

Validation et Modélisation de l'Evapotranspiration sur la Belgique

Françoise Gellens-Meulenberghs

Membres du Jury

Président:

Pr René Prieels, Université catholique de Louvain

Promoteurs:

Pr Guy Schayes, Université catholique de Louvain

Pr Alfred Quinet, Institut Royal Météorologique

Lecteurs:

Dr Jean-Christophe Calvet, Météo-France / CNRM

Dr Hugues Goosse, Université catholique de Louvain

Pr Eric Lambin, Université catholique de Louvain

Pr Jean-Pascal van Ypersele, Université catholique de Louvain

A mes parents,

à Daniel, mon époux,

à Claire, Gaétan et Arnaud, mes enfants.

Remerciements

En tout premier lieu, je tiens à adresser mes chaleureux remerciements au Prof Guy Schayes qui à accueilli sans réserve cette recherche au sein de l'Institut d'Astronomie et de Géophysique Georges Lemaître (unité ASTR) et a accepté d'en assurer la promotion à l'UCL. L'intérêt et l'enthousiasme qu'il a témoigné à mon travail lors de chaque rencontre ont été autant d'encouragements qui m'ont permis de mener cette recherche à son terme dans un climat constructif très appréciable.

Je tiens tout aussitôt à remercier le Prof Alfred Quinet, promoteur à l'IRM. Il m'a assuré sa disponibilité, son intérêt et son appui tout au long de ce travail. Je lui suis aussi reconnaissante pour sa lecture minutieuse de ce texte et pour ses nombreuses suggestions qui m'ont permis d'en améliorer la qualité.

Mes remerciements s'adressent aussi au Prof René Prieels, Président du Département de Physique et Président du Jury. Mon sujet de recherche a peut-être paru quelque peu exotique à cet expert de la physique fondamentale. Toujours est-il que c'est avec une grande ouverture qu'il s'est intéressé à mon travail. Je ne voudrais pas oublier de remercier son prédécesseur, le Prof Jean-Pierre Antoine, qui a accepté cette recherche au sein du Département de Physique. Je remercie encore le Prof Thierry Fichet, responsable actuel de l'unité ASTR, pour son intérêt pour mon travail.

C'est avec reconnaissance que je pense au Prof Jean-Pascal van Ypersele qui, malgré ses nombreux engagements, a accepté de faire partie de mon comité d'encadrement. Mes remerciements s'adressent aussi aux autres membres de mon Jury, le Prof Eric Lambin, le Dr Hugues Goosse et le Dr Jean-Christophe Calvet. Qu'ils soient remerciés pour leurs questions témoignant de leur intérêt pour mon travail et pour leurs suggestions qui m'ont permis de compléter et d'améliorer ce texte. Je garde des interactions que j'ai eues avec eux un excellent souvenir.

Il me faut ensuite remercier tout spécialement le Dr Henri Malcorps, Directeur Général de l'IRM, de m'avoir permis de réaliser ce travail dans le cadre de mes activités à l'IRM et de la confiance qu'il n'a jamais manqué de me témoigner.

Je voudrais évoquer la mémoire du Prof. Franz Bultot qui, le premier, perçu l'intérêt des questions qui purent être développées plus tard dans ce travail. Je souhaite remercier le Dr Gaston Demarée pour le soutien qu'il a toujours réservé à mes projets au sein de la Section Hydrologie puis du Département Recherche de l'IRM. Je remercie messieurs Herman Boyen, Serge Ginion, Sébastien Donato et Pieter Peeters pour les discussions et informations à propos des observations des stations automatiques. Merci aussi aux Dr

Olivier Brasseur et Olivier Latinne pour les discussions que j'ai eues avec eux à propos du modèle de prévision numérique Aladin. Le dernier chapitre de ce travail exploite les images PDUS du satellite Meteosat. Je voudrais remercier Michiel Van Loey et Geert De Sadelaere qui n'ont assuré l'envoi de ces images en temps réel.

J'ai été aidée dans des tâches techniques par plusieurs collègues de l'IRM. Ainsi, je remercie Slavie Derasse-Jelovac pour son aide pour accéder aux données des stations automatiques, Christine Roberti pour ses photocopies d'articles, Rudy Juvenois et Nicole Deruest pour leur aide à la digitalisation de documents et au brochage de la version préliminaire de ce texte. D'une manière globale, dans le souci de n'oublier personne, j'exprime ma gratitude aux personnes de la Section Centre de Calcul, devenue Section Infrastructure Informatique et Télécommunication, pour m'avoir toujours garanti, en tant qu'utilisateur de l'IRM, l'équipement informatique adéquat me permettant de réaliser ce travail dans les meilleures conditions.

Deux projets "Telsat" successifs à l'IRM ont permis de mettre au point une procédure automatique de génération de flux radiatifs et de champs météorologiques de surface. Ces champs sont utilisés en entrée du modèle développé au chapitre 5. Je tiens à remercier les Services de la Politique Scientifique qui ont financé ses projets et qui continuent à m'assurer de leur soutien pour les nouveaux développements que je mène depuis quelques années dans ce domaine.

Je suis reconnaissante au KNMI, et en particulier au Dr Fred Bosveld, de m'avoir communiqué les données du site de Cabauw. Je remercie le Dr Reinhart Ceulemans et le Dr Marc Aubinet, responsables respectifs des stations Euroflux/CarboEurope belges de Brasschaat et Vielsalm, de mettre les données de ces stations à la disposition de la communauté scientifique.

Le Dr Daniel Gellens cumule à mon égard les qualités particulières de collègue et d'époux. Je le remercie pour son suivi de ma recherche à travers les discussions quotidiennes que j'ai eues avec lui. Ce ne sera que peu de lui assurer ma reconnaissance pour tout à la fois ses encouragements et son soutien logistique sans faille de notre famille.

Enfin je remercie mes enfants Arnaud, Gaétan et Claire pour leur curiosité à l'égard du sujet et de l'évolution de mon travail. Je souhaite à chacun de pouvoir épanouir ses talents dans des lieux, tel celui que j'ai trouvé ici, où s'allieront compétence et convivialité.

Résumé

Si les précipitations peuvent être mesurées à l'aide d'instruments comme les pluviographes et estimées au moyen de radars météorologiques, la quantité d'eau qui retourne dans l'atmosphère par le processus d'évapotranspiration reste difficile à évaluer. Depuis une dizaine d'années les campagnes de mesures se sont intensifiées à l'échelon international et des stations de mesures à long terme ont commencé à fournir les premières séries de données.

Face aux difficultés instrumentales, il s'avère nécessaire de recourir à la modélisation pour estimer tout à la fois l'évapotranspiration et les termes du bilan d'énergie en surface. L'objectif poursuivi ici est d'estimer ces différents termes par une méthode suffisamment robuste pour pouvoir être appliquée à long terme, c.-à-d. à l'échelle pluriannuelle, en utilisant par ailleurs des pas de temps suffisamment courts pour permettre également un suivi de l'évolution au cours de la journée. La présente étude s'intéresse successivement au cas idéalisé des surface homogènes puis à celui des surfaces hétérogènes. Elle s'appuie sur l'état de la recherche actuelle dans le domaine. De nombreuses questions restent néanmoins encore ouvertes.

Depuis quelques années, l'IRM a entrepris d'automatiser son réseau de stations de mesures synoptiques. Une sélection de stations a été dotée d'un équipement plus complet et constitue un ensemble opérationnel inédit. Le prototype expérimental a été mis sur pied à Melle (au SE de la ville de Gand) et a été doté d'un mât afin d'effectuer des mesures de la vitesse du vent et de la température de l'air à 2 ou 3 niveaux. Les valeurs moyennes sur des pas de temps de 30 minutes, complétées par d'autres observations, nous permettent d'estimer les flux turbulents de chaleur sensible et de chaleur latente ainsi que le flux d'évapotranspiration réelle dans la couche limite de surface. La méthode combine l'évaluation du bilan énergétique de surface et l'estimation des profils en se basant sur la théorie de Monin-Obukhov. Ces évaluations sont complétées par une analyse de sensibilité originale. Elle comprend 2 volets ayant trait au choix des fonctions de stabilité et à la précision des observations utilisées en entrée.

Le nombre de stations météorologiques réparties sur le territoire de la Belgique est nécessairement limité. Par ailleurs, la surface de gazon standard de ces stations n'est pas représentative de l'ensemble des types de végétations possibles. C'est pourquoi un objectif important de l'étude est d'étendre l'estimation des valeurs de l'évapotranspiration à l'ensemble de la Belgique en tenant compte de la nature de la surface réelle. La télédétection offre la possibilité d'observer de vastes territoires. Les satellites géostationnaires comme Meteosat ont tout spécialement été conçus pour suivre l'évolution journalière des structures nuageuses. Celles-ci conditionnent les fluctuations des termes du

bilan radiatif de surface. Une recherche menée précédemment à l'IRM a permis de mettre au point une méthodologie exploitant les images Meteosat pour déduire des valeurs des flux radiatifs de surface. La procédure automatique mise au point a généré en temps quasi-réel les flux horaires de 1994 à 2003. Ces résultats sont exploités ici comme données d'entrée d'un modèle diagnostique proposé pour estimer les flux turbulents de surface et l'évapotranspiration réelle sur le territoire de la Belgique. La résolution spatiale est celle du capteur infra-rouge utilisé jusque Meteosat-7 (5×9 km). Le modèle est une variante simplifiée du schéma « Isba » de transfert sol-végétation-atmosphère qui est notamment utilisé dans le modèle de prévision numérique Aladin. Etant donné l'inexistence d'observations des précipitations avec la résolution spatiale adéquate sur la période étudiée, un régime mensuel est adopté pour l'humidité du sol. En Belgique, l'impact de cette approximation n'est particulièrement sensible qu'au cours des épisodes secs prolongés.

Actuellement, 9 stations automatiques de l'IRM sont équipées d'un mât météorologique. Leurs données sont utilisées pour produire des valeurs de référence qui sont comparées aux résultats obtenus à partir des images Meteosat. Des comparaisons sont également réalisées avec des données récentes des stations belges intégrées au réseau Fluxnet. La validation est effectuée en 2 étapes: tout d'abord par une application "locale" (sur base des observations aux stations de référence) afin d'évaluer la précision de l'algorithme utilisé; ensuite, par une application "régionale" sur base des données déduites de Meteosat.

Les flux radiatifs déduits des images Meteosat sont utilisés pour produire des flux d'évapotranspiration sur le territoire de la Belgique. Les résultats témoignent d'une importante variabilité spatiale.

Des perspectives de prolongements de l'étude actuelle sont examinées *in fine*.

Table des matières

Remerciements	3
Résumé	5
Introduction	11
0.1 Bilan d'eau et bilan d'énergie: quelques définitions	12
0.2 Nécessité du recours à la modélisation	13
0.3 Objectifs de cette étude	14
0.4 Plan / structure du texte	14
Chapitre 1. Couche limite atmosphérique (CLA)	
I.1 Couche limite atmosphérique et turbulence - définitions	17
I.2 Représentation mathématique	
I.2.A variables utilisées	21
I.2.B approche statistique de la modélisation	24
I.2.C équations générales descriptives de l'atmosphère	27
I.2.D problème de la fermeture des équations	31
I.2.E équation de l'énergie cinétique turbulente et stabilité de l'atmosphère	34
I.2.F analyse dimensionnelle et principe de similitude	37
I.3 Structure de la CLA et terminologie	
I.3.A techniques d'investigation de la CLA	38
I.3.B caractéristiques en conditions horizontales homogènes	40
I.3.C caractéristiques en conditions horizontales hétérogènes	45
I.4 Examen des caractéristiques de la CLA sur base de l'analyse des sondages d'Uccle	
I.4.A caractéristiques des profils typiques	49
I.4.B critères d'identification des différentes régions de la CLA	50

I.4.C application dans le cas de situations avec ciel serein	52
I.4.D application dans le cas de situations avec vitesse du vent élevée	56
I.4.E principaux résultats de l'analyse des sondages	60
I.5 Synthèse	62
 Chapitre 2. Méthodes d'estimation de l'ETR et des flux turbulents sous l'hypothèse d'homogénéité horizontale en atmosphère stationnaire - Présentation et discussion du choix d'une approche méthodologique	 63
II.1 Méthodes basées sur la mesure des valeurs moyennes et sur les hypothèses de similitude de la théorie de Monin-Obukhov	64
II.2 Méthodes basées sur la mesure des fluctuations des variables turbulentes	
II.2.A méthode des covariances	72
II.2.B méthode des variances	73
II.2.C méthode de dissipation	74
II.2.D méthode du paramètre de structure	76
II.2.E méthodes de l'échantillonnage conditionnel et du renouvellement	77
II.3 Méthodes faisant appel au bilan d'énergie	79
II.3.A méthodes mixtes	80
II.3.B méthode du rapport de Bowen	80
II.3.C méthode de Penman - Monteith (ETP, ETR et méthodes basées sur les résistances)	82
II.3.D méthode de Priestley-Taylor	85
II.4 Autres méthodes	88
II.5 Choix d'un modèle en terme de la disponibilité des données d'entrées	89
II.6 Discussion	90
 Chapitre 3. La théorie de MO appliquée dans la CLS locale: état de la question, adaptation, mise en oeuvre sur base de données moyennes observées aux stations météorologiques	
III.1 Mise au point d'une méthode d'estimation de l'ETR et des flux turbulents H et LE	
III.1.A choix des fonctions de stabilité	93
III.1.B données d'entrée du modèle de MO, niveaux de mesure et valeurs des paramètres	109
III.1.C mise en oeuvre du modèle de MO et critères de précision	109

III.2 Application et tests de la méthode à Cabauw (NL)	
III.2.A le site de Cabauw et les données disponibles	112
III.2.B comparaison des flux calculés par le modèle et obtenus par le KNMI à Cabauw	117
III.2.C tests de la simulation des profils extrapolés par comparaison avec les mesures aérologiques pratiquées à Cabauw	121
III.3 Application à la station automatique de Melle (B)	
III.3.A vérification et préparation des données d'entrée du modèle	127
III.3.B application du modèle et analyse des résultats	129
III.3.C comparaison avec les estimations journalières de l'ETR précédemment disponibles à l'IRM	137
III.4 Analyse de sensibilité	
III.4.A analyse de sensibilité du modèle au choix des fonctions de stabilité	142
III.4.B analyse de sensibilité du modèle aux erreurs de mesure sur les données d'entrée	152
III.5 Mise en oeuvre et perspectives	170
III.6 Synthèse	173
 Chapitre 4. La théorie de MO appliquée dans la CLS régionale: examen des pratiques actuelles et de l'état de la recherche	
IV.1 Informations disponibles relatives à l'estimation des flux turbulents H et LE et de l'ETR des surface naturelles tirées des observations	
IV.1.A les campagnes de mesures internationales	177
IV.1.B les sites de mesures a long terme	180
IV.1.C résultats généraux tirés des campagnes d'observations	181
IV.1.D résultats d'observations EUROFLUX réalisées en Belgique	187
IV.2 Concepts de CLS régionale et de surface régionale	200
IV.3 Estimation des flux turbulents de surface dans les modèles météorologiques	
IV.3.A les schémas "SVAT"	204
IV.3.B état actuel de validation des flux H , LE et de variables associées	207
IV.4 Estimation des flux turbulents de surface sur base de données obtenues par télédétection	
IV.4.A caractéristiques générales des données télédétectées	210
IV.4.B évaluation des principales méthodes	212
IV.4.C applications opérationnelles	218
IV.5 Synthèse	219

Chapitre 5. Evaluation des flux turbulents et de l'ETR à méso-échelle en Belgique sur base de données Meteosat

V.1 Methodologie	221
V.1.A approche Isba utilisant les variantes aérodynamiques “globale” (“bulk”) et “de Monteith”	223
V.1.B approximations concernant la partie hydrologique du modèle	226
V.1.C synthèse des différences par rapport à l'approche Isba d'origine	226
V.2 Application à l'échelle locale	
V.2.A Melle et Cabauw	227
V.2.B stations automatiques récentes de l'IRM (2001-2003)	239
V.2.C stations de Braschaat et Vielsalm (Euroflux/CarboEurope)	242
V.3 Application à l'échelle de la Belgique	
V.3.A données d'entrée: description, validation, exploitation	245
V.3.B application	270
V.4 Synthèse et perspectives	290
Conclusions	295
Références	299

Introduction

L'**Institut Royal Météorologique** (IRM) veut offrir aux autorités et au public un service fiable basé tout à la fois sur la recherche, l'innovation et la continuité. Ce service est destiné à assurer la sécurité de la population et l'information des communautés tant socio-économiques que scientifiques. La recherche s'effectue notamment dans les domaines de l'hydrométéorologie et de la climatologie. Elle se base sur les longues séries de données standardisées et validées obtenues au moyen de réseaux de mesures. Elle s'emploie en outre à développer et à adapter des idées nouvelles pour saisir les problèmes actuels.

Aujourd'hui, la modélisation des échanges d'énergie et de matière entre l'atmosphère et la surface fait l'objet d'une recherche intensive mais est encore en butte à de nombreuses difficultés. L'obtention de bonnes estimations de l'**évapotranspiration** (ETR) est cependant primordiale dans le domaine de la modélisation du climat, des prévisions météorologiques et de l'hydrologie. Les institutions de recherche et les universités actives dans le domaine de la modélisation sont spécialement concernées. L'estimation de l'ETR est par ailleurs aussi utile pour les applications pratiques de divers secteurs de l'agriculture, de l'environnement ou de la gestion du territoire. En Belgique, elle est notamment susceptible d'intéresser des particuliers confrontés à des problèmes de gestion de l'eau, mais aussi des institutions nationales ou régionales. Les services hydrologiques régionaux doivent notamment effectuer des calculs de bilans hydriques par bassins versants. Les crues et inondations qui se produisent notamment en période hivernale ne sont sans doute que peu influencées par l'évapotranspiration. Par contre, cette dernière doit avoir un impact plus important dans les études des étiages des cours d'eau et des niveaux de pollution des rivières en été.

Jusqu'à présent n'étaient disponibles à l'IRM que des estimations de ETR réalisées sur des périodes limitées dans le temps à l'occasion de projets de recherche et pour le seul pas de temps journalier. Encore s'agissait-il de valeurs moyennes à l'échelle de bassins versants, obtenues de manière semi-empirique à l'aide d'un modèle hydrologique (Bultot et Dupriez, 1976, 1985). La précision de ces valeurs journalières était inconnue; seule la précision des totaux annuels était garantie dans le cas des bassins versants fermés (c.-à-d. n'échangeant pas d'eau souterraine avec les bassins contigus). Par ailleurs, on réalisait en routine des estimations, journalières elles aussi, non pas de l'ETR qualifiée de "réelle", mais de l'évapotranspiration maximale possible (l'évapotranspiration "potentielle") en une quinzaine de stations réparties sur le pays à l'aide de la relation semi-empirique de Penman (Bultot *et al.*, 1983; Gellens-Meulenberghs et Gellens, 1992).

Depuis 1997, l'ETR et les flux turbulents sont également calculés de manière interne dans le modèle de prévision du temps Aladin-Belgique. Ces résultats, produits par

plusieurs versions successives du modèle n'ont pas été archivés systématiquement mais peuvent en principe être recalculés si nécessaire. Ici, l'erreur de prévision des données utilisées comme variables d'entrée des algorithmes s'ajoute à l'erreur inhérente aux algorithmes utilisés eux-mêmes. Aucune validation n'a été faite des variables qui nous occupent faute de valeurs de référence disponibles jusqu'ici.

1. Bilan d'eau et bilan d'énergie: quelques définitions

Par définition, un **flux** désigne le transfert d'une quantité par unité de surface et par unité de temps. Dans le domaine de la météorologie, divers flux interviennent: flux de masse, de chaleur, d'humidité, de quantité de mouvement, de polluants... Dans le système d'unités international (SI ou MKSA), un flux de chaleur H a pour unités $[H] = \text{J m}^{-2} \text{s}^{-1} = \text{W m}^{-2}$ et un flux d'humidité E : $[E] = \text{kg}_{\text{eau}} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Dans ce cadre, on désignera par "**surface**" l'interface entre l'atmosphère et le sol ou le sommet de la végétation.

En toute généralité, l'**évaporation** est le processus de passage d'une substance de la phase liquide à la phase vapeur. On ne considère ici que l'évaporation de l'eau. En référence à la masse volumique de l'eau de 10^3 kg m^{-3} , le flux vertical d'évaporation s'exprime dans la pratique habituelle en mm et est cumulé sur le pas de temps considéré (ex: mm (30 min)^{-1} , mm h^{-1} , mm j^{-1} , ...). L'**ETR** désigne le flux E total de vapeur d'eau en surface. Elle trouve son origine tant dans l'évaporation des surfaces d'eau libre (océans, lacs,...) et de l'eau liquide contenue dans le sol que dans la transpiration via les stomates de la végétation. L'ETR est une des composantes du cycle hydrologique.

Si l'on se réfère à un réservoir unique de charge W en humidité comme modèle le plus simple pour représenter le sol près de la surface, le bilan hydrique par unité de surface est donné par l'équation de conservation de la masse (exprimée par unité de surface)

$$P - E + ECT_i - ECT_o - dW/dt = 0 \quad (0.1)$$

où P désigne les précipitations, ECT_i et ECT_o sont respectivement les flux d'eau de surface et souterraine entrant (importation) et sortant (exportation) du réservoir et dW/dt représente le changement de quantité d'eau W stockée dans le réservoir au cours du pas de temps dt considéré. L'expression ci-dessus peut-être généralisée lorsque le réservoir comprend de l'eau sous forme solide. Elle n'est en général pas utilisée pour déduire E , car, mis à part les précipitations qui peuvent être mesurées à l'aide d'instruments, les termes ECT_i , ECT_o et dW/dt sont la plupart du temps inconnus (certains bassins versants expérimentaux font exception à cette règle).

La transition de la phase liquide à la phase vapeur consomme de l'énergie de sorte que l'évapotranspiration est liée de manière univoque à un flux d'énergie appelé **flux de chaleur latente** LE exprimé en W m^{-2} et donné par

$$LE = L_v E \quad (0.2)$$

où L_v est la **chaleur latente de vaporisation de l'eau** (en J kg^{-1}). Celle-ci varie lentement en fonction de la température T (K). Dans cette étude, elle sera calculée par l'expression (Dufour et Van Mieghem, 1975)

$$L_v = [2,50084 - 0,00234(T - 273,16)] 10^6 \quad (0.3)$$

Notons l'énergie considérable requise par le processus d'évaporation. Pour le différentier

sans ambiguïté d'autres flux, le flux de chaleur H , lié au gradient vertical de température dans l'atmosphère, est dénommé **flux de chaleur sensible**.

Le **bilan d'énergie en surface** est couramment représenté par

$$R_n - LE - H - G = 0 \quad (0.4)$$

où R_n est le flux de rayonnement net et G est le flux de conduction dans le sol. Des termes supplémentaires peuvent compléter (0.4) pour prendre en compte d'autres processus tels la fonte de la glace ou de la neige, l'advection (latérale) d'énergie, le stockage d'énergie dans la strate végétale ou la photosynthèse. Ces termes, petits et mal connus, sont le plus souvent omis dans la relation (0.4).

Le processus d'évaporation est directement concerné par les interactions complexes entre l'atmosphère et la surface terrestre. En effet, l'évolution de l'atmosphère aux échelles synoptiques et régionales ("mésos-échelle") détermine les valeurs prises par les variables météorologiques locales telles la couverture nuageuse, le rayonnement en surface, la vitesse du vent, la température et l'humidité de l'air. Ces conditions météorologiques influencent les valeurs d'ETR. Par ailleurs, la répartition de l'énergie disponible en surface entre flux LE et H détermine à son tour les valeurs des variables météorologiques à la base de l'atmosphère et bien au-delà de l'environnement immédiat de la surface (Hutjes et al., 1998).

Différentes échelles de temps sont impliquées. Des pas de temps compris entre la fraction de seconde et la minute sont requis pour décrire les processus turbulents; un échantillonnage horaire, journalier ou hebdomadaire est nécessaire pour décrire l'évolution des flux turbulents et de l'évapotranspiration liée aux conditions météorologiques; des pas de temps mensuels ou pluri-mensuels permettent de suivre l'évolution saisonnière liée aux fluctuations du climat et à l'évolution des caractéristiques de la végétation (Katul *et al.*, 2001).

2. Nécessité du recours à la modélisation

Les instruments permettant une mesure directe de l'ETR sont rares et concernent des surfaces de types particuliers. Citons le bac évaporatoire qui permet d'estimer l'évaporation d'une nappe d'eau libre et le lysimètre qui est utilisé pour évaluer l'évapotranspiration d'une végétation courte (gazon, céréales, ...). Ce dernier n'est utilisé que dans les centres d'études agronomiques bien équipés pour sa maintenance.

Pour obtenir l'ETR d'une surface quelconque, il faut donc recourir à une approche indirecte. Aux sites d'observation, les mesures portent sur la température et l'humidité de l'air, la vitesse du vent, les flux radiatifs, ... Les sites les mieux instrumentés sont utilisés pour établir des paramétrisations des termes intervenant dans la relation (0.4) en fonction de variables plus facilement accessibles à l'expérimentation courante. Ces paramétrisations sont aussi utilisées pour évaluer les termes inconnus des relations (0.1) à (0.4) qui interviennent dans une grande variété de modèles.

La télédétection est considérée comme un outil prometteur pour fournir des

observations sur de vastes territoires. Elle ne permet cependant pas d'observer directement aucun des termes des relations (0.1) et (0.4). Ici aussi, la modélisation s'avère nécessaire. De nombreuses tentatives ont d'ores et déjà été réalisées dans ce domaine et de nouvelles perspectives sont offertes par les satellites météorologiques de la nouvelle génération.

3. Objectifs de cette étude

La présente recherche entend contribuer à l'amélioration de la connaissance de l'ETR et des flux turbulents H et LE en Belgique. Elle veut s'appuyer sur les fondements physiques de la modélisation et établir l'état de la recherche actuelle. Elle vise à dégager sur cette base les applications possibles dans un contexte **opérationnel**. Pour ce faire, elle discute les possibilités d'estimer l'ETR en exploitant les données devenues récemment disponibles dans le réseau de l'IRM. Elle entend améliorer les estimations effectuées jusqu'ici. Enfin, elle veut proposer et mettre en oeuvre des méthodes adaptées à l'échelle locale ou régionale (mésos-échelle).

Les **objectifs** de la présente recherche peuvent être énoncés comme suit:

- examiner les modélisations actuelles et les développements récents en météorologie et en télédétection; discuter leurs possibilités et leurs limitations de manière critique;
- sélectionner, adapter et expérimenter des méthodes d'estimation;
- adopter comme contrainte opérationnelle que l'application des méthodes proposées soit possible "en routine", c.-à.-d. sur de longues périodes (plusieurs années) en faisant appel aux seules données disponibles opérationnellement et en utilisant des procédures de calcul automatique;
- procéder à des estimations successives avec un pas de temps (ex: 30 minutes) qui permette d'échantillonner le cycle journalier;
- produire une estimation de valeurs moyennes temporelles de l'évapotranspiration réelle et des flux turbulents de surface à l'échelle locale et régionale en Belgique (plus spécifiquement, dans la couche limite atmosphérique de surface locale et régionale).

4. Plan / structure du texte

Le texte débute par un premier chapitre ayant pour objet de situer le contexte physique de la recherche et de définir les concepts qui seront exploités par la suite (équations descriptives de l'atmosphère, turbulence, problème de fermeture, théories de similitude, structure et nomenclature de la couche limite atmosphérique, analyse de profils atmosphériques réalisés par radiosondages). Il se focalise ensuite sur la modélisation des flux turbulents en surface et s'articule en deux volets relatifs aux surfaces horizontalement homogènes (chapitres 2 et 3) et hétérogènes (chapitres 4 et 5). Etant donné la complexité du sujet et le foisonnement des approches méthodologiques qui sont apparues au fil des ans,

notamment depuis le début des années 1990s, on a estimé nécessaire de faire le point sur la question (chapitres 2 et 4) avant de proposer une méthodologie qui soit applicable avec les données observées en routine. Le chapitre 3 se base sur la théorie de similitude de Monin-Obukhov. Divers aspects sont examinés: validation, analyse de sensibilité, préparation des données d'entrées disponibles sous forme brute, application aux données de la station automatique de Melle, examen des résultats simulés au pas de temps semi-horaire au cours de la période 1994-1996. Le chapitre 5 quant à lui propose d'adapter un schéma d'interaction sol-végétation-atmosphère en vue d'exploiter des données issues des satellites Meteosat pour estimer l'évapotranspiration et les flux turbulents en surface sur l'ensemble du territoire belge. Les résultats sont analysés pour un dizaine d'années de données horaires couvrant le territoire avec la résolution spatiale des pixels infra-rouges (5×9 km). La démonstration est faite des possibilités d'exploitation de la méthode en routine. Le travail s'achève par une discussion des possibilités de développements ultérieurs de la méthode.

