisseurs égales pour les murs plus récents (des classes 6 à 11 et de la classe 12) dont la couche intérieure était déjà mince.

Le tableau 3 présente l'épaisseur des murs et leurs caractéristiques radiatives et thermiques en fonction de leur date de construction (c'est-à-dire en fonction du type de mur dominant, i.e. Extérieur). Les caractéristiques radiatives et thermiques des murs ont été ensuite corrélées avec la grille spatiale de types de mur dominant (i.e. extérieur) fournis par l'APUR pour générer des grilles spatiales de caractéristiques radiatives et thermiques pour les murs de Paris.

RAPPORT METEO-FRANCE PROJET EPICEA VOLET 2	Référence : EPICEA-Rapport-Volet2.2_AnnexeA Date : 06/09/11	Page 18 sur 31
--	--	-------------------

Tableau 3. Caractéristiques des murs.

Paris intra-muros :

Code APUR	classe APUR	% total (sauf non datés)	U mur W/m² K		couche extérieure					couche centrale				couche intérieure : 3				couche intérieure : 4				épaisseur totale mur m	
	âge bâtiment	(sauf non datés)	donnée APUR	données calculées	matériau	albédo	émis-sivité	épais-seur m	capacité calorifique J/m³K	conduc-tivité W/mK	matériau	épais-seur m	capacité calorifique J/m³K	conduc-tivité W/mK	matériau	épais-seur m	capacité calorifique J/m³K	conduc-tivité W/mK	matériau	épais-seur m	capacité calorifique J/m³K	conduc-tivité W/mK	cumul des couches
1	avant 1800	10%	1.75	1.99	enduit chaux plâtre ou plâtre et sable	0.40	0.90	0.06	1 600 000	1.00	calcaire tendre	0.15	1 800 000	1.10	calcaire tendre	0.15	1 800 000	1.10	calcaire tendre	0.20	1 800 000	1.10	0.36
2	1800-1850	15%	1.91	2.08				0.06	1 600 000	1.00	0.15	2 000 000	1.40	0.20	2 000 000	1.40	0.25	2 000 000	1.40	0.41			
3	1851-1890	49%	2.01	2.30				0.03	1 600 000	1.00	0.15	2 200 000	1.70	0.25	2 200 000	1.70	0.30	2 200 000	1.70	0.43			
4	1891-1914			2.30				0.03	1 600 000	1.00	0.15	2 200 000	1.70	0.25	2 200 000	1.70	0.30	2 200 000	1.70	0.43			
5	1918-1939	9%	2.09	2.25				0.03	1 600 000	1.00	0.15	1 480 000	1.15	0.13	1 480 000	1.15	0.18	1 480 000	1.15	0.31			
6	1945-1967	5%	2.80	3.10				0.04	1 800 000	1.00	0.15	2 300 000	1.65	0.04	2 300 000	1.65	0.07	2 300 000	1.65	0.23			
7	1968-1974	3%	2.80	3.10				0.04	1 800 000	1.00	0.15	2 300 000	1.65	0.04	2 300 000	1.65	0.07	2 300 000	1.65	0.23			
8	1975-1981	2%	1.80	2.20				0.02	1 800 000	1.00	0.20	2 300 000	1.65	isolant	0.005	50 750	0.035	isolant	0.010	50 750	0.035	0.23	
9	1982-1989	2%	1.15	1.68				0.02	1 800 000	1.00	0.20	2 300 000	1.65	isolant	0.010	50 750	0.035	isolant	0.020	50 750	0.035	0.23	
10	1990-1999	4%	0.65	1.05				0.02	1 800 000	1.00	0.20	2 300 000	1.65	isolant	0.023	50 750	0.035	isolant	0.045	50 750	0.035	0.24	
11	après 2000	1%	0.47	0.81				0.02	1 800 000	1.00	0.20	2 300 000	1.65	isolant	0.033	50 750	0.035	isolant	0.065	50 750	0.035	0.25	
99	non daté		2.09	2.22	idem 1918-1939			0.03	1 600 000	0.80	idem 1918-1939	0.15	1 480 000	1.15	idem 1918-1939	0.13	1 480 000	1.15	idem 1918-1939	0.18	1 480 000	1.15	0.31
20	non référencé				idem 1985-1914	0.40	0.90	0.03	1 600 000	1.00	0.15	2 200 000	1.70	0.25	2 200 000	1.70	0.30	2 200 000	1.70	0.43			

Paris-bord, Petite Couronne et Grande couronne :

individuel

		U_{mur} W/m² K	couche extérieure : 1							couche centrale : 2					couche intérieure intermédiaire : 3					couche intérieure : 4					épaisseur totale mur m				
code	classe unique	données calculées	matériau	albédo	émissivité	épaisseur m	masse volumique kg/m³	chaleur massique J/kgK	capacité calorifique J/m³ K	conductivité W/mK	matériau	épaisseur m	masse volumique kg/m³	chaleur massique J/kgK	capacité calorifique J/m³ K	conductivité W/mK	matériau	épaisseur m	masse volumique kg/m³	chaleur massique J/kgK	capacité calorifique J/m³ K	conductivité W/mK	matériau	épaisseur m	masse volumique kg/m³	chaleur massique J/kgK	capacité calorifique J/m³ K	conductivité W/mK	cumul des couches
30		2.39	enduit	0.40	0.90	0.02	1 800	1 000	1 800 000	1.00	maçonnerie	0.18	1 850	1 000	1 850 000	1.15	isolant	0.003	35.00	1450	50 750	0.035	isolant	0.003	35.00	1450	50 750	0.035	0.20

collectif

		U_{mur} W/m² K	couche extérieure : 1							couche centrale : 2					couche intérieure intermédiaire : 3					couche intérieure : 4					épaisseur totale mur m				
code	classe unique	données calculées	matériau	albédo	émissivité	épaisseur m	masse volumique kg/m³	chaleur massique J/kgK	capacité calorifique J/m³ K	conductivité W/mK	matériau	épaisseur m	masse volumique kg/m³	chaleur massique J/kgK	capacité calorifique J/m³ K	conductivité W/mK	matériau	épaisseur m	masse volumique kg/m³	chaleur massique J/kgK	capacité calorifique J/m³ K	conductivité W/mK	matériau	épaisseur m	masse volumique kg/m³	chaleur massique J/kgK	capacité calorifique J/m³ K	conductivité W/mK	cumul des couches
40		2.21	enduit	0.40	0.90	0.03	1 800	1 000	1 800 000	1.00	béton banché	0.18	2 300	1 000	2 300 000	1.65	isolant	0.005	35.00	1450	50 750	0.035	isolant	0.005	35.00	1450	50 750	0.035	0.22

2.9 Caractéristiques radiatives et thermiques des toits

Les données fournies par le CSTB consistaient en une description des toits en 3 couches (Tableau 4).

Tableau 4. Caractéristiques des toits par type de toit

Paramètres		Type de toit			
		Ardoise	Terrasse	Tuile	Zinc
Albedo (-)		0,15	0,2	0,2	0,6
Emissivité (-)		0,9	0,8	0,8	0,1
Épaisseur (m)	Couche 1	0,012	0,004	0,025	0,008
	Couche 2	0,1	0,2	0,1	0,1
	Couche 3	0,1	0,1	0,1	0,1
Capacité calorifique (MJ.m ⁻³ .K ⁻¹)	Couche 1	2,5	2,1	1,6	2,736
	Couche 2	0,9	2,3	0,9	0,9
	Couche 3	0,075	0,075	0,075	0,075
Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Couche 1	2,2	0,7	1	110
	Couche 2	0,13	2,3	0,13	0,13
	Couche 3	0,035	0,035	0,035	0,035

2.10 Caractéristiques radiatives et thermiques des routes

En ce qui concerne les caractéristiques radiatives et thermiques des routes, nous avons utilisé des données uniformes pour la ville de Paris (Tableau 5) (d'après Colombert, 2008). Les routes sont modélisées avec 3 couches.

Tableau 5. Caractéristiques des routes

Paramètres		Routes
Albedo (-)		0,10
Emissivité (-)		0,94
Matériau	Couche 1	Béton bitumé
	Couche 2	Béton bitumé & béton
	Couche 3	Sol sec
Épaisseur (m)	Couche 1	0,04
	Couche 2	0,37
	Couche 3	1,0
Capacité calorifique (MJ.m ⁻³ .K ⁻¹)	Couche 1	2,0
	Couche 2	2,0
	Couche 3	1,8
Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Couche 1	2,0
	Couche 2	1,5
	Couche 3	0,25

2.11 Ratio « surface de murs / surface urbaine au sol »

Quand la fraction de ville est non nulle dans la maille, TEB utilise le ratio « surface de murs / surface urbaine au sol ». La surface urbaine au sol est par définition égale à la surface de ville dans la maille (elle comprend la surface de routes et l'emprise au sol des bâtiments). Ce ratio (*paris_wall_o_hor*), a donc été calculé comme suit, en cohérence avec les données « ville » précédentes:

$$paris_wall_o_hor = \frac{paris_surf_wall}{paris_surf_town} \quad (6)$$

3 Préparation des données des espaces agricoles et naturels pour ISBA (appelé par TEB)

3.1 Surface et fraction d'espaces agricoles et naturels dans la maille (ISBA)

Un seuil minimal de 196 m² pour la surface de ville « pure » a été imposé pour limiter les calculs dans TEB aux surfaces de ville supérieures à une « unité de surface de ville » raisonnable. Cette « unité de surface de ville » a été définie comme contenant un bâtiment fictif de profondeur 14 m (estimation visuelle par l'APUR pour les zones en dehors de Paris intra-muros), de longueur 7 m (choix arbitraire), et une route de surface équivalente à celle du bâtiment (choix arbitraire). Toute surface de ville inférieure à la surface de ville seuil a été ré-attribuée à la surface d'espaces agricoles et naturels dans la maille.

RAPPORT METEO-FRANCE PROJET EPICEA VOLET 2	Référence : EPICEA-Rapport-Volet2.2_AnnexeA Date : 06/09/11	Page 22 sur 31
--	--	-------------------

Dans un deuxième temps, quand la surface de ville est supérieure à ce seuil mais que l'emprise au sol des bâtiments est inférieure à des seuils (voir section 2.2), nous avons considéré que cette surface représentait des routes et elle a été affectée aux espaces agricoles et naturels en tant que sol nu.

La surface d'espaces agricoles et naturels dans la maille, $paris_surf_nature$ est égale à la surface de végétation totale fournie par l'APUR à laquelle a été ajoutée la surface de ville quand celle-ci était inférieure au seuil de 196 m^2 , ainsi que la surface de ville correspondant à une emprise au sol des bâtiments inférieure à des seuils.

Finalement, la fraction de nature dans la maille ($paris_frac_nature$, Figure 11) a été calculée comme suit :

$$paris_frac_nature = \frac{paris_surf_nature}{paris_surf_town} \quad (7)$$

Cette grandeur est égale à la fraction de jardin en entrée de TEB-Veg puisque le choix a été fait de passer toute la végétation dans TEB-Veg en « garden » :

$$paris_frac_garden = paris_frac_nature \quad (8)$$

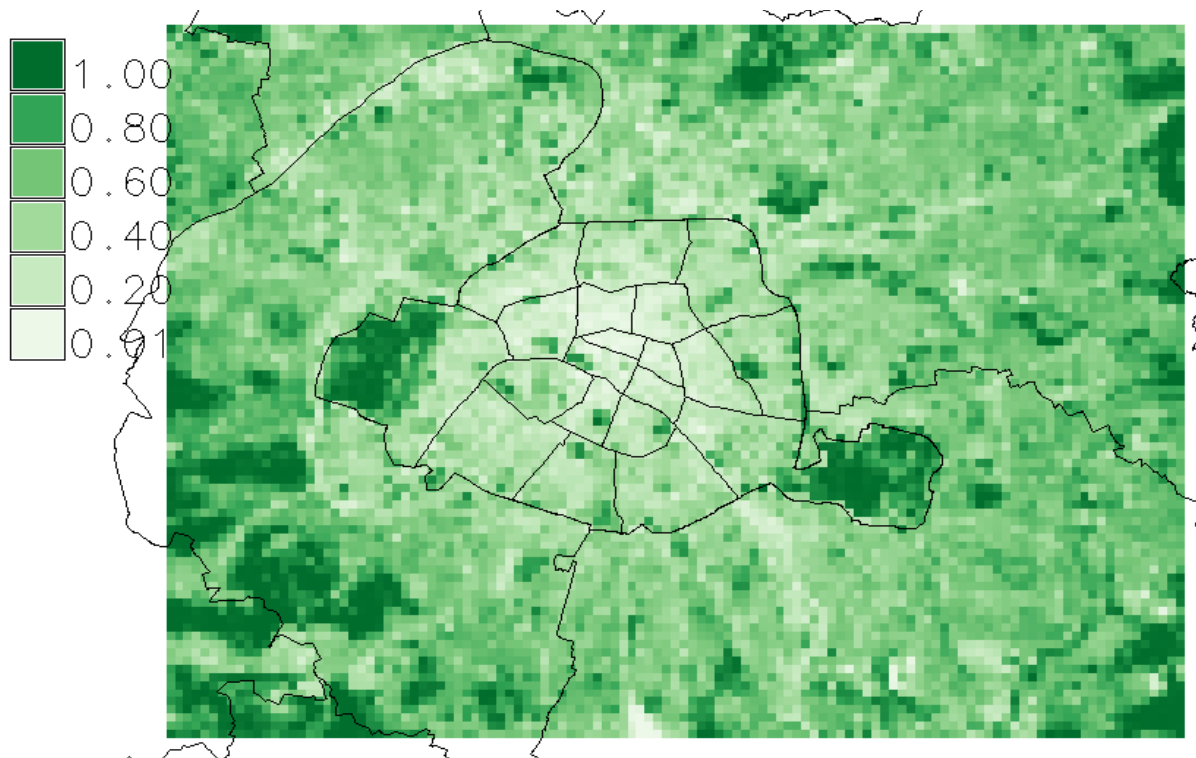


Figure 11. Fraction d'espaces agricoles et naturels dans la maille pour l'agglomération parisienne

3.2 Contexte

La fraction d'espaces agricoles et naturels est traitée par ISBA. Cependant, le choix a été fait de considérer l'ensemble de la végétation comme urbaine en utilisant TEB-Veg. ISBA sera donc appelé directement par TEB.

Les données nécessaires à TEB-Veg en ce qui concerne la végétation sont :

- les types de végétation pour la végétation haute et basse et en cas d'absence de végétation ;
- les fractions de végétation pour la végétation haute et basse et en cas d'absence de végétation ;
- la hauteur de la végétation haute ;
- les LAI pour la végétation haute et basse.

Les données fournies par l'APUR fournissent la fraction totale de végétation dans la maille, ainsi que d'autres données difficilement utilisables pour caractériser les espaces agricoles et naturels plus en détail dans ISBA.

Il a par conséquent été décidé d'extrapoler les caractéristiques des espaces agricoles et naturels à partir des classes d'ECOCLIMAP et de leurs caractéristiques utiles dans SURFEX.

Ce travail a été réalisé par l'équipe GMME/TURBAU du CNRM pour une utilisation avec ISBA et les données obtenues ont été adaptées pour TEB-Veg.

Les classes ECOCLIMAP présentes dans la zone géographique considérée sont celles décrites dans le tableau 6.

Tableau 6. Classes de végétation ECOCLIMAP présentes dans Paris

Classe	Description
151	Zones urbaines denses
153	Zones suburbaines
155	Zones industrielles
156	Routes et voies ferroviaires
157	Zones portuaires
158	Aéroports
159	Mines
160	Parcs et jardins
161	Zones de sport et loisir
168	Cultures (plantes en C3 et C4)
202	Forêts

3.3 Répartition spatiale et fractions des types d'espaces agricoles et naturels.

La répartition spatiale des types d'espaces agricoles et naturels et leurs fractions associées ont été générés en 2 étapes :

1. initialement par l'application de règles portant sur les différentes classes d'espaces agricoles et naturels extraites de la base de données ECOCLIMAP sur la zone géographique concernée. Ces règles sont présentées dans le tableau 7 ;
2. ensuite par l'affectation de la fraction de route destinée à être traitée par ISBA (paris_frac_road_isba) à la fraction existante de sol nu (frac_bare).

Les différents types de végétation contenus dans chacune de ces 11 classes ainsi que leur positions géographiques ont été extrait d'ECOCLIMAP dans GRASS et agrégés pour estimer i) la répartition géographique par types de végétation (variable VEGTYPE dans SURFEX et non plus par classes

RAPPORT METEO-FRANCE PROJET EPICEA VOLET 2	Référence : EPICEA-Rapport-Volet2.2_AnnexeA Date : 06/09/11	Page 24 sur 31
--	--	-------------------

d'espaces agricoles et naturels, variables COVER) ainsi que ii) la fraction de chaque type de végétation dans chaque maille. Les types de végétation (et les cartes de fraction associées) sont les suivants² :

- x forest (frac_tree)
- x park (frac_park)
- x grass (frac_grass)
- x crops – C3 (frac_c3)
- x crops – C4 (frac_c4)
- x bare soil (frac_bare)

Tableau 7. Règles de création des types de végétation pour Paris

VEGTYPE	Règle /COVER ECOCLIMAP	Valeur de la fraction de VEGTYPE
forest	cover 202	1
	(covers 151 ou 153) et <i>paris_frac_nature</i> ≥ 0,8	0,8
	(covers 151 ou 153) et <i>paris_frac_nature</i> < 0,8	0,5
	cover 161	0,2
	cover 160	0,8
park	(covers 151 ou 153) et <i>paris_frac_nature</i> ≥ 0,8	0,2
	(covers 151 ou 153) et <i>paris_frac_nature</i> < 0,8	0,5
	cover 161	0,8
	cover 160	0,2
grass	cover 156 ou 158	1
<i>crops – C3</i>	cover 168	0,9
<i>crops – C4</i>	cover 168	0,1
bare soil	covers 155 ou 157 ou 159	1

3.4 Caractéristiques des types de végétation

En pratique, TEB-Veg considère 3 types de végétations (analogie avec un regroupement en 3 patches lors de l'utilisation d'ISBA) : végétation haute (forest), végétation basse (park, grass, crops – C3 et crops – C4) et sol nu (bare soil). Par conséquent, des caractéristiques de végétation moyennes ont été préparées pour chaque patch selon les mêmes règles que ce qui est fait par SURFEX lors de l'utilisation d'ECOCLIMAP.

² pour pallier à des problèmes d'arrondis lors des calculs de fractions des types de végétation, le type de végétation « bare soil » a finalement été forcé (i.e. arrondis à 1.e⁻⁰⁶ près ou au-delà) pour que la somme des fractions des types de végétation soit exactement égale à 1.

3.5 Cas particulier du LAI pour la classe de végétation « forest »

Pour le type de végétation « forest », les mesures issues du projet CARBO-Europe effectuées en forêt de Fontainebleau (données « Barbeau ») ont été utilisées car elles étaient plus réalistes que le LAI fourni par ECOCLIMAP pour cette classe de végétation.

4 Préparation des flux de chaleur liés au trafic automobile

4.1 Contexte

Ce travail a été réalisé par l'équipe GMME/TURBAU du CNRM et les données obtenues ont été adaptées pour TEB-Veg.

Nous ne disposons pas à l'heure actuelle sur Paris de données des flux de trafic comparables à celles issues de la campagne de mesure CAPITOU sur Toulouse. Nous disposons en revanche à partir des travaux de thèse de M. Colombert (2008) du trafic global sur la commune de Paris et d'une estimation du dégagement de chaleur associé. Pour palier à l'imprécision qui serait introduite en utilisant en chaque point de grille une valeur uniforme du flux de chaleur généré par le trafic automobile, le flux de chaleur dégagé par le trafic a été spatialisé en faisant l'hypothèse qu'il était proportionnel à la surface de route dans une maille. Le calcul du flux de chaleur dégagé par le trafic, Q_{trafic} , est prescrit dans TEB (donc par unité de surface de ville) et s'est effectué en 5 étapes:

- 1) évaluation de la fraction de routes dans chaque maille (à partir des données ville issues de l'APUR présentées précédemment) et calcul de la surface de route totale dans la commune de Paris (zone intramuros),
- 2) calcul du flux de chaleur total généré par le trafic dans Paris intramuros en utilisant les données de la thèse de M. Colombert (2008) puis calcul du flux de chaleur lié au trafic par unité de surface de route à partir des données calculées à l'étape précédente ($Q_{\text{trafic, road}}$ en $W m^{-2}$ de route),
- 3) calcul de Q_{trafic} ($W m^{-2}$ de ville), le flux de chaleur généré par le trafic, pour chacune des mailles de notre domaine géographique (Paris intramuros et proche banlieue) en utilisant le terme normatif $Q_{\text{trafic, road}}$ ($W m^{-2}$ de route) calculé pour Paris intramuros,
- 4) vérification et correction en dehors de Paris intramuros des flux. Les flux sont notamment surestimés par la méthode lorsqu'il y a des zones avec des grands espaces de parkings ou des pistes d'aéroport,
- 5) répartition du flux de chaleur total corrigé en flux de chaleur sensible et latente.

4.2 Calculs et corrections

L'APUR a fourni les données de surface de route par maille pour Paris intramuros, sous-domaine Paris_Stricto (bitum_m2).

Pour les autres sous-domaines (Paris-bord, Petite Couronne et Grande Couronne), il indique la formule suivante pour calculer la surface de route : surface de routes = surface de ville - surface de bati - surface de vegetation soit surface ville - surface toit - surface vegetation :

$$SR = 62500 - (ST + SE + SJ) \quad (9)$$

RAPPORT METEO-FRANCE PROJET EPICEA VOLET 2	Référence : EPICEA-Rapport-Volet2.2_AnnexeA Date : 06/09/11	Page 26 sur 31
--	--	-------------------

avec SR : surface de route

ST : surface de toit

SE : surface d'eau

SJ : surface de jardins

L'emploi de SJ est problématique, car d'une part, SJ n'est disponible que pour Paris Bord et de plus cette formule conduit à des erreurs de forte surestimation.

On considère donc la surface de végétation SV et on aura donc la formule suivante :

$$SR = 62500 - (SE + ST + SV) \quad (10)$$

avec SV : surface de végétation

Étape 1

La surface de route par maille pour Paris intramuros est fournie par l'APUR.

On en déduit la surface de route totale pour Paris intramuros :

$$S_{road}(Paris) = 25\,548\,652 \text{ m}^2 \quad (11)$$

Étape 2

Colombert (2008) a calculé pour Paris intramuros un flux de chaleur généré par le trafic routier de $13,23 \text{ W.m}^{-2}$ pour Paris intramuros intégrant les bois de Boulogne et de Vincennes (surface de 105 km^2) et $15,96 \text{ W.m}^{-2}$ pour Paris intramuros hors bois de Boulogne et de Vincennes (surface de 87 km^2), ce qui revient à un flux global moyen de $1389,15 \text{ mW}$ pour l'ensemble de la zone Paris intramuros comprenant les deux bois. D'après les valeurs à notre disposition, nous en déduisons une valeur de $54,37 \text{ W m}^{-2}$ pour $Q_{traffic, road}$.

Étape 3

Pour chacune des mailles de notre domaine (intramuros et extérieur de la commune de Paris), nous exprimons $Q_{traffic}$ selon l'équation suivante :

$$Q_{traffic} = \frac{Q_{traffic, road} \times f_{road}(i) \times f_{town}(i) \times S_{mesh}}{f_{town}(i) \times S_{mesh}} \quad (12)$$

$$\text{soit } Q_{traffic} = Q_{traffic, road} \times f_{road}(i) \quad (13)$$

Étape 4

Les classes d'occupation du territoire CORINE Land Cover 2006 (100m de résolution) ont été utilisées pour vérifier la cohérence entre le type d'occupation du sol et les valeurs $Q_{traffic}$ calculées avec notre méthode. Cette étape a fait apparaître :

- x en dehors de Paris, des points de maille qui montraient des valeurs trop fortes de $Q_{traffic}$ compte tenu de leur classe d'occupation du sol : pour les classes « Zones portuaires », « Zones industrielles et commerciales », « Équipements sportifs et de loisirs » et « Terres arables hors périmètres d'irrigation ». Cette vérification a montré qu'affecter à la fraction de routes la fraction non-bâtie de la surface de ville nécessitait de corriger par la suite tous les points de maille pour lesquels cette hypothèse n'était pas vérifiée. En effet, pour les zones concernées, la surface de ville non bâtie ne comprend pas seulement de la voirie : les autres espaces bitumés (tels que parkings ou terrains sportifs) peuvent représenter une part

RAPPORT METEO-FRANCE PROJET EPICEA VOLET 2	Référence : EPICEA-Rapport-Volet2.2_AnnexeA Date : 06/09/11	Page 27 sur 31
--	--	-------------------

importante de la surface urbaine non bâtie,

- x en dehors de Paris pour les classes « Tissu urbain continu » et « Tissu urbain discontinu », un ensemble de valeurs qui semblent sur-estimées, du fait de l'application à l'extérieur de Paris de $Q_{\text{traffic, road}}$ (terme estimé à partir des données de Paris intramuros).

Les corrections que nous avons appliquées sont présentées dans le tableau 8.

RAPPORT METEO-FRANCE PROJET EPICEA VOLET 2	Référence : EPICEA-Rapport-Volet2.2_AnnexeA Date : 06/09/11	Page 28 sur 31
--	--	-------------------

Tableau 8. Corrections appliquées au Q_{trafic} calculé étape 3

Classe CORINE concernée	Correction appliquée	Description
Zones portuaires (5) Zones industrielles et commerciales (3)	Q_{trafic} majoré à $10,9 \text{ W.m}^{-2}$	Cette valeur correspond à la moyenne journalière de Q_{trafic} (à la résolution de 100m) pour les routes principales de l'agglomération de Toulouse (Pigeon et al., 2007).
Équipements sportifs et de loisirs (11) Terres arables hors périmètres d'irrigation (12)	Q_{trafic} majoré à $5,5 \text{ W.m}^{-2}$	Ces zones sont censées accueillir pas ou peu de trafic automobile. La valeur maximale retenue correspond à la valeur moyenne journalière de Q_{trafic} (à la résolution de 100m) pour les routes du centre ville de l'agglomération de Toulouse (Pigeon et al., 2007).
Tissu urbain continu (1) Tissu urbain discontinu (2)	Q_{trafic} majoré arbitrairement à $21,8 \text{ W.m}^{-2}$	Valeur arbitraire correspondant à 2 fois la moyenne journalière de Q_{trafic} pour les routes principales de l'agglomération de Toulouse (Pigeon et al., 2007).

Étape 5

Finalement, en chaque point de maille, les flux de chaleur sensible et latente sont obtenus respectivement en appliquant au flux de chaleur total corrigé les ratios de 92% et 8% préconisés par Pigeon et al. (2007).

RAPPORT METEO-FRANCE PROJET EPICEA VOLET 2	Référence : EPICEA-Rapport-Volet2.2_AnnexeA Date : 06/09/11	Page 29 sur 31
--	--	-------------------

Remerciements

Nous remercions l'APUR et le CSTB pour leur travail sur les données initiales d'occupation du sol et de description des bâtiments.

RAPPORT METEO-FRANCE PROJET EPICEA VOLET 2	Référence : EPICEA-Rapport-Volet2.2_AnnexeA Date : 06/09/11	Page 30 sur 31
--	--	-------------------

Références

Colombert, M., 2008. Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville. Thèse de l'Université Paris-Est. Septembre 2008.

Pigeon , G., Legain, D., Durand, P., Masson, V., 2007. Anthropogenic heat release in an old European agglomeration (Toulouse, France). International Journal of Climatology, vol.27, n°14, p.1969-1981.