Apport de la modélisation pour l'aide à la décision en vue de la réutilisation agricole des eaux usées traitées

Nesrine Kalboussi, Sébastien Roux, Bruno Cheviron, Jérôme Harmand, Alain Rapaport, Carole Sinfort

▶ **To cite this version:**

Nesrine Kalboussi, Sébastien Roux, Bruno Cheviron, Jérôme Harmand, Alain Rapaport, et al.. Apport de la modélisation pour l'aide à la décision en vue de la réutilisation agricole des eaux usées traitées. Journal International Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement, 2018, 3 (1), pp.102-107. hal-01975462v2

HAL Id: hal-01975462
https://hal.science/hal-01975462v2

Submitted on 18 Jan 2019 (v2), last revised 4 Mar 2020 (v3)

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

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

Ressources en Eau, Environnement et Changement Climatique
Sciences de l'Eau du Climat et de l'Environnement
Numéro 3 -Octobre 2018

Apport de la modélisation pour l'aide à la décision en vue de la réutilisation agricole des eaux usées traitées

Nesrine KALBOUSSI[1,2], Sébastien Roux[2], Bruno Cheviron[3], Jérôme Harmand[4], Alain Rapaport[2], Carole Sinfort[1]
[1] UMR ITAP, IRSTEA, Montpellier SupAgro, Montpellier, France,
nesrinekalboussi@gmail.com, carole.sinfort@supagro.fr
[2] UMR MISTEA, Univ. Montpellier, INRA, Montpellier, France,
sebastien.roux@inra.fr , alain.rapaport@inra.fr
[3] UMR G-EAU, IRSTEA, Montpellier, France,
bruno.cheviron@irstea.fr
[4] LBE, Univ Montpellier, INRA, Narbonne, France,
jerome.harmand@inra.fr

Résumé

Un modèle mathématique en petite dimension qui tient en compte les spécificités de la plante et du sol a été développé et validé, en vue d'être couplé à un modèle de traitement des eaux. Les résultats de validation sont très satisfaisants pour différentes années climatiques et différentes stratégies d'irrigation. Ce modèle a été capable de reproduire, grâce à l'ajustement de ses paramètres, les sorties du modèle « Optirrig » développé par IRSTEA, beaucoup plus complexe issu de plusieurs connaissances de la littérature et qui a été déjà validé sur des données expérimentales. L'objectif est de coupler le modèle simple proposé avec un modèle de traitement de l'eau afin de piloter en continu la production d'eau en sortie de la STEP selon les besoins de la plante au fur et à mesure de son développement.
.

Mots clés : irrigation, culture, eaux usées traitées, modèle mathèmatique, système dynamique

Contribution of modeling to the decision support for agriculture reuse of treated wastewater

Abstract

A mathematical model in low dimension that takes into account the specificities of the crop and soil has been developed and validated, in order to be coupled with a water treatment model. The validation results are very satisfactory for different climatic years and different irrigation strategies. This model has been able to reproduce, by adjusting its parameters, the outputs of the much more complex model « Optirrig » developed by IRSTEA, based on knowledge of the literature and that has already been validated on experimental data. The aim is to couple the proposed model with a water treatment model in order to continuously monitoring the water production at the output of the WWTP according to the needs of the plant as it has developed.

Key Words: irrigation, crops, treated wastewater, mathematical model, dynamical system

Remerciements : Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet OPTIREUSE financé par l'Institut de convergence #DigitAg.

1. INTRODUCTION

L'agriculture assure la sécurité alimentaire des populations, crée des emplois, fournit des matières premières à l'industrie agro-alimentaire et contribue fortement à la progression des revenus de la population. Le secteur de l'agriculture est le plus gros consommateur d'eau à l'échelle mondiale. Toutefois, les ressources conventionnelles en eau risquent de manquer à cause des changements climatiques, de l'importante croissance démographique des pays du pourtour méditerranéen et des pollutions humaines et indsutrielles. L'exploitation de ressources non conventionnelles, telles que les eaux usées traitées, pourrait permettre de minimiser les impacts de ces changements sur la production agricole et préserver la ressource en eau de qualité pour la production d'eau potable. De plus, la réutilisation des eaux usées traitées pour irriguer les cultures permet de valoriser les nutriments présents dans ces eaux, tels que l'azote et le potassium, à des fins agronomiques et réduire ainsi l'utilisation des engrais chimiques. Les besoins de la plante en eau et nutriments varient selon ses spécificités, le climat et son stade de croissance. Pour permettre la meilleure utilisation possible et limiter l'ajout des intrants, il est nécessaire d'optimiser les apports d'eau – et sa qualité – aux plantes. Pour cela, il peut être utile de recourir à la modélisation dans l'optique de développer un outil de pilotage de la quantité et de la qualité d'eau usée traitée apportée par irrigation en fonction des besoins de la végétation et des objectifs de rendement. Les coûts de traitement de l'eau étant de plus en plus importants, cette optimisation est nécessaire pour rendre cette réutilisation économiquement acceptable. Dans la littérature, plusieurs types de modèles de culture sont proposés. Ces modèles sont soit très spécifiques (tels que AZODYN [1] et INFOCROP [2]), soit très génériques comprenant un grand nombre de grandeurs empiriques (tels que STICS [3] et AquaCrop [4]) [5]. Ces modèles sont trop complexes pour servir de base à l'optimisation des besoins des plantes. C'est la raison pour laquelle il faut d'abord les simplifier. Dans ce premier travail, on montre la possibilité de couplage d'un premier modèle de culture avec un modèle de traitement d'eau afin de piloter le fonctionnement d'une STEP en fonction des besoins de la végétation. Un premier modèle de culture simple et générique qui relie la variation du taux d'humidité dans le sol à la production de la plante en biomasse est proposé. Ce modèle est validé sur un modèle complexe développé par IRSTEA et codé dans le logiciel « Optirrig » [6,7], logiciel initialement développé pour génèrer, analyser et, à terme, optimiser des scénarios d'irrigation.

2. COUPLAGE ET DESCRIPTION DU MODELE

La plante a besoin essentiellement d'eau et d'azote en proportions variables au cours de son développement. Il est indispensable alors de déterminer le meilleur compromis entre qualité et quantité d'eau usées traitées qui garantit une croissance optimale de la plante. Il s'agit d'un problème d'optimisation. Pour résoudre efficacement ce problème d'optimisation, notamment à l'aide des outils de la théorie de la commande optimale, il faut un modèle de culture simple et générique où on puisse piloter le débit d'eau et la quantité d'azote en entrée, afin de calculer une commande optimale qui maximise la production en biomasse de la plante, sur un horizon de temps fixé. Dans ce contexte, on propose un premier modèle qu'on nomme « ToyCrop » et qui se limite dans cette première version à la modélisation de la production en biomasse en fonction de l'eau disponible à la plante, en vue de l'étendre par la suite pour tenir compte des apports en nutriments (l'azote en particulier). Dans « ToyCrop », la teneur en eau du sol S $[sans\ dimension, comprise\ entre\ 0\ et\ 1]$ est le rapport entre le volume de l'eau disponible et le volume du sol. Le pas de temps du modèle développé étant la journée (indicée j), le volume de l'eau dans le sol est défini par un bilan hydrique journalier (cf. équation (1)) résultant de la différence entre les apports et les pertes en eau. Les apports sont effectués par précipitation R $[m^3/m^2]$ et/ou irrigation I $[m^3/m^2]$. Les pertes sont dues à la transpiration de la plante T $[m^3/m^2]$, l'évaporation du sol E $[m^3/m^2]$ et le drainage de l'eau, d $[m^3/m^2]$, dans les nappes profondes inaccessibles à la plante. Le volume du sol est le produit de sa porosité φ $[sans\ dimension]$ par la profondeur de sol exploitée par les racines Z $[m]$.

$$S_j = S_{j-1} + \frac{1}{\varphi\, Z}\,(R_j - T_j - E_j + I_j - d_j) \qquad (1)$$

Les précipitations journaliéres R_j sont des données climatiques. Le débit d'irrigation journalière I_j est une sortie du modèle de traitement des eaux. Il varie selon les demandes journalières de la plante et les objectifs de production. La quantité d'eau transpirée par la plante par jour est modèlisé par l'Eq (2) :

$$T_j = K_S(S_{j-1})\, RIE_j\, ET0_j \qquad (2)$$

avec $K_S(S)$ $[sans\ dimension, comprise\ entre\ 0\ et\ 1]$ une fonction de limitation de la transpiration en fonction du taux d'humidité disponible à la plante (cf. fig A.2), selon :

$$K_S(S) = \begin{cases} 0, & S \le S_w \\ \frac{S - S_w}{S^* - S_w}, & S_w < S \le S^* \\ 1, & S^* < S \end{cases} \qquad (3)$$

$K_S(S)$ est régie par deux seuils de teneur en eau : S^* $[sans\ dimension]$ le point du début de fermeture des stomates au-dessous duquel la plante ferme progressivement ses stomates afin de limiter les pertes par transpiration ($0 < K_S(S) < 1$) et S_w $[sans\ dimension]$ le point de flétrissement d'une plante à partir duquel la plante flétrit. La transpiration dépend aussi de la quantité de l'énergie solaire reçue par son feuillage traduit par le RIE (en anglais « radiation interception efficency ») qui est une fonction de l'indice folaire de la plante LAI $[sans\ dimension]$, selon l'équation (4) :

$$RIE_j = 1 - \exp(-c\ LAI) \quad (4)$$

avec c un paramètre sans dimension à calibrer. $ET0_j$ $[m^3/m^2]$ représente l'évapotranspiration potentielle du jour. C'est une donnée climatique qui traduit l'ensemble des pertes en eau par évaporation et transpiration d'une surface cultivée de hauteur uniforme, couvrant totalement le terrain, en pleine période de croissance, recouvrant complètement le sol et abondamment pourvue en eau. La fraction non recouverte du sol par la végétation $(1 - RIE_j)$ perd de l'eau par évaporation selon l'équation (5) :

$$E_j = K_r(S_{j-1})\ (1 - RIE_j)\ ET0_j \quad (5)$$

$$K_r(S) = \begin{cases} 0, & S \le S_h \\ \frac{S - S_h}{1 - S_h}, & S \ge S_h \end{cases} \quad (6)$$

avec $K_r(S)$ $[sans\ dimension, comprise\ entre\ 0\ et\ 1]$ une fonction de limitation de l'évaporation en fonction de l'humidité du sol (cf. fig A.2). En effet, moins le sol est humide, plus la quantité d'eau perdue par évaporation diminue car les forces de capillarité s'opposent plus fortement à son départ jusqu'à atteindre le point hygroscopique S_h $[sans\ dimension]$ qui est un seuil d'humidité au-dessous duquel l'évaporation ne se produit pas [5]. La croissance de la biomasse est modélisée en multipliant la transpiration journalière par un coefficient de limitation W^* [5], selon l'équation suivante :

$$B_j = B_{j-1} + W^* K_S(S_{j-1})\ RIE_j\ ET0_j \quad (7)$$

La figure A.1, donnée en annexe, résume le couplage du modèle simplifié « ToyCrop » avec un modèle de traitement d'eau usée afin de piloter en continu le fonctionnement d'une STEP en fonction des besoins de la plante en eau.

3. VALIDATION DU MODELE

3.1. *Méthodologie de validation*

La validation du modèle consiste à examiner sa capacité à reproduire, en ajustant ses paramètres, différents jeux de données. Pour ce faire, on a généré différentes sorties qui correspondent à différentes années climatiques et à différentes conditions d'irrigation avec le logiciel « Optirrig ». Le modèle mathèmatique du logiciel « Optirrig » a été validé sur un large ensemble de données expérimentales couvrant plusieurs années de culture de différentes végétations (maïs, blé dur) sous différents scénarios d'irrigation. Ce modèle est complexe et comprend de très nombreux paramètres à identifier ou à déterminer empiriquement. De fait, son éventuel couplage avec un modèle de station de traitement de l'eau augmenterait encore le nombre de paramètres à identifier ce qui rendrait un tel modèle inutilisable pour des tâches d'optimisation et de synthèse de contrôleurs. C'est la raison pour laquelle il est nécessaire de développer un modèle plus simple (cf. équation (1) -(8)) et adapté à la commande. Une fois la structure du modèle simple est proposée, il faut en estimer les paramètres, à partir de jeux de données générés par « Optirrig », afin que ce modèle reproduise le plus fidèlement possible les données simulées. Les paramètres ont été identifiés pour chaque cas à l'aide d'un solveur d'optimisation globale programmé sous MATLAB appelé « GlobalSearch ». Ce solveur fait appel à la fonction d'optimisation non-linéaire sous contraintes "fmincon". Cette fonction est lancée par le solveur, à partir de différentes conditions initiales des paramètres du modèle « ToyCrop », θ_0, afin de déterminer le jeux de paramètres permettant de minimiser une fonction objectif. La fonction objectif du problème d'identification correspond à la somme des moindres carrés des déviations des prédictions ($\hat{S}_j$ et $\hat{B}_j$) du modèle proposé par rapport aux sorties d'« Optirrig » (S_j et B_j) (taux d'humidité du sol et production en biomasse du semis jusqu'à la fin de l'année climatique), comme le montre l'équation (8) :

$$J(\theta) = \sum_{j=j_{semis}}^{365} \frac{(\hat{s}_j - s_j)^T (\hat{s}_j - s_j)}{\max_j S_j^2} + \frac{(\hat{B}_j - B_j)^T (\hat{B}_j - B_j)}{\max_j B_j^2} \quad (8)$$

avec θ les paramètres du modèle « ToyCrop » à identifier qui sont S_w, S^*, c, S_h et W^*. Comme on somme des carrés de grandeurs différentes (S et B), on a choisi de les renormaliser par rapport à leurs valeurs maximales. L'efficacité du modèle à reproduire les données de validation a été évaluée par le calcul de coefficient de détermination R^2.

3.2. *Résultats de validation*

Les résultats d'identification représentés sur les figures 2-5 montrent qu'il est possible de trouver un jeu de valeurs des paramètres du modèle « ToyCrop » qui permet de prédire d'une manière satisfaisante les sorties du logiciel « Optirrig »

pour deux années climatiques : 1996 et 2001 et pour deux stratègies d'irrigation différentes : pluviale et par tour d'eau. La stratégie pulviale correpond à une irrigation juste au semis. Par contre, la stratégie par tour d'eau correspond à une irrigation selon un calendrier. Pour le cas testé, l'irrigation par tour d'eau se fait chaque 7 jours si la somme de pluie et d'irrigation reçue ne dépasse pas un certain seuil. Le tableau 1 récapitule les valeurs des paramètres du modèle « ToyCrop » correspondantes au meilleur ajustement du modèle sur les sorties d'« Optirrig » de chaque cas. Ces valeurs sont différentes d'une année à l'autre et d'une stratégie d'irrigation à l'autre, ce qui montre la généricité du modèle.

Table 1 - Conservation and Creation of Clean Water Environment**.**

Année	Stratégie	W^*	S_h	S_w	S^*	c
1996	Pluviale	0.37	0.7	4.9 10-9	0.36	0.73
	50% ETM	0.22	0.93	0.09	0.10	2.91
2011	Pluviale	0.32	0.50	2.26 10-7	0.16	1.01
	50% ETM	0.26	0.89	0.18	0.18	2.07

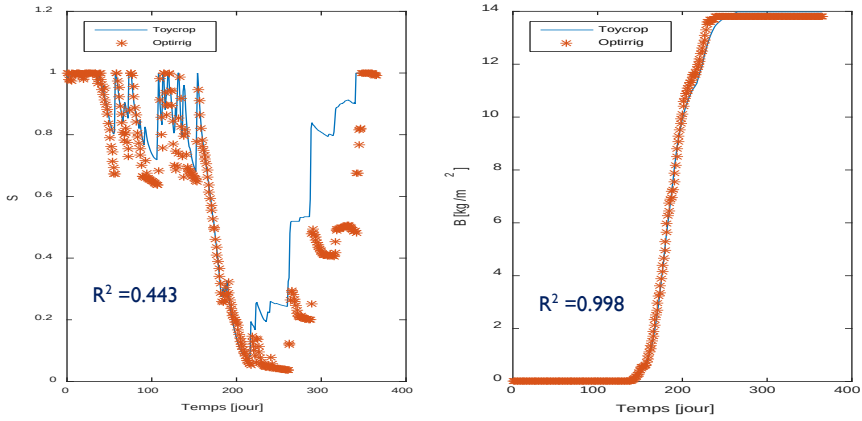

Fig. 1 – Simulation du taux d'humidité dans le sol et la production en Biomasse, stratégie pluviale, année 1996

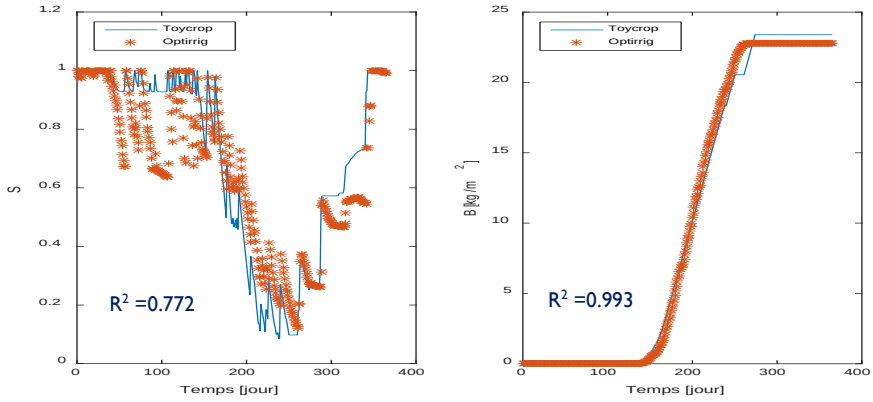

Fig. 2 – Simulation du taux d'humidité dans le sol et la production en Biomasse, stratégie tour d'eau, année 1996

CONCLUSION

Malgré sa simplicité et sa structure réduite, le modèle « ToyCrop » proposé a été capable de reproduire fidèlement les sorties d'un modèle beaucoup plus complexe. Cela ouvre des perspectives intéressantes pour l'utilisation de ce modèle pour des fins d'optimisation et de contrôle. Le caractère innovant de ce travail réside dans le fait que la production de la station d'épuration peut ainsi être modulée en tenant compte du caractère dynamique de la demande en eau des végétations. Les perspectives de ce travail comprennent aussi la modélisation des besoins de la plante en nutriments en

fonction de sa croissance et le pilotage de la qualité et la quantité de l'eau traitée à la sortie de la STEP en fonction de ses besoins, notamment en azote.

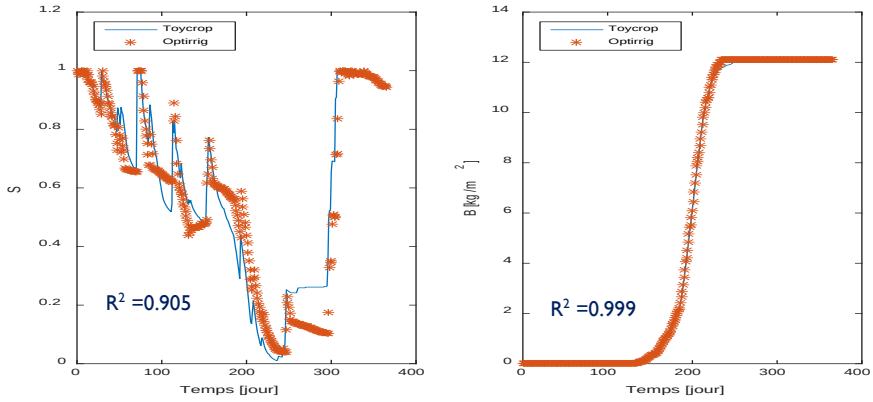

Fig. 3 – Simulation du taux d'humidité dans le sol et la production en Biomasse, stratégie pluviale, année 2011

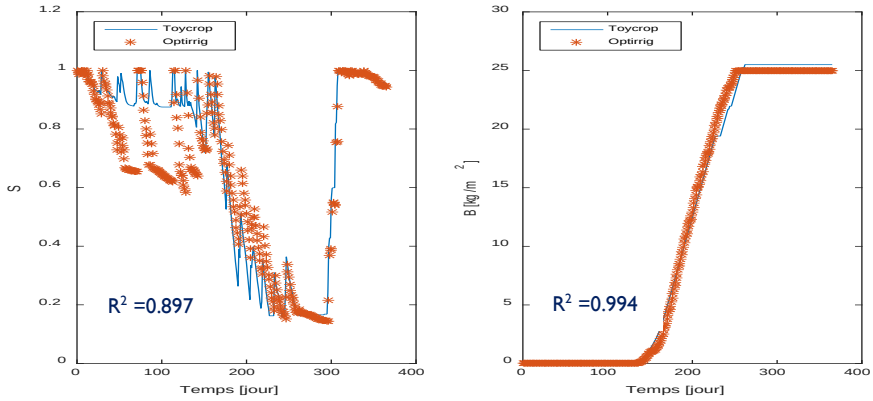

Fig. 4– Simulation du taux d'humidité dans le sol et la production en Biomasse, stratégie tour d'eau, année 2011

Références

1. JEUFFROY, M.-H. et RECOUS, S. Azodyn: a simple model simulating the date of nitrogen deficiency for decision support in wheat fertilization. European journal of Agronomy, 1999, vol. 10, no 2, p. 129-144.
2. AGGARWAL, P. Kalra, KALRA, N., CHANDER, S., et al. InfoCrop: a dynamic simulation model for the assessment of crop yields, losses due to pests, and environmental impact of agro-ecosystems in tropical environments. I. Model description. Agricultural systems, 2006, vol. 89, no 1, p. 1-25.
3. BRISSON, Nadine, GARY, Christian, JUSTES, Eric, et al. An overview of the crop model STICS. European Journal of agronomy, 2003, vol. 18, no 3-4, p. 309-332.
4. STEDUTO, Pasquale, HSIAO, Theodore C., RAES, Dirk, et al. AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. Agronomy Journal, 2009, vol. 101, no 3, p. 426-437.
5. PELAK, Norman, REVELLI, Roberto, et PORPORATO, Amilcare. A dynamical systems framework for crop models: Toward optimal fertilization and irrigation strategies under climatic variability. Ecological Modelling, 2017, vol. 365, p. 80-92.
6. OPTIRRIG, logiciel pour la génération, l'analyse et l'optimisation des scénarios d'irrigation des cultures : http://www.irstea.fr/innovations/optirrig-logiciel-generation-analyse-optimisation-scenarios-irrigation

7. 7. CHEVIRON, B., VERVOORT, R.W., ALBASHA, R. DAIRON R., LE PROL, C. and MAILHOL, C., A framework to use crop models for multi-objective constrained optimization of irrigation strategies. Environmental Modelling & Software, 2016, vol. 86, p. 145-157.

ANNEXES

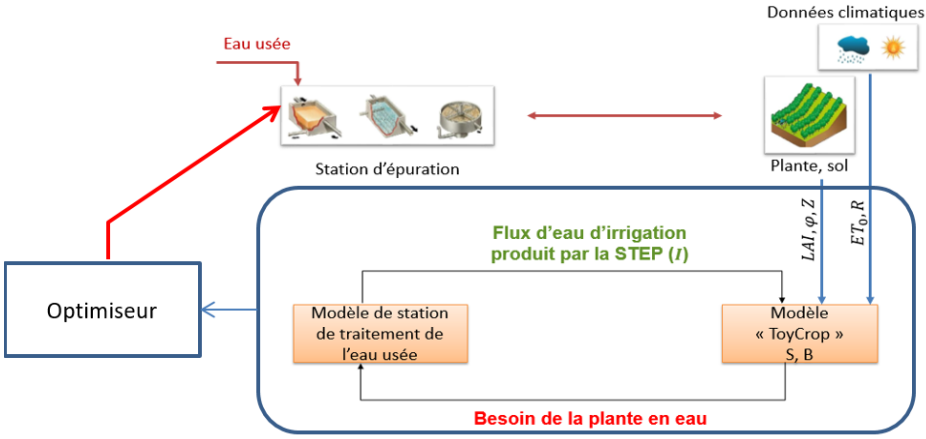

Fig. A.1– Schéma du couplage du modèle « ToyCrop » avec un modèle de station de traitement de l'eau usée

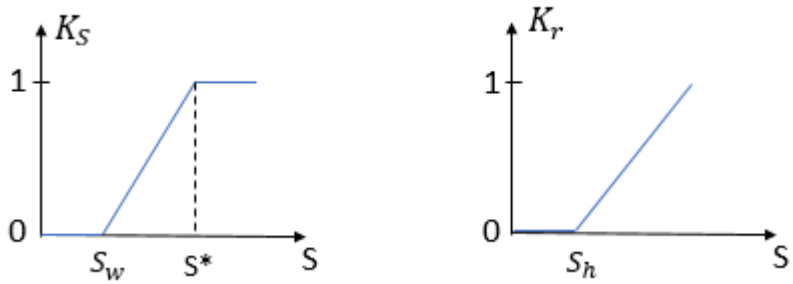

Fig. A.2– à gauche la fonction de limitation de la transpiration et à droite la fonction de limitation de l'évaporation