

La mise en place des équations visant à la prévision de la **température au-dessus des rues** a donc permis une série d'approximations permettant d'avoir un ordre de grandeur de plusieurs paramètres.

Les équations du TEB permettront de simuler les échanges énergétiques entre le sol et l'atmosphère seulement après avoir été numérisées grâce à une modélisation appropriée.

II Modélisation : principes généraux et variables

1) Système étudié et maillage

Une fois les équations nécessaires établies, il convient de définir précisément les limites du système étudié car on ne peut utiliser les équations telles qu'elles : la **discrétisation** va permettre de résoudre les équations. Pour linéariser le problème, on impose deux types de contraintes : **spatiale et temporelle**. Elles interviennent dans les **modèles à points de grille**.

A. Contraintes Spatiales

Il existe des **modèles de différentes envergures** : mondiale, continentale, régionale, urbaine... Suivant une démarche de complexification croissante du modèle, on construit le maillage petit à petit : Pour traiter des données concernant la terre entière, on subdivise la surface du globe en boîtes de **300km x 300km** , à l'aide des méridiens et parallèles, en zones carrées à l'équateur et légèrement déformées aux pôles. Le système étudié n'est donc plus un ensemble de molécules mais des surfaces comprenant ces dernières.

Le maillage sphérique sur une couche est régulier et constitue la première étape. Puis on superpose plusieurs couches de ce maillage pour obtenir une **grille en altitude**, et ainsi un empilement de boîtes dans lesquelles évoluent les molécules (voir figure 4).

Les **intersections (ou nœuds)** du maillage sont repérées par trois coordonnées : latitude, longitude et altitude. A chaque nœud correspond un ensemble de variables et paramètres atmosphériques exploités par les modèles.

Il faut savoir que la construction du maillage n'est pas si simple même si c'est une étape élémentaire de la modélisation : en effet les chercheurs avec lesquels nous avons pris contact au Laboratoire de Météorologie Dynamique du CNRS (LMD) s'occupaient uniquement des **mailles régulières** (comme à l'équateur). Ils nous ont indiqué que d'autres équipes s'occupent uniquement de **l'exploitation du maillage aux pôles** qui est plus complexe que le maillage régulier : l'enjeu qui touche plus à la géométrie spatiale est d'intégrer des surfaces triangulaires à un système qui ne compte que des rectangles (voir pôle Nord sur la figure 4).

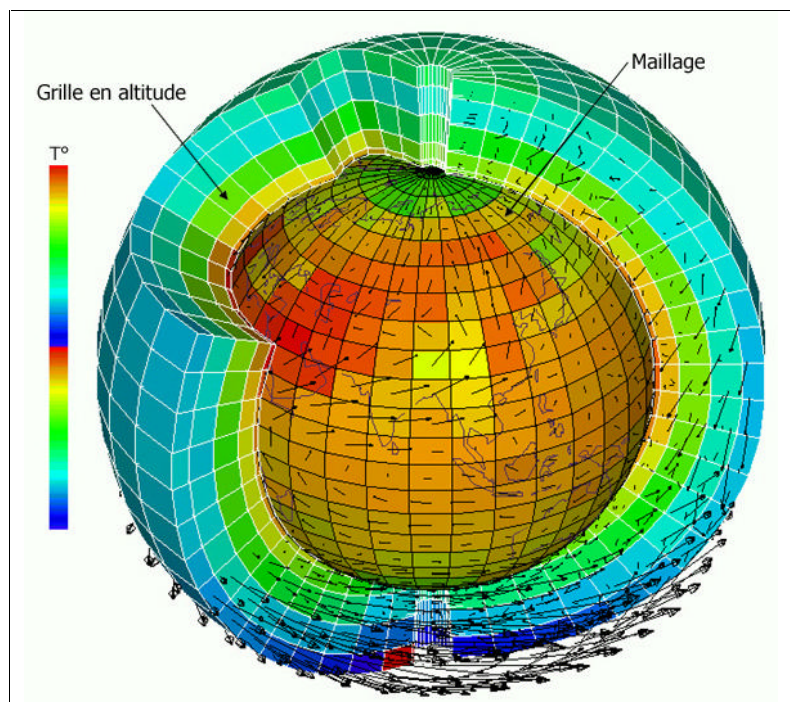


Figure 4 : Modèle numérique planétaire en points de grille, calculant ici la température (échelle colorée) et les vecteurs vent (réalisé au Laboratoire de Météorologie Dynamique du CNRS).

L'autre problème majeur se présente quand on veut exploiter des modèles couplés à **plusieurs échelles** : deux types de solutions se présentent, l'une simple, l'autre complexe. D'une part on peut imbriquer deux maillages réguliers l'un dans l'autre, d'autre part on peut imbriquer un **maillage adapté** dans un maillage régulier : on rencontre alors des difficultés géométriques dans la conception du maillage (voir figure 5).

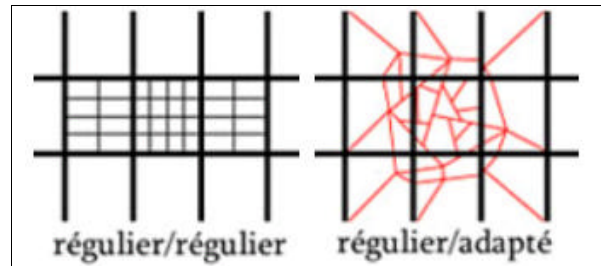


Figure 5 : Difficulté d'exploitation des maillages couplés.

En effet, faire coïncider des polygones irréguliers avec un quadrillage régulier n'est pas aisé, puisque qu'il faut établir des points communs aux deux maillages : les données qui coïncident en ces points peuvent être exploitées à deux niveaux et établissent donc l'**interaction** (ou « communication ») entre les mailles et les sous-mailles. On peut, dans le pire des cas, utiliser des maillages superposés qui n'ont pas de points communs, mais l'intérêt du précédent était d'obtenir une meilleure précision, et dans le second cas, on perd en exactitude à cause des moyennes des données effectuées entre les points du sous-maillage. On associe ces moyennes aux mailles supérieures, par le même procédé qui est utilisé pour les mailles régulières.

La construction du maillage est une étape déterminante quant à la précision des données calculées, c'est pourquoi un **maillage adapté** au terrain est bienvenu dans une étude censée préciser un modèle.

Mais qu'est ce qu'un maillage adapté ?

Si l'on veut s'intéresser plus précisément à une zone, il faudra ajouter au maillage un nombre supplémentaire de points pour augmenter la quantité d'information sur une zone (voir figure 6). La **complexification du maillage** ne se fait pas nécessairement de manière rigide, celui-ci peut être adapté au relief, aux conditions naturelles, aux phénomènes voulant être observés. On appelle cela l'**optimisation** pour minimiser le temps de calcul : l'utilisation de supercalculateurs ne permet pas de passer au-dessus des contraintes de lenteur de

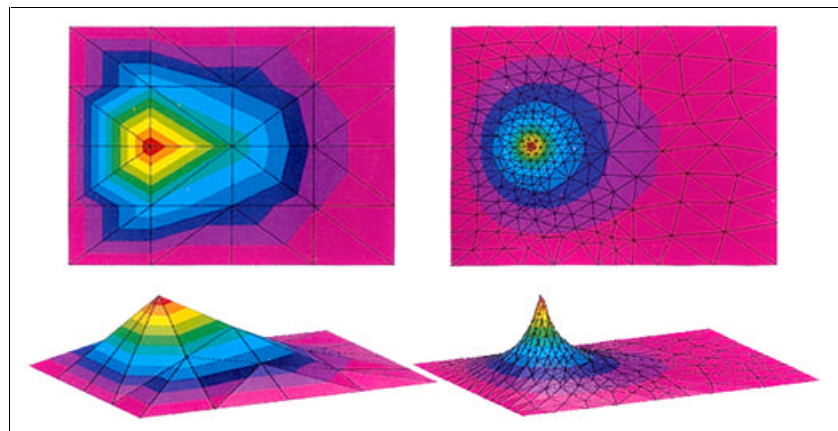


Figure 6 : Exemple de création de maillage pour une membrane étirée : on remarque que le maillage de droite a été adapté de façon à rendre compte de la déformation accrue au sommet. De même qu'en mécanique, on linéarise les variables (ici la pente) entre deux points du maillage, en modélisation météorologique de l'atmosphère, on considère que chaque maille présente un état homogène : elles sont remises à jour à chaque nouveaux résultats donnés par le modèle, et ainsi constamment réutilisées.

calcul, car l'on pourrait faire tourner un modèle avec énormément de nœuds de données, mais il faudrait en conséquence corriger de façon plus poussée le modèle en fonction des résultats plus nombreux. En effet lorsque l'on veut utiliser un modèle pour obtenir des résultats de prévision, il est nécessaire de rectifier régulièrement les résultats qu'il donne pour qu'il ne s'éloigne pas trop de la « réalité ».

Le but des recherches actuellement n'est pas de créer un modèle unique multifonction, mais d'en coupler plusieurs pour qu'ils se corrigent l'un l'autre par les précisions apportées : **c'est le principe des paramétrisations** (comme le TEB) qui permettent une modélisation plus juste des phénomènes météorologiques et donc qui fournissent au **modèle global** (le Mésos-NH dans le cas du TEB) des données plus précises. Nous reparlerons rapidement du Mésos-NH plus loin, lors de l'étude de la simulation.

Ce qui nous intéresse à première vue, ce sont les échanges entre ces boîtes (mailles), mais la présence de phénomènes internes (sous-mailles) requiert des sortes de sous-modèles spécifiques. Un schéma regroupant ces phénomènes était consigné plus tôt (figure 1). Ayant réussi à définir les échanges entre deux mailles, on peut par itération, analyser ceux qui concernent l'ensemble interne du maillage. Pour **restreindre le système étudié** il suffit de ne prendre qu'un nombre limité de mailles en compte, sur un volume donné, mais le modèle ne prend alors plus en compte les données adjacentes aux bords du maillage. C'est pourquoi on ne peut guère accorder de crédit aux résultats que fournissent les points limites du maillage.

La nécessité de définir des limites à l'itération des équations dans le modèle s'impose devant les conditions extrêmes associées au « bords » du modèle : on appelle **forçage** le fait d'imposer au modèle des valeurs indépendantes de ses variables. On pose ainsi dans la plupart des cas que la **température à l'altitude maximale est nulle**. Quant à celle au sol, on ne peut la fixer impunément sans entraîner un lot d'erreurs non négligeables des prévisions du modèle.

Le principe d'un **schéma de surface** consiste à préciser les flux énergétiques au sol, pour au final obtenir une température de surface qui tende à ramener le modèle vers des prévisions plus justes globalement. A une maille de l'échelle du modèle supérieur, on attribue un lot de paramètres (voir figure 7). Cela permet de mettre en relation de nouvelles variables et ainsi d'obtenir la correction voulue aux limites du maillage. On peut ainsi traiter la majorité des phénomènes sous-mailles qui ont été décrits dans la première partie concernant les équations.

On ne peut que très rarement traiter tous les phénomènes en même temps car la puissance de calcul nécessaire est trop grande. Une deuxième contrainte est donc indispensable si l'on veut que les prévisions soit utilisables en temps et en heure.

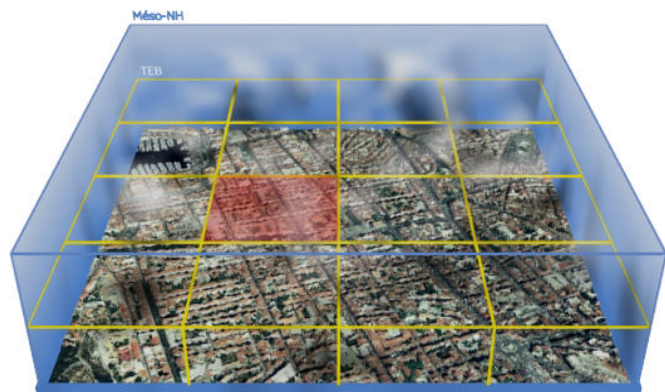


Figure 7 : Couplage du Mésos-NH et du TEB. Le maillage horizontal jaune représente la limite inférieure du Mésos-NH et supérieure du TEB. Le TEB permet de calculer pour une surface (par exemple celle représentée ici en rouge) les flux d'énergie de la ville. Les résultats sont alors communiqués à chaque pas de temps au modèle global Mésos-NH, qui connaît ainsi précisément les conditions aux limites de son maillage.

B. Contraintes temporelles

Le **temps** est également un **facteur important** dans l'efficacité d'un modèle : une fois le maillage spatiale mis en place, il faut déterminer deux éléments :

- à quelle fréquence le modèle recevra des données ? (pas de temps)
- pendant combien de temps réalise-t-on la simulation ? (durée de la simulation)

Généralement en ce qui concerne le **pas de temps**, on ne descend pas en dessous d'un seuil limite de l'ordre de **30 min**, qui ne permettrait pas au modèle d'effectuer une prévision. En effet le **temps de calcul** dépend directement de deux paramètres : le **nombre de mailles** considérées et le **pas de temps**, ce dernier pouvant être plus facilement modulé pour effectuer des tests de fonctionnement du modèle.

Un schéma de surface peut fonctionner sous deux modes :

- le **off-line** dans lequel il n'interagit pas avec le maillage supérieur, il peut être testé séparément pour considérer uniquement ses propres résultats. Ceux-ci sont nécessairement faussés car il manque l'échange des informations avec le modèle supérieur. Ce mode a été utilisé pour étudier l'exactitude des résultats du TEB sur une zone de la ville de Marseille. L'intérêt final est de l'intégrer à un modèle supérieur comme le Méso-NH.
- le **on-line** qui est la suite logique du mode précédent : il intervient après les tests off-line et montre la véritable efficacité du schéma de surface au sein d'un modèle supérieur.

L'intérêt est bien de simuler pour prévoir. De même que pour la limitation physique, le modèle ne prend pas en compte tous les phénomènes dont la durée est **inférieure au pas de temps**. Le fait que le modèle ne calcule que les données pour des instants précis est un problème que l'on peut contourner en **extrapolant** entre deux instants. De même, pour le maillage dans lequel les données sont associées à une zone et non à des lieux ponctuels : il faut considérer qu'entre deux instants de calcul, les données associées à une maille sont constante : c'est le principe de la **linéarisation**. Bien sûr, il faut que cette méthode ne soit utilisée que de façon très minutieuse car cela fausse d'autant plus les résultats. De plus les chercheurs sont souvent confrontés aux **limitations de prises de données** sur le terrain pour comparer les résultats du modèles avec les valeurs réelles et donc constater l'ampleur de l'écart avec le réel.

Création du maillage du schéma de surface TEB

Aucun maillage adapté n'a été créé pour le schéma de surface TEB, mais l'on associe à chaque surface du maillage principal un ensemble de paramètres statistiques (hauteur des bâtiments, proportion entre toits et rues) qui seront détaillés dans le paragraphe suivant (**Variables et paramètres**).

Avec un maillage non subdivisé de nouveau il n'y a pas de prise de données inutiles, ce qui ralentirait exagérément le fonctionnement du modèle : en effet à chacune des surfaces correspond des données, augmenter exagérément le nombre de mailles demanderait un **travail beaucoup plus important pour les supercalculateurs** qui analysent ces données. A titre d'ordre de grandeur, avec les supercalculateurs actuels, on peut traiter un modèle recouvrant le globe sur **15 niveaux d'altitude**, présentant un **écart de 1,875° entre les méridiens** et comportant **30 000 mailles**. Si l'on effectue un calcul tel que le pas de temps soit égal à **15 minutes**, il faut alors **500 milliards d'opérations** pour obtenir une prévision de **10 jours**.

Autre ordre de grandeur en terme de quantité de variables, pour un modèle de plus grande ampleur : le modèle **Arpège** (échelle européenne, Météo-France). En 1998, on avait **2,3.10⁷ variables** réparties sur **31 niveaux de mailles**. Pour obtenir une prévision de **24 heures**, il fallait un peu moins d'un **quart d'heure** de calcul, à raison de **20 milliards d'opérations par seconde**.

Pour créer la base statistique nécessaire au TEB, les chercheurs ne sont pas repartis à zéro, mais ont utilisé la banque de donnée **CORINE** (classification des surfaces du territoire), déjà exploitée pour les simulations des conditions d'anticyclone au-dessus de Paris. Ces informations couvrent la surface urbaine par une grille **d'un point tous les 250 m**, et différencient **11 types de surfaces urbaines**, parmi les 44 disponibles.

Le système étudié dans le TEB est une partie du **centre ville marseillais**, simplifié en un nombre limité de surfaces différentes que nous détaillerons dans les paramètres. La superficie de la maille considérée correspond à un **disque de 500 m de rayon** autour d'un bâtiment central, la tour qui permettra plus tard de prélever les données pour vérifier si elles sont en adéquation avec le modèle.

2) Description du système par deux types de données

On se place ici dans l'étude d'un système thermodynamique quelconque, nous verrons le cas du TEB plus loin. Pour décrire précisément un environnement et mettre en équation les phénomènes que l'on veut étudier, il faut prendre en compte deux types de données ; les premières sont les **variables d'état** qui permettent de suivre l'évolution du système. Elles sont reliées entre elles par l'intermédiaire d'une **équation d'état**, de la même manière que l'on relie pression, volume et température dans l'équation d'état des gaz parfaits.

Les secondes données nécessaires sont les **paramètres** qui interviennent dans la description du système, comme la proportion de surface naturelle/urbaine sur une maille. Ces paramètres sont intimement liés avec le type de maillage utilisé. Ces données doivent être déterminées de façon empirique sur le terrain et **corrigées** au fur et à mesure pour qu'elles correspondent parfaitement au milieu : ainsi on peut constituer des **tables de valeurs associées à chaque environnement**.

Variables et paramètres du schéma de surface TEB

Nous aborderons ici les variables et paramètres qui serviront à décrire l'environnement urbain et les phénomènes atmosphériques dans le cas précis d'un ensemble de rues entourées d'immeubles qualifiées de **canyons**. Les moyens pour y arriver sont de deux types : d'une part, on peut considérer la ville comme **une simple couche de béton** (en opposition aux surfaces naturelles jointives), puis pour préciser cette description, on peut ajouter des **paramètres de morphologie** de la ville et des **données de matériaux**, ce qui permet de prendre en compte les variations spatiales des différents flux (chaleur, radiations, vents...). La répartition des paramètres étant assez complexe, elle est représentée sur la figure 8 (page suivante).

Les principales variables prises en compte dans l'équation du modèle sont ici les différentes **températures de surfaces** ainsi que les **résistances thermiques** détaillées dans la première partie, variables qui dépendront des différents paramètres.

Il est nécessaire de s'intéresser à la démarche suivie par les chercheurs pour établir quels ont été les paramètres nécessaires : à partir de la banque de données CORINE, dont nous avons parlé précédemment, ils ont déterminé quels étaient les paramètres à ajouter puis à modifier en considérant leur **impact dans la précision du modèle**. Le tableau ci-contre compare les données initialement prévues et celle finalement prises en compte.

On peut voir qu'à partir des données génériques fournies, les chercheurs ont **adapté** les valeurs moyennes à leurs

| Avec la banque CORINE | Ajouts et précisions pour Marseille |
|--|--|
| Fraction des surfaces : - naturelles : 0.100 - eau : 0.000 - urbaines : 0.900 immeubles : 0.450 routes : 0.450 | Fraction des surfaces : - naturelles : 0.136 - eau : 0.000 - urbaines : 0.864 immeubles : 0.595 routes : 0.269 |
| Géométrie : - hauteur des immeubles : 30.0 m - aspect du canyon : 0.82 ($Z_{bât} / W$) (hauteur immeubles/ largeur rue) - proportion mur/sol : 1.00 - longueur de rugosité : 3.00 m | Géométrie : - hauteur des immeubles : 15.6 m - aspect du canyon : 1.63 ($Z_{bât} / W$) (hauteur immeubles/ largeur rue) - proportion mur/sol : 1.14 - longueur de rugosité : 1.90 m |
| Routes : - albédo : 0.08 - fraction d'énergie émise : 0.94 | Routes : - types de matériaux : asphalte et béton - albédo : 0.08 - fraction d'énergie émise : 0.94 - longueur de rugosité : 0.05 m |
| Toits : - albédo : 0.15 - fraction d'énergie émise : 0.90 | Toits : - types de matériaux : tuiles ou graviers sur béton, bois... - albédo : 0.22 - fraction d'énergie émise : 0.90 - longueur de rugosité : 0.15 m |
| Murs : - albédo : 0.25 - fraction d'énergie émise : 0.82 | Murs : - types de matériaux : pierre et volets en bois - albédo : 0.20 - fraction d'énergie émise : 0.90 |
| Température d'initialisation : -- / -- | Température d'initialisation : - T° interne aux bâtiments : 22°C - T° du sol en profondeur : 17°C |

besoins et aux caractéristiques de la ville de Marseille. Aucune information n'est fournie quand aux moyens employés pour affiner ces mesures mais on peut faire plusieurs hypothèses : tout d'abord des **moyens statistiques** ont dû être employés, et ont été d'autant plus efficaces que la surface étudiée était petite (disque d'un rayon de 500 m , soit environ 1,6 km²) par rapport aux zones habituellement exploitées par les modèles d'une résolution de 300 km. De plus, grâce une méthode de **correction progressive**, on peut affiner les paramètres pour obtenir de meilleurs résultats (voir partie III). Pour cela les chercheurs déterminent l'impact de la modification de plusieurs paramètres pour les préciser, comme l'aspect du canyon qui est un facteur important et qui joue directement sur les variations des échanges de chaleur entre routes/toits/murs et atmosphère.

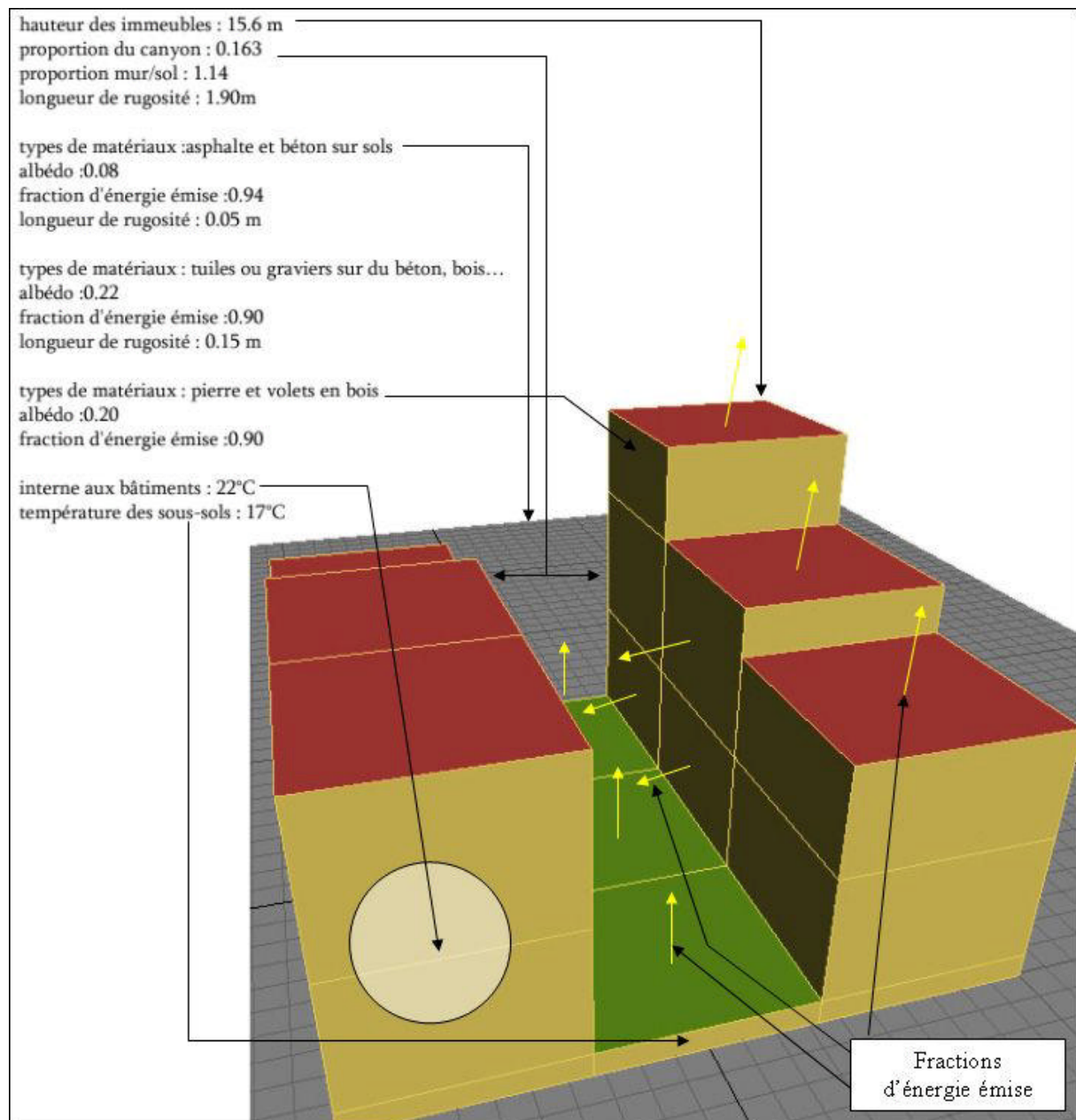


Figure 8 : Répartition des différents paramètres du schéma de surface TEB.

Ces modifications empiriques sont comme nous le constatons le fruit de plusieurs tests qui fournissent des résultats parfois surprenants. Avec des valeurs sensiblement éloignées de celles de la littérature, on peut parfois obtenir des résultats qui s'approchent de la réalité. C'est pourquoi des tests de validation sont nécessaires et ce dans des **conditions normales et extrêmes**, pour analyser les différentes réactions du modèle.